

# Capítulo 1

## Introdução

A últimas duas décadas do século XX foram marcada por uma explosão na demanda de serviços de comunicação no mundo todo. Particularmente, a segunda metade da última década foi dominada por uma expansão sem precedentes na comunicação sem fio. Com os primeiros anos do século XXI inaugura-se a terceira geração das comunicações sem fio (3G)<sup>1</sup>, marcada pela maturidade tecnológica e oferta de um leque enorme de serviços. Atualmente, as corporações ligadas ao setor de telecomunicações e o governo de diversos países têm dispensado uma enorme energia ao processo de padronização dos sistemas 3G, buscado a convergência da herança tecnológica deixada pelos sistemas de segunda geração, particularmente os padrões IS-95 (CDMA), o IS-136 (TDMA), o europeu GSM, entre outros. Um grande campo de pesquisa aplicada tem sido aberto e se intensificado neste últimos anos. Particularmente, intensos esforços têm sido feitos por grupos de pesquisas em todo o mundo na busca de sistemas de comunicação sem fio de alta eficiência espectral com capacidades e desempenhos melhorados, quer seja em termos do número máximo de usuários por unidade de área suportado em uma mesma banda, quer seja na obtenção de sistemas móveis capazes de atender uma diversidade de serviços, tais como serviços de voz, dados e imagens com distintas taxas de erros máximas [Dinan 98], [Adachi 98], [Ojanperä 98a] [Dahlman 98].

Apesar das inúmeras vantagens do sistema DS-CDMA Convencional ou *Single-user* (filtro casado à sequência de espalhamento e detecção de um único usuário, desconsiderando informações dos demais), tais como capacidade *soft*, facilidade de obtenção de *handover soft*, rejeição de interferência de banda estreita e possibilidade de explorar combinações de diversidade de multipercurso no receptor, o detector Convencional baseado no filtro casado resulta em uma capacidade sistêmica bem abaixo da capacidade do canal, além de sofrer a limitação da *interferência de múltiplo acesso* (MAI) e não ser resistente ao efeito *near-far* (NFRes), requerendo cuidado e acurácia no controle de potência. Assim, buscam-se algoritmos de detecção multiusuário objetivando a redução ou mesmo a eliminação da MAI. A limitação de desempenho nos sistemas CDMA é

---

<sup>1</sup> Para as principais acronismos e abreviações utilizadas neste trabalho, veja apêndice A.

resultado principalmente da MAI ou devido ao fato de múltiplos usuários estarem dividindo a mesma faixa de frequência. Esta interferência é resultado dos *offsets* temporais aleatórios entre os sinais dos usuários ativos, tornando impossível a manutenção da ortogonalidade entre todas as formas de onda de códigos de espalhamento. A interferência MAI torna-se substancial quando o número de usuários cresce e/ou quando as disparidades de potências tornam-se significativas.

Nos casos práticos em que for possível obter sistemas síncronos CDMA na ausência dos efeitos de propagação multipercurso, pode-se utilizar códigos ortogonais evitando-se efetivamente a MAI. No entanto, na grande maioria dos casos de interesse os sinais dos usuários sofrerão interferência de múltiplo acesso, pois os sistemas são assíncronos e/ou os canais apresentam propagação multipercurso, que resulta na perda da eventual ortogonalidade entre as seqüências de espalhamento. Este problema é acentuado ainda mais pelo efeito *near-far*. Este efeito ocorre especialmente no enlace reverso (móvel, MS, para estação radio base, BS) quando sinais fracos de estações móveis são "sufocados" por sinais fortes proveniente de estações móveis próximas à BS. Mesmo quando as MS estão à mesma distância da BS, o canal pode introduzir desvanecimento, resultando no mesmo efeito.

Acurácia nos procedimentos de controle de potência, onde a BS ajusta o nível de potência das estações móveis, de tal sorte que na recepção da BS todos os sinais cheguem com a mesma intensidade, é uma estratégia para se combater o efeito *near-far*. Caso a MAI seja mantida em limites razoáveis, através de um projeto do conjunto de seqüências de espalhamento que resulte em baixos valores de correlações cruzadas, e o sistema mantiver-se pouco carregado, limitando o número máximo de usuários ativos em cerca de 10% do ganho de processamento, PG, então é possível empregar técnicas de filtro casado na detecção dos sinais com um perda de desempenho aceitável. Por outro lado, quando o sistema apresentar requisitos de carregamento intenso, como no caso de sistemas de 3ª geração, e adicionalmente o controle de potência não for perfeito, então a perda de desempenho será substancial e intolerável. Esta é a principal razão para se considerar detecção multiusuário.

Detectores multiusuário (MuD) podem seguir classificações diversas, conforme realizem ou uma transformação linear baseando-se nas informações dos sinais dos usuários recebidos, ou então sejam capazes de ajustarem adaptativamente os parâmetros de canal do(s) usuário(s) em situações onde não estejam disponíveis, ou ainda procedam ao cancelamento dos sinais interferentes a partir da detecção, reconstrução e subtração dos interferentes do sinal total recebido, resultando na efetiva redução da MAI. Detectores multiusuário mostram-se tolerantes aos desajustes de potência, combatem

efetivamente a Interferência de Múltiplo Acesso, resultando em aumento de desempenho em relação ao detector Convencional.

Os principais detectores multiusuário lineares (subótimos) fixos para sistemas DS-CDMA amplamente analisados na literatura são o Decorrelator e o baseado no mínimo erro quadrático médio MMSE (*Minimum Mean Square Error*). Estes MuD lineares fixos descorrelacionam ou desacoplam os sinais dos usuários interferentes a partir de uma transformação linear à saída de um banco de filtros casados aos sinais recebidos, restando apenas o sinal de interesse. Neste processo de descorrelação, o MMSE leva em consideração também o ruído de fundo<sup>2</sup>.

Abordagens adaptativas para a técnica de detecção multiusuário subótima CDMA prometem aumento de desempenho e de capacidade através do contínuo ajuste de estimativa dos parâmetros de canal. Detectores adaptativos são realizações aproximadas de estruturas receptoras multiusuário fixas. Existem problemas práticos e tópicos de pesquisa abertos, tipicamente associados à taxa de convergência e desempenho de *tracking* dos algoritmos adaptativos.

Nos detectores multiusuário subótimos baseados no Cancelamento de Interferência Subtrativo (IC) são geradas estimativas de interferência MAI e posteriormente subtraídas do sinal desejado, segundo algum critério de ordenação de usuários. Esta ordenação ocorre, por exemplo, avaliando-se as saídas individuais dos receptores de correlação, ou comparando-se as potências de todos os sinais dos usuários recebidos. O principal objetivo nos detectores subtrativos é a redução de complexidade, pois muitas técnicas subótimas em sistemas assíncronos apresentam complexidade elevada, dificultando ou mesmo impossibilitando sua implementação prática. As estruturas receptoras baseadas no cancelamento de interferência, SIC e PIC (Cancelamento<sup>3</sup> de Interferência Sucessivo e Paralelo, respectivamente), e ZF-DF (Decisão Realimentada *Zero Forcing*), pressupõem a explícita detecção e cancelamento de cada sinal de usuário a partir dos demais. Tais técnicas têm como pré-requisito o conhecimento dos parâmetros de canal, necessitando de estimadores eficientes para as energias e atrasos de todos os sinais dos usuários recebidos.

O desempenho de um detector Convencional no combate à MAI depende fortemente de um conjunto de condições favoráveis:

1. *Ótimas propriedades de Correlação Cruzada* ( $\rho_{ik}$ )<sup>4</sup> das seqüências de espalhamento. Caso os códigos fossem todos ortogonais,  $\rho_{ik} = 0$ , não ocorreria MAI. Na prática, todos os canais possuem ou algum grau de assincronismo, mesmo em sistemas síncronos, ou experimentam

---

<sup>2</sup> Ruído térmico e interferências não correlacionáveis.

<sup>3</sup> ou Cancelador.

<sup>4</sup> Para a definição dos principais símbolos utilizados neste trabalho, veja apêndice B.

desvanecimento temporal. Exemplos de códigos quase ortogonais com baixas correlações cruzadas são as seqüências de espalhamento de Gold de fase preferencial e Hadamard-Sylvester [Lin 97], [Rupf 94], [Oppermann 97], [Fukumasa 94], [Bottomley 93], [Suehiro 94].

2. *Controle de potência.* Obtém-se controle das amplitudes recebidas, garantindo-se que todos os sinais dos móveis cheguem à estação radio base (ERB) com mesma intensidade. O padrão norte americano para comunicações móveis CDMA IS-95 (*Interim Standard 95*) implementa um laço aberto com potências transmitidas pelos móveis inversamente proporcionais às potências recebidas, e laço fechado, onde a ERB envia comandos para controlar a potência transmitida em cada móvel. Garante-se assim que todos os sinais recebidos na ERB difiram entre si de no máximo 1 dB.
3. *Códigos Corretores de Erro (FEC)* permitem obter desempenhos aceitáveis de BER para baixos níveis de relação SNR. Códigos convolucionais (CC) são um exemplo.
4. *Antenas Setorizadas/Adaptativas.* A setorização de antenas permite ganhos significativos apenas em uma fração fixa da cobertura da ERB, minimizando a interferência de múltiplo acesso oriunda das demais direções; tipicamente divide-se a célula em 3 setores de 120°. Nas adaptativas, as direções são ajustadas dinamicamente, utilizando-se de processamento de sinais adaptativos para focalizar a antena em uma determinada direção correspondente ao usuário de interesse.

O detector Convencional segue a estratégia de detecção única (*single user*); cada ramo do receptor da ERB (canal reverso) detecta apenas um único usuário sem levar em consideração a existência dos demais. Não há compartilhamento da informação ou processamento conjunto de sinais. Em detecção multiusuário, informações de todos os usuários são utilizadas em conjunto para melhorar a detecção de cada usuário individualmente. Assim, enquanto a detecção *single-user* não leva em conta a interferência causada pelos demais usuários, na detecção multiusuário as informações de código, de atraso, amplitude e fase de todos os usuários ativos são utilizadas afim de melhor detectar cada usuário de interesse.

Projetos de detectores multiusuário surgem para aliviar o problema da limitação de desempenho e capacidade de sistemas DS-CDMA convencionais. Em [Verdú 84], [Verdú 86a], [Verdú 86b], [Lupas 89b], [Verdú 90], Verdú e Lupas determinaram o ganho de desempenho e capacidade dos detectores multiusuário Ótimo e Lineares (subótimos) síncronos e assíncronos em relação ao sistema Convencional, minimizando a necessidade de controle de potência.

O detector multiusuário Ótimo [Verdú 86a] consiste em um banco de filtros casados seguido de um detector de seqüência de máxima verossimilhança, MLSE. O detector MLSE produz a seqüência

de máxima verossimilhança,  $\hat{\mathbf{b}}^5$ , em relação à sequência transmitida. Estima-se o vetor  $\mathbf{b}$  de forma a maximizar a probabilidade da sequência de dados ter sido transmitida dado que  $r(t)$  foi recebido, onde  $r(t)$  estende-se por toda a mensagem. Esta probabilidade é denominada de Probabilidade Conjunta a Posteriori,  $\Pr(\mathbf{b}|r(t), \forall t)$  com a hipótese de todas as mensagens transmitidas serem equiprováveis. Existe um problema na implementação do detector MLSE: como são possíveis  $2^{\mathcal{M}K}$  vetores para  $\mathbf{b}$  ( $K$  = número de usuários;  $\mathcal{M}$  = tamanho da sequência), uma busca exaustiva torna-se impraticável. No entanto, em [Verdú 86a] foi mostrado que o critério MLSE pode ser implementado para DS-CDMA a partir de filtros casados seguido por algoritmo de Viterbi, embora existam desvantagens:

- ainda resulta em complexidade exponencial em relação a  $K$ , da ordem de  $2^K$ ;
- requer conhecimento das amplitudes e fases recebidas. Estes valores não são conhecidos a priori, devendo ser estimados;
- sistemas DS-CDMA reais possuem um grande número de usuários, resultando em custo de implementação elevado.

Dada a proibitiva complexidade computacional inerente ao detector ótimo multiusuário, inúmeras propostas para implementação de detectores multiusuário subótimos (lineares e subtrativos), de complexidade linear com o número de usuários, foram feitas na última década. Uma possível esquematização para os vários tipos de detectores multiusuário pode ser vista na figura 1.1. Classificações para MuD incluem [Zvonar 95], [Moshavi 96], [Vucetic 98], [Madhow 98]: • versões fixas e adaptativas, conforme os coeficientes do filtro que processa o sinal de entrada sejam invariantes no tempo ou mudem de forma que o receptor se adapte às mudanças do canal; • lineares e não-lineares segundo o sinal multiusuário recebido passe por uma transformação linear afim de desacoplar do sinal de interesse os sinais interferentes, inerentes ao sistema CDMA, ou para detectar o usuário de interesse o receptor MuD empregará o princípio de cancelamento de interferência subtrativo a partir da detecção e reconstrução dos sinais interferentes. O Decorrelator e o MMSE serão tratados na seção 2.3; enquanto que os detectores multiusuário canceladores de interferência subtrativos, foco deste trabalho, são analisados em detalhes na seção 2.4.1 a 2.4.3.

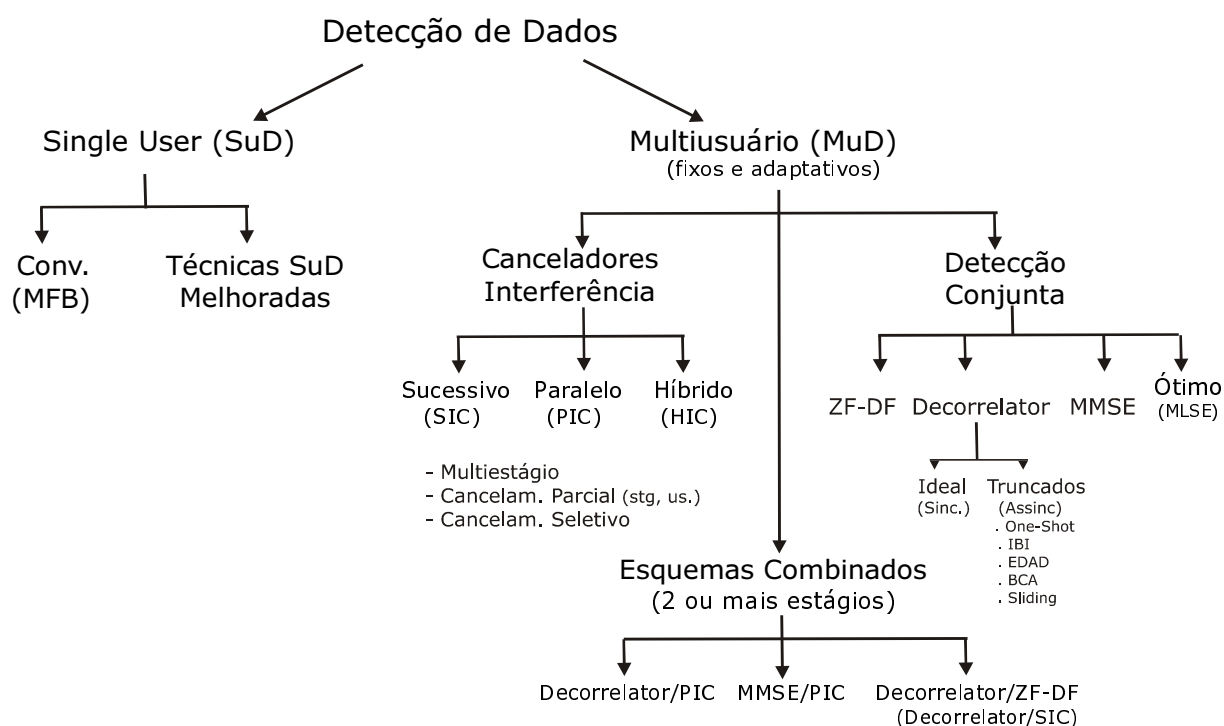
As principais vantagens associadas aos detectores multiusuário são:

1. *Significativo aumento de capacidade:* o limite pode ser aumentado através da inclusão de sinais, provenientes de células vizinhas, no algoritmo de detecção multiusuário (interferência intercelu-

---

<sup>5</sup> Para a notação utilizada neste trabalho, veja apêndice C.

- lar). Embora a detecção multiusuário ainda não seja factível para canal direto, em DS-CDMA, a limitação ocorre no canal reverso<sup>6</sup>.
2. *Utilização mais eficiente do espectro no canal reverso*: aumento de desempenho no canal reverso permite que os móveis operem com ganhos de processamento mais baixos, conduzindo a uma menor largura de banda do espectro de frequência (BW). A BW extra poderá ser empregada no aumento de capacidade do canal direto.
  3. *Requisito de controle de potência reduzido*: em ambiente multiusuário, uma vez reduzido o impacto da MAI, relaxa-se a exigência da igualdade de energia de todos os usuários no receptor.
  4. *Utilização mais eficiente de potência*: a redução da interferência no canal reverso pode resultar em redução no requisito de potência transmitida pelos móveis, propiciando uma maior autonomia para as baterias e/ou reduzindo o volume/peso dos terminais móveis.



**Figura 1.1.** Classificação geral para detectores single-user (SuD) e multiusuário (MuD), lineares e não lineares.

Como limitações, pode-se apontar duas:

1. *Interferência MAI em células vizinhas*: em ambiente de célula única, a detecção multiusuário ideal recria um canal equivalente *single-user*, removendo toda interferência dos outros usuários, exceto aquela gerada pelo ruído de fundo. No caso de ambiente mais realista de múltiplas célu-

<sup>6</sup> Uma vez que os sinais DS-CDMA são transmitidos sincronamente da ERB para as unidades móveis, a utilização de códigos ortogonais no canal direto potencialmente reduz a zero a MAI causada pelos sinais gerados na ERB, aliviando enormemente a MAI total percebida por uma unidade móvel em um sistema multicelular.

las a interferência de múltiplo acesso total, desprezando-se o ruído aditivo branco Gaussiano (AWGN), será:

$$\mathcal{I} = \mathcal{I}_{MAI} + f \cdot \mathcal{I}_{MAI} \quad (1.1)$$

onde  $\mathcal{I}_{MAI}$  = interferência intracelular;  $f$  = razão de MAI intercelular para intracelular (*spillover ratio*). Um cenário possível consiste na detecção multiusuário apenas dos interferentes localizados na mesma célula do usuário de interesse, negligenciando os demais interferentes localizados nas demais células. Neste caso, considerando sistema MuD ideal, toda MAI intracelular é eliminada, restando ainda a parcela<sup>7</sup>  $f \cdot \mathcal{I}_{MAI}$ . E como o número de usuários é proporcional à interferência MAI, o fator de *ganho de capacidade máximo* será,  $GC_{MAX} = \frac{(1+f)}{f}$ . Valor típico para  $f = 0,55$ . Portanto,  $GC_{MAX} \approx 2,8$ . Um cenário mais favorável pode ser estabelecido caso a detecção multiusuário seja estendida aos usuários das células vizinhas. Obtém-se um aumento de capacidade quando se leva em conta também os usuários interferentes mais fortes das demais células. Em [Agashe 95], resultados analíticos e de simulação mostram que o cancelamento de interferência seletivo dos interferentes intercelulares mais fortes potencialmente resulta em aumento de capacidade da ordem de 20 a 40%. [Madsen 99] propõe a combinação de um MuD Adaptativo Cego do tipo MMSE ao Cancelador de Interferência Subtrativo afim de tratar a interferência intercelular. No entanto, a inclusão dos usuários intercelulares mais fortes eleva a complexidade de implementação do algoritmo de detecção MuD.

2. *Dificuldade de implementação do detector multiusuário no canal direto:* por questões de custo, compactação, consumo de potência etc, ainda não é razoável a implementação no receptor do móvel. Está sendo considerada a implantação do detector multiusuário apenas na ERB em sistemas de comunicação móveis de terceira geração (3G). Porém, o aumento de capacidade deve ser obtida tanto no canal direto quanto no reverso, visando um efetivo aumento de capacidade. Esta limitação está se tornando cada vez menor com os crescentes avanços na área de DSP e Arranjos Lógicos Programáveis pelo Usuário, FPGAs (*Field Programmable Gate Arrays*), em termos de níveis de complexidade, velocidade e consumo de potência.

Entre os detectores multiusuário lineares fixos largamente estudados na literatura tem-se: o Decorrelator e o de Erro Mínimo Quadrático Médio (MMSE). Ambos resultam em substancial aumento de desempenho e capacidade em relação ao detector Convencional. A idéia básica em detecção subótima linear consiste na aplicação de uma transformação linear à saída do banco de filtros casados a fim de reduzir a MAI, vista a partir de cada usuário.

---

<sup>7</sup> Podendo ser tratada em alguns algoritmos MUD mais complexos (por ex, MMSE adaptativos), ou simplesmente ser tratada como AWGN, como ocorre frequentemente.

O receptor linear de Descorrelação remove todas as correlações cruzadas entre os usuários empregando uma transformação correspondente à inversa da matriz de correlação das seqüências de espalhamento. Foi demonstrado em [Verdú 86a], [Verdú 98] que o receptor de Descorrelação possui resistência ótima ao efeito *near-far*. Isto é, seu desempenho não é sensível às disparidades de potência dos usuários, possibilitando a detecção sem o conhecimento das amplitudes de todos os sinais recebidos. Em alguns casos, a matriz de correlação pode ser singular. Nestes casos, a matriz inversa generalizada<sup>8</sup> será empregada [Verdú 86a], [Verdú 98], [Haykin 96].

Uma alternativa consiste em selecionar uma transformação que reduza o erro quadrático médio (MSE = Mean Square Error) à saída do receptor, aliviando o problema do aumento de ruído presente à saída do detector multiusuário de Descorrelação. Isto tem conduzido ao desenvolvimento de receptores para CDMA do tipo MMSE o qual também apresenta resistência ao efeito *near-far*. O detector MMSE produz melhor desempenho que o Decorrelator; porém, requer estimativa das potências recebidas. Sob condições de baixo ruído, o receptor MMSE torna-se equivalente ao detector de Descorrelação. Ambos os receptores apresentam a mesma eficiência assintótica (cf. seção 2.2).

Além dos subótimos lineares, existem os detectores multiusuário subótimos subtrativos (IC), cujo princípio de operação consiste na geração de estimativas para a interferência de múltiplo acesso seguido pelo cancelamento (subtração) da MAI do sinal do usuário de interesse. As operações de reconstrução e cancelamento da MAI podem ser repetidas em uma estrutura de múltiplos estágios, resultado em sinais mais confiáveis a cada novo estágio cancelador quando estimativas puderem ser obtidas com relativa acurácia. Além das estimativas tradicionais para os atrasos e as fases das portadoras, em IC deve-se ter estimadores eficientes para as energias dos sinais recebidos. Fazem parte dessa estratégia as estruturas baseadas no cancelamento de interferência sucessivo, SIC (*Successive Interference Cancellation*) e paralelo, PIC (*Parallel Interference Cancellation*)<sup>9,10</sup>, além do detector de decisão realimentada ZF-DF (*Zero Forcing Decision Feedback*).

Existem ainda versões adaptativas para a técnica de detecção multiusuário subótima. Três formas de implementação desses algoritmos foram propostas: versões adaptativas para o Decorrelator, MMSE adaptativo e cancelamento de interferência adaptativo.

Para operarem adequadamente, as diversas estruturas multiusuário necessitam conhecer distintos parâmetros de sistema, relacionados ao usuário de interesse e aos interferentes. A tabela 1.1 apresenta os principais requisitos para os detectores multiusuário em termos das seqüências de espalhamento,

---

<sup>8</sup> Denominada também por matriz Moore-Penrose; veja apêndice D.

<sup>9</sup> Também denominado cancelamento (cancelador) multiestágio.

<sup>10</sup> Existem versões híbridas combinando-se cancelamento paralelo e sucessivo, em grupos de usuários (*Groupwise*), G-PIC e G-SIC.



das amplitudes e dos atrasos dos usuários ativos; compara o esforço computacional necessário à implementação dos algoritmos em função da complexidade temporal assintótica por decisão de bit, TBC. Este parâmetro corresponde ao número de operações requeridas para que o algoritmo de decisão estime a sequência transmitida dividido pelo número total de bits demodulados, quando o número de bits transmitidos for muito grande [Verdú 86a], [Verdú 98]. A TBC de  $p(K)$  será denotada por  $\mathcal{O}(f(K))$  quando, para  $K$  suficientemente grande, existir uma constante  $c$  tal que  $f(K) \leq c.p(K)$ . O número de usuários ativos é indicado por  $K$ . A tabela 1.2 apresenta um quadro comparativo mais completo para a complexidade computacional exigida pelos principais detectores MuD. Note-se que entre os detectores multiusuário descritos, o PIC e SIC resultam em algoritmos de complexidade reduzida, tornando-os atrativos para a implementação de sistemas de comunicação móveis 3G. Para uma análise mais criteriosa da complexidade computacional dos diversos receptores multiusuário, veja [Buehrer 96a], [Buehrer 96b], [Verdú 89], [Juntti 97a], [Ojanpera 98b], [Buehrer 00].

Característica / Requisito	Filtro Casado	Ótimo (MLSE)	Decorrelator	MMSE <sup>b</sup>	PIC e SIC	MMSE Adapt.	MMSE Cego	ZF-DF
Tipo	linear	não-lin	linear	linear	não-lin	linear	linear	linear
Saída	hard	soft	hard	hard	soft	soft	soft	soft
Desempenho	pobre	melhor	bom <sup>h</sup>	bom+ <sup>h</sup>	regular / bom+ <sup>c</sup>	bom+ <sup>h</sup>	bom+ <sup>h</sup>	bom+ <sup>h</sup>
Seq Us. Desejado	♦	♦	♦	♦	♦		♦	
Seqs Interferente		♦	♦	♦	♦ <sup>d</sup>			
Atraso Us. Desejado	♦	♦	♦	♦	♦	♦ <sup>e</sup>	♦	
Atraso Interferentes		♦	♦	♦	♦			
Ampl. Recebidas	♦ <sup>a</sup>	♦		♦	♦			
Nível de Ruído				♦				
Seq. Treinamento						♦		
Complexidade [TBC] <sup>f</sup>	indep. de $K$	$\mathcal{O}(\frac{2^K}{K})$	$\mathcal{O}(K^3)$	$\mathcal{O}(K^3)$	$\mathcal{O}(K)$ e $\mathcal{O}(K) + k\log_2 K^g$	$< \mathcal{O}(K^3)$	$< \mathcal{O}(K^3)$	$\mathcal{O}(K^3)$

a. Requer estrito controle de potência para um adequado desempenho.

b. Outro detector linear que também não utiliza a decorrelação de sinais para atenuar os efeitos da MAI foi proposto em [Monk 94], [Davis 96]. Assumem desconhecidas as sequências de espalhamento.

c. Para detectores multistágio com cancelamento parcial. Desempenho depende número de estágios. Cancelamento imperfeito resulta em patamar na BER

d. Pelo menos informações dos parâmetros dos interferentes fortes.

e. Conhecimento do atraso de propagação ao nível de símbolo é suficiente.

f. Complexidade temporal assintótica por decisão de bit.

g. A ordenação dos usuários de acordo com as potências recebidas em um SIC resulta na complexidade operacional proporcional a  $K\log_2 K$

h.  $L = K/N \leq 1$  para obter  $R^{-1}$ . Se número de usuários,  $K$ , for grande, erros de arredondamento na obtenção de  $R^{-1}$  resultam em patamar na BER

**Tabela 1.1.** Requisitos para detectores multiusuário

Embora resulte em complexidade computacional exponencial com o número de usuários, inviabilizando sua implementação, o detector Ótimo<sup>11</sup> multiusuário é utilizado como referência na comparação de desempenho de detectores MuD sub-ótimos.

<sup>11</sup> ou MLSE, detector de Sequências de Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood Sequence Estimation or Detection).

Controle de Potência. Em sistemas CDMA convencionais (receptores de correlação), um requisito chave para se obter aumento no ganho de capacidade consiste na manutenção da igualdade das potências dos sinais recebidos. Discrepâncias nestes níveis de potência resultam em drástico aumento do efeito *near-far*. Fatores que contribuem para as diferenças de potências recebidas: *variação das distâncias dos móveis à BS, sombreamento e desvanecimento multipercorso*.

Estrutura MUD	Núm. Estágios	TBC	Características	Ref.
MLSE	$2^{2K}$	$\mathcal{O}(2^{3K})$	Não há atrasos de processamento; decodificação de todos os usuários simultaneamente.	[Schneider 79]
MFB + Algor. Viterbi	$2^{K-1}$	$\mathcal{O}\left(\frac{2^K}{K}\right)$	Banco de filtros casados seguido por algoritmo de programação dinâmica, do tipo Viterbi. Redução da complexidade é obtida explorando-se o fato de que cada símbolo do usuário sobrepõe-se a apenas dois símbolos de cada outro usuário no sistema.	[Verdú 86a], [Verdú 98]
Decorrel.	1	$\mathcal{O}(K^3)$	Requer inversão da matriz de correlação, $\mathbf{R}$ .	[Schneider 79]
Decorrel. Aprox.	1	$\mathcal{O}(K^2)$ / iteração	Emprego de técnicas iterativas para inversão da matriz. Aproximações: $\mathbf{R}^{-1} = (\mathbf{I} - \mathbf{S})^{-1}$ ou $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{I} + \mathbf{S}$ . Uso de linhas de atrasos digitais com derivações. Complexidade ainda alta devido à mobilidade dos usuários.	[Kohn 83], [Mandayam 98], [Juntti 98d]
MMSE	1	$\mathcal{O}(K^3)$	Implementação direta resulta ainda na mesma complexidade do Correlator. Algoritmos adaptativos evitam inversões da matriz. Técnica adaptativa cega não requer seqs. de treinamento e um pouco mais de informação que o Convencional.	[Verdú 98] [Honig 95]
SIC	$K$	$\mathcal{O}(K) + K \log_2 K$	Ordenação das potências dos usuários resulta em complexidade $K \log_2 K$ . Potências transmitidas seguindo distribuição geométrica foi proposta em [Viterbi 90], objetivando obtenção do mesmo BER. Em [Kim 98] propõe-se modelamento de célula espacial; cada usuário é distinguido espacialmente baseado na sua distância à BS.	[Viterbi 90], [Patel 94], [Johansson 98]
Decisão Realim.	1	$\mathcal{O}(K^3)$	Classificação dos usuários segundo as potências recebidas; geração de um filtro direto empregando decomposição de Cholesky da $\mathbf{R}$ ; inversão de matriz triangular; filtragens direta/reversa, resultando em complexidade elevada.	[Duel-Hallen 93], [Duel-Hallen 95]
MPIC	$s > 1$	$\mathcal{O}(K) / stg$	Atraso de decodificação fixo; operações simultâneas: estimação, regeneração e subtração da MAI; devido à natureza paralela, pode explorar multiprocessamento; menor complexidade de implementação.	[Correal 99], [Renucci 98], [Buehrer 96a]
Redes Neurais		$\mathcal{O}(2^K)$	Complexidade exponencial com número de usuários, $K$ .	[Aazhang 92]

**Tabela 1.2.** Comparação da complexidade computacional dos principais detectores multusuário.

Visando obter ajuste nos níveis de potência transmitidos de tal forma a resultar no mesmo nível de potência recebido para todos os usuários ativos, algoritmos para o controle de potência determinísticos foram amplamente analisados na literatura [Gilhousen 91]. No entanto, estes ajustes resultam em imperfeições<sup>12</sup>. Mesmo sistemas convencionais com rígido controle de potência podem sofrer perdas de capacidade significativas em relação ao caso ideal. Um resumo da perda de capacidade é apresentado na tabela 1.3, baseado em limites inferior e superior sobre uma BER de  $10^{-3}$  e  $\frac{E_b}{N_0} = 12\text{dB}$  para o usuário de interesse;  $\sigma_{pot}^2$  é a variância dos níveis de potência recebidos

<sup>12</sup> Devido à incapacidade de responder às variações de desvanecimento rápido, entre outras.

e  $K_{\max}$  é o número máximo de usuários (capacidade) suportado para  $\text{BER} = 10^{-3}$  [Cameron 97], [Cameron 93]. Algoritmos determinísticos práticos para o controle de potência em sistemas CDMA convencionais mostraram em teste de campo ter variância da ordem de 1 a 2dB, o que resulta em grandes perdas de capacidade, da ordem de 25% a 30% [Viterbi 92].

$\sigma_{pot}^2$ [dB]	Pior Caso		Melhor Caso	
	$K_{\max}$	Perda Cap. [%]	$K_{\max}$	Perda Cap. [%]
0	25	—	30	—
1	21	16	27	10
2	17	32	22	27
4	11	56	13	57

**Tabela 1.3.** Perda Capacidade Sistema Convencional para  $E_b/N_0=12\text{dB}$  e  $\text{BER}=0,001$ .

Portanto, como o aumento de capacidade é uma das razões para se utilizar sistemas CDMA, este controle imperfeito de potência sugere que alternativas, tais como estruturas receptoras avançadas (multiusuário, em que o restrito controle de potência não seja um requisito fundamental) e/ou algoritmos de controle de potência baseados em avaliações de quantidades estocásticas propostos recentemente, sejam utilizadas para atender aos requisitos dos sistemas de comunicação avançados.

Outro aspecto importante na evolução dos sistemas de comunicação móveis refere-se à capacidade de tráfego não só de voz, mas também de dados e vídeo. No desenvolvimento de sistemas de comunicação móveis 3G, o padrão para comunicações móveis internacional IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications by year 2000*), fixado pela União Internacional de Telecomunicações (ITU), pressupõe a utilização de um sistema DS/CDMA de alta eficiência espectral. Prevê-se para o biênio 2001/2 a utilização mundial de sistemas de comunicação pessoais sem fio integrando voz, dados e vídeo com diferentes taxas de transferência. Faz-se necessário então obter sistemas capazes de suportar distintas (ou múltiplas) taxas de dados. Serviços de banda larga de até 384 Kbit/s para sistemas móveis com velocidade de até 120Km/s e serviços com taxas de até 2Mbit/s para ambientes *indoor* estão em fase final de padronização e testes.

Existem vários meios para se implementar esquemas de acesso com taxas de dados variáveis [Ottosson 98]. Sistemas de comunicação DS/CDMA de múltipla taxa podem ser obtidos designando múltiplos canais para usuários de alta taxa, denominado acesso multitaxa por múltiplo código (MC) [Johansson 98], [Ottosson 97]. No esquema de comprimento de seqüências variável (VSL, VPG ou MPG), os sinais de todos os usuários têm a mesma largura de banda, mas distintos ganhos de espalhamento [Saqib 98], [Chen 96]. No VSL utiliza-se toda a seqüência de espalhamento para espalhar os bits dos usuários de baixa taxa, e parte da seqüência para espalhar os bits de usuários de alta taxa. Existem ainda outros esquemas de acesso de múltipla taxa e suas variações: modulação

múltipla (MM) [Johansson 98]; esquema de múltipla taxa com ganho de processamento fixo e taxa de chip variável (VCR) [Buzzi 98]. Finalmente, pode-se combinar detecção multiusuário a esquemas de acesso multitaxas afim de obter sistemas com desempenho e capacidade melhorados e ainda capazes de atender a uma variedade serviços inerentes aos padrões de comunicações móveis 3G e avançados. Os esquemas de acesso de múltipla taxa são analisados no capítulo 4.

## 1.1 Sinopse dos Capítulos

Nos capítulos que se seguem apresenta-se um ampla revisão sobre detecção multiusuário, dando atenção especial ao canceladores de interferência subtrativos não lineares; segue-se uma descrição detalhada dos principais esquemas de transmissão de informação de múltipla taxa aplicáveis a sistemas de comunicação móveis de terceira geração. São apresentados em seguida novos esquemas multitaxa associados a detectores MuD do tipo canceladores de interferência subtrativos. Finalmente, após as conclusões deste trabalho, são listados prováveis caminhos de investigação a serem seguidos futuramente.

Especificamente, no capítulo 2 descreve-se na seção 2.1 um modelo de sistema DS/CDMA multiusuário assíncrono; conceitos relativos ao desempenho de detectores MuD são explorados na seção 2.2. As principais características dos MuD lineares são examinadas, em detalhes, na seção 2.3, sendo que as seções 2.4.1, 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5 foram reservadas aos MuD canceladores de interferência subtrativos, SIC, PIC e híbridos IC. Questões importantes que afetam o desempenho final dos sistemas multiusuário, tais como os erros nas estimativas dos parâmetros de canal são abordadas nas seções 2.5 e 2.6. Descrevem-se ainda métodos de implementação de simuladores de canal com desvanecimento Rayleigh.

Essencialmente, o capítulo 2 faz um síntese do estado da arte sobre conceitos e técnicas de detecção multiusuário. Embora os conceitos aí abordados sejam essenciais ao desenvolvimento e entendimento dos capítulos que se seguem, o leitor iniciado no assunto poderá se reportar diretamente ao capítulo 3 e seguintes.

No capítulo 3 buscou-se comparar o desempenho dos diversos tipos de canceladores de interferência paralelo empregando-se tanto uma abordagem analítica quanto a de simulação Monte Carlo. Obteve-se um método de cálculo analítico para o desempenho de detectores PIC com decisor HD e Tanh em canal Rayleigh Plano e AWGN. Deve-se ressaltar a condução de extensas simulações Monte Carlo, as quais resultaram na formação de um quadro de desempenho bastante completo para

os principais canceladores de interferência paralelos. Figuras de desempenho tais como a taxa de erro de bit e a robustez *near-far* foram obtidas e comparadas, por simulação e analiticamente.

Os principais esquemas de acesso DS/CDMA de múltipla taxa são sintetizados no capítulo 4. Tentou-se estabelecer uma análise comparativa dos principais esquemas multitaxa visando incorporá-los aos sistemas móveis de terceira geração com detecção MuD. Na seção são feitas algumas considerações sobre seqüências de espalhamento com ganhos de processamento igual à potência de 2 objetivando a aplicação em sistemas de múltipla taxa do tipo ganho de processamento múltiplo (MPG).

No capítulo 5 são propostos novos receptores associando-se detecção MuD IC paralelo e híbrido aos esquemas multitaxa do tipo código múltiplo (MC) e ganho de processamento múltiplo (MPG). Os desempenhos de sistemas multitaxa com 3 taxas de informação foram comparados a partir de extensa simulação Monte Carlo em canal AWGN e Rayleigh Plano.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho e apontadas direções para futuras investigações, tais como a combinação de sistemas MuD, canais com desvanecimento e esquemas de múltipla taxas.