

ESTRATÉGIAS DE DETEÇÃO MULTIUSUÁRIO PARA MINIMIZAR A INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO DS-CDMA

Deolinda Fontes Cardoso

Centro de Análises de Sistemas Navais – CASNAV - MB
Praça Barão de Ladário s/ nº, Ilha das Cobras, Edifício 8, 3º andar – Centro
Rio de Janeiro – RJ – CEP 20091-000
deolinda@casnav.mar.mil.br

Tiago Travassos Vieira Vinhoza

Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC-Rio - CETUC
Rua Marques de São Vicente nº 225 – Gávea
Rio de Janeiro – RJ – CEP 22453-900
vinhoza@cetuc.puc-rio.br

Resumo

DS-CDMA (Direct-Sequence Code Division Multiple Access) é uma das tecnologias mais promissoras para multiplexar usuários em sistemas de comunicações sem fio atuais e futuros. Na tecnologia CDMA os usuários são separados por códigos distintos e, assim, todos podem transmitir ao mesmo tempo e, ainda, cada usuário utiliza todo o espectro de frequência disponível para transmissão. Este artigo descreve a técnica de detecção multiusuário ótima (de máxima verossimilhança) proposta por Verdu para minimizar os efeitos adversos da interferência de múltiplo acesso em sistemas de comunicação sem fio. Além disso, nós apresentamos alguns métodos sub-ótimos baseados em heurísticas e meta-heurísticas para resolver o problema *NP-Hard* da detecção multiusuário ótima.

Palavras-Chaves: Sistemas de comunicações, técnicas de múltiplo acesso; Detecção multiusuário (MUD); Interferência de Múltiplo Acesso (IMA), métodos heurísticos, detecção multiusuário ótima.

Abstract

Direct-Sequence Code Division Multiple Access is a promising wireless communication technology. In DS-CDMA systems all users signals overlap in time and frequency and cause mutual interference. This article describes the optimal multiuser detector (maximum likelihood) proposed by Verdu in order to minimize the effects of multiple access interference in wireless communication systems. In addition, we present several sub-optimum methods based in heuristics and meta-heuristics for solving the NP-Hard optimal multiuser detection problem.

Keywords: Communication Systems; Multi-user detection; Multiple Access Interference (MAI); heuristics search methods, optimum detection.

1. INTRODUÇÃO

O sistema CDMA implementado com espalhamento por seqüência direta DS-CDMA (*Direct Sequence CDMA*) é considerado a técnica mais popular e promissora para multiplexar usuários em sistemas de comunicações sem fio. Na tecnologia CDMA os usuários são separados por códigos distintos ao invés de bandas de frequências ortogonais. Desta forma, todos os usuários podem transmitir ao mesmo tempo e cada usuário utiliza todo o espectro de frequência disponível para a transmissão. Por esta razão, os sistemas CDMA, também, são conhecidos como *Spread-Spectrum Multiple Access* (SSMA), ou simplesmente, comunicações com espalhamento de espectro. Na literatura existem diversas variações da tecnologia CDMA, dentre as quais podemos citar: FH-CDMA *Frequency Hopping*-CDMA

que utiliza saltos de frequência, muito utilizados em aplicações militares; MC-CDMA *Multicarrier*-CDMA que utiliza múltiplas portadoras; e WCDMA *Wideband*-CDMA que utiliza maior largura de banda.

Nos últimos anos observou-se um crescente interesse na tecnologia DS-SS principalmente devido às propriedades atrativas para as comunicações sem fio, tais como: bom desempenho em canais com múltiplos percursos; boa capacidade em ambientes com rajadas ou surtos de erros e desvanecimento; e flexibilidade na alocação de canais.

O maior obstáculo que limita a capacidade e desempenho dos sistemas CDMA é a Interferência de Múltiplo Acesso (IMA). Esta fonte de interferência é resultante da impossibilidade de manter a ortogonalidade entre os sinais dos usuários na recepção. Outros fatores como efeitos do canal de transmissão e possíveis desajustes no tempo contribuem para incrementar os efeitos adversos da IMA [1].

Além da IMA outras fontes de interferência afetam o desempenho dos sistemas CDMA, entre os quais estão: a IBE – Interferência de Banda Estreita; a IES - Interferência entre símbolos e o ruído no receptor. Dessa forma, a demodulação de um usuário desejado em uma rede CDMA requer o processamento do sinal recebido de modo a combater os diferentes tipos de interferência presentes [2]. O receptor ótimo ML (*Maximum Likelihood*) [3] capaz de minimizar a probabilidade de erro é considerado *NP-Hard*, limitando assim o uso exclusivo de métodos exatos. Por esta razão, métodos aproximados ou heurísticos são utilizados para fornecer soluções com tempos de conclusão quase ótimos.

Existem diversas técnicas para a formulação de soluções sub-ótimas. As principais técnicas adotam desde heurísticas de construção (como a heurística de *List Scheduling*, considerada *greedy* mas de complexidade atrativa) até as metaheurísticas.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: na seção 2 são apresentados conceitos da teoria da decisão para a construção do modelo matemático utilizado na detecção multiusuário. Na seção 3 é apresentado o modelo básico do canal síncrono CDMA para K usuários; na seção 4 é analisada a detecção multiusuário ótima e sub-ótima apresentando as estratégias heurísticas que podem ser adotadas. Os resultados comparativos dos métodos, baseados em heurísticas de busca, são descritos na seção 5. As conclusões deste estudo são apresentadas na seção 6 e a seção 7 lista as bibliografias relevantes a este trabalho.

2. A TEORIA DA DECISÃO NA DETECÇÃO MULTIUSUÁRIO

2.1. O MODELO MATEMÁTICO

No projeto do receptor em um sistema de comunicações é fundamental construir o modelo matemático do problema e do ambiente envolvido. A Figura 1 apresenta o diagrama do modelo matemático utilizado neste trabalho.

Os principais elementos do modelo são:

Ω : Espaço de Sinais ou conjunto de hipóteses iniciais;

Γ : Espaço de Observações;

A: Espaço de Decisões;

$p(y/s)$: Função densidade de probabilidade condicional; e

$D(a/y)$: Função de decisão que caracteriza o decisor.

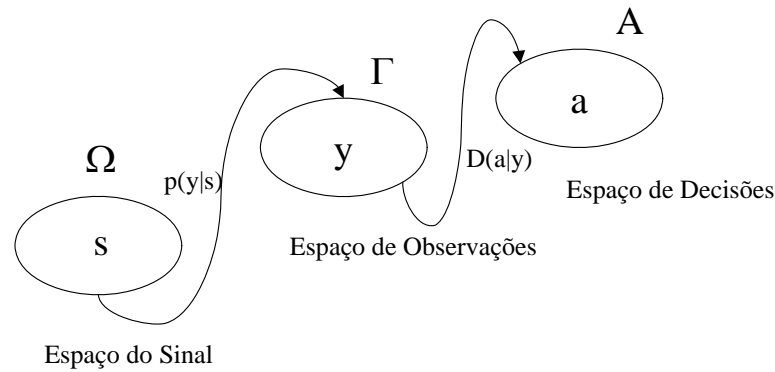


Figura 1. Diagrama do Modelo Matemático

O modelo geral consiste de um espaço abstrato dimensional suficiente, conhecido como espaço de sinais Ω composto de elementos s . É assumido que a ocorrência de elementos nesse espaço apresentam funções de densidade de probabilidade $\pi(s)$ conhecidas como *probabilidades à priori* dos sinais ou das hipóteses iniciais. Essas funções especificam probabilidades ou densidades de probabilidades dos sinais transmitidos. O receptor que captura o sinal está habilitado para observar somente versões distorcidas, devido ao ruído, das formas de onda transmitidas e não os próprios elementos do espaço de sinais. O segundo elemento do modelo é o espaço de observações Γ composto por elementos y que correspondem às observações ou possíveis entradas do receptor. Em adição, é também necessário definir o espaço de decisão A composto por elementos a (escolhas disponíveis ao receptor) que representam o conjunto de possíveis decisões a serem tomadas depois de observado o valor $y \in \Gamma$ no espaço de observações.

Uma vez definidos os elementos do modelo, o problema consiste em verificar primeiro um valor y no conjunto de observações e, assim, o receptor ótimo toma uma decisão D_j ($j=1, \dots, k$) com uma probabilidade $P(D_j | y=Y) = f_j(Y)$. O conjunto destas funções forma uma regra de decisão. A escolha de uma particular regra de decisão depende de um critério de decisão arbitrário para o sistema decisório. Sob as condições dadas queremos encontrar o receptor ótimo que melhor determina qual sinal foi transmitido. O receptor ótimo é aquele que minimiza a probabilidade do erro, ou da mesma forma, maximiza a probabilidade do acerto. $P(\text{acerto}) = 1 - P(\text{erro})$.

3. O MODELO DO SISTEMA CDMA

Neste trabalho nós adotamos um canal vetorial CDMA síncrono com k -usuários com caminho único comum, que sofre a interferência de ruído aditivo gaussiano branco (RAGB). Sob esses aspectos é suficiente considerar que o sinal recebido existe apenas dentro do intervalo $[0, T]$. A forma de onda contínua $r(t)$ que chega ao receptor pode ser expressa por:

$$r(t) = \sum w_k^{1/2} d_k s_k(t) + n(t)$$

onde $s_k(t)$ é a sequência de espalhamento do k -ésimo usuário;
 $d_k \in \{-1, 1\}$ é o bit de informação transmitido pelo k -ésimo usuário;
 $n(t)$ é o ruído gaussiano com densidade espectral de potência σ^2 ; e
 Cada forma de onda é considerada zero fora do intervalo $[0, T]$.

Os bits de informação dos usuários são assumidos serem independentes e equiprováveis.

A amostra de saída do filtro casado ao sinal do usuário k é:

$$y_k = \int r(t) \cdot s_k(t) dt \quad t \in [0, T] \quad k=1, 2, \dots, K.$$

O vetor amostrado na saída do filtro casado é definido como $\mathbf{y}=[y_1, y_2, \dots, y_K]^T$
 O vetor de dados é dado por $\mathbf{d}=[d_1, d_2, \dots, d_K]^T$
 O vetor na saída do filtro é expresso por:

$$\mathbf{y} = \mathbf{R}\mathbf{W}\mathbf{d} + \mathbf{z}$$

Onde as amplitudes $w_k^{1/2}$ dos K usuários formam a matriz diagonal:

$$\mathbf{W} = \text{Diag}(w_1^{1/2}, \dots, w_K^{1/2})$$

\mathbf{R} é a matriz de correlação $K \times K$ com elementos dados por:

$$R_{ij} = \int s_i(t)s_j(t) dt \quad \text{onde } i, j = 1, 2, \dots, K$$

O vetor \mathbf{z} de ruído gaussiano branco têm média zero e matriz de autocorrelação dada por: $E[\mathbf{z}\mathbf{z}^T] = \sigma^2 \mathbf{R} = \mathbf{R}_z$

O vetor \mathbf{y} constitui um conjunto de estatísticas suficientes para estimar o vetor de dados transmitidos \mathbf{d} .

4. A DETECÇÃO MULTIUSUÁRIO (MUD)

No receptor, a demodulação de determinado usuário requer o processamento do sinal de forma a suprimir os efeitos adversos da interferência de múltiplo acesso IMA. Esta interferência é considerada o maior obstáculo ao desempenho e aumento da capacidade dos sistemas CDMA. O projeto de receptores capazes de minimizar a interferência tem sido exaustivamente investigado. Detectores do tipo convencional que empregam um filtro casado à seqüência de assinatura são ineficientes para suprimir a IMA e, ainda, são demasiadamente sensíveis às diferenças de potência entre os sinais recebidos. O efeito decorrente dessas diferenças é chamado de *near-far* (perto-longe) e ocorre quando os transmissores possuem localizações diferentes em relação ao receptor.

A MUD é a estratégia mais promissora para aumentar a capacidade e o desempenho de sistemas CDMA, através da minimização dos efeitos adversos da Interferência multiusuário (IMA). Nesta estratégia, desde que os códigos dos usuários sejam conhecidos pelo receptor, a informação dos vários usuários é usada de forma conjunta com o intuito de melhorar o processamento do sinal de cada usuário. Em [4] o autor apresentou o detector multiusuário ótimo que consiste em minimizar a probabilidade do erro através da ML (*Maximum Likelihood*). O problema ML não é trivial, e sim considerado *NP-Hard* com elevada complexidade exponencial, sendo proibitivo para sistemas DS_CDMA. Além disso, a solução ótima requer sincronização e o conhecimento das amplitudes e das seqüências de códigos dos usuários, sendo praticamente inviável, em termos de complexidade computacional, para aplicações práticas [5]. Em decorrência, isto motivou o desenvolvimento de métodos aproximados ou heurísticos para o problema da detecção multiusuário [6]. Tais métodos fornecem resultados satisfatórios com desempenho próximos do ótimo.

4.1. A DETECÇÃO MULTIUSUÁRIO ÓTIMA

O detector ótimo seleciona a hipótese \mathbf{d}' mais provável, dada na saída do filtro casado, baseando a decisão na máxima verossimilhança ML (*Maximum Likelihood*):

$$\mathbf{d}' = \arg \max_{\mathbf{d}} p(\mathbf{y}|\mathbf{d}) \quad \text{com } \mathbf{d} \in \{-1, 1\}^k$$

Considerando que o canal é RAGB a função negativa da *log-likelihood* baseada na função densidade de probabilidade condicional $p(\mathbf{y}|\mathbf{d})$ é proporcional a

$$\mathbf{d}' = \mathbf{d}^T \mathbf{W} \mathbf{R} \mathbf{W} \mathbf{d} - 2\mathbf{y}^T \mathbf{W} \mathbf{d}$$

No caso binário o problema ML (*Maximum Likelihood*) é descrito pela seguinte expressão:

$$\mathbf{d}' = \arg \min \mathbf{d}^T \mathbf{W} \mathbf{R} \mathbf{W} \mathbf{d} - 2\mathbf{y}^T \mathbf{W} \mathbf{d} \text{ com } \mathbf{d} \in \{-1, 1\}^k$$

A solução dessa expressão requer a procura em todas as 2^K possíveis combinações dentre os componentes do vetor \mathbf{d} . Assim, para fazer decisões que maximizam a verossimilhança (maximum likelihood) em um problema de detecção multiusuário é preciso resolver o problema de minimização binária, conhecido na área de otimização, como o problema da programação quadrática binária (BQP). Este problema, e por conseguinte, o problema ML é considerado *NP-Hard* com complexidade que aumenta exponencialmente com relação ao número K de usuários. Por essa razão, o problema da detecção multiusuário é considerado um problema de otimização combinatória com um conjunto finito de possíveis soluções exatas ou aproximadas.

4.2. A DETECÇÃO MULTIUSUÁRIO SUB-ÓTIMA

A detecção multiusuário sub-ótima pode ser dividida em detecção multiusuário aproximada e em detecção multiusuário heurística. A detecção multiusuária aproximada ocorre quando o algoritmo utilizado possui limite de pior caso conhecido. Por outro lado, a detecção heurística utiliza critérios identificados empiricamente ou intuitivamente como responsáveis por algum fator de desempenho na recepção.

A detecção multiusuário heurística pode ser classificada em duas grandes categorias. Na primeira encontram-se as heurísticas de Construção que utilizando um modelo para o sistema constroem a cada passo um único resultado como resposta para uma determinada entrada. Heurísticas desta categoria, geralmente, são utilizadas quando o tempo de construção do resultado é considerado um fator crucial e de grande importância ao objetivo final.

Na outra categoria encontram-se as heurísticas de construção e busca, nas quais vários resultados são criados durante a execução do algoritmo na busca da melhor solução final. Um aspecto importante de algoritmos pertencentes a esta categoria é que apesar de consumirem um tempo mais significativo para fornecer a solução final, os resultados podem apresentar melhor qualidade que os produzidos pelas heurísticas de construção acima descritas. Isto porque as heurísticas de construção e busca podem gerar diversas soluções durante a sua execução com a finalidade de a cada passo, melhorar cada vez mais a solução resultante da iteração anterior. Dentro desta categoria podemos citar os métodos de busca de propósito geral que objetivam encontrar uma boa solução através da aplicação de heurísticas modeladas para um determinado problema, conhecidas como metaheurísticas. Por serem de caráter geral as metaheurísticas possuem mecanismos que permitem percorrer o espaço de busca do problema escapando dos mínimos locais. São exemplos clássicos de metaheurísticas: Algoritmos Genéticos; *Simulated Annealing*; Busca Tabu e *Variable Neighborhood Search*.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O trabalho de Tan e Rasmussen [7] apresenta alguns métodos de otimização para solucionar de forma exata ou aproximada o problema da detecção multiusuário ótimo. São comparados 6 métodos de busca heurística com o receptor ótimo ML – *Maximum Likelihood*, são eles: DEC – *Detector Decorrelator*; SD-1 *Slowest Decent*; DEC-LS *Decorrelator com Local Search*; GRE-1 heurística *Greedy*; RTS – *Reactive Tabu Search* (M=15); e ILS – *Iterated Local Search*. Mais detalhes podem ser verificados em [7].

O objetivo dos experimentos é avaliar a detecção multiusuário baseada em métodos de otimização, investigando quanto os desempenhos subótimos, em relação à taxa de erro de bit (BER) se aproximam do desempenho ótimo ML. O canal de transmissão do sistema CDMA é considerado síncrono e perturbado por RAGB onde todos os usuários transmitem com a mesma potência.

A Figura 2 ilustra o desempenho dos detectores baseados em busca heurística para dois sistemas.

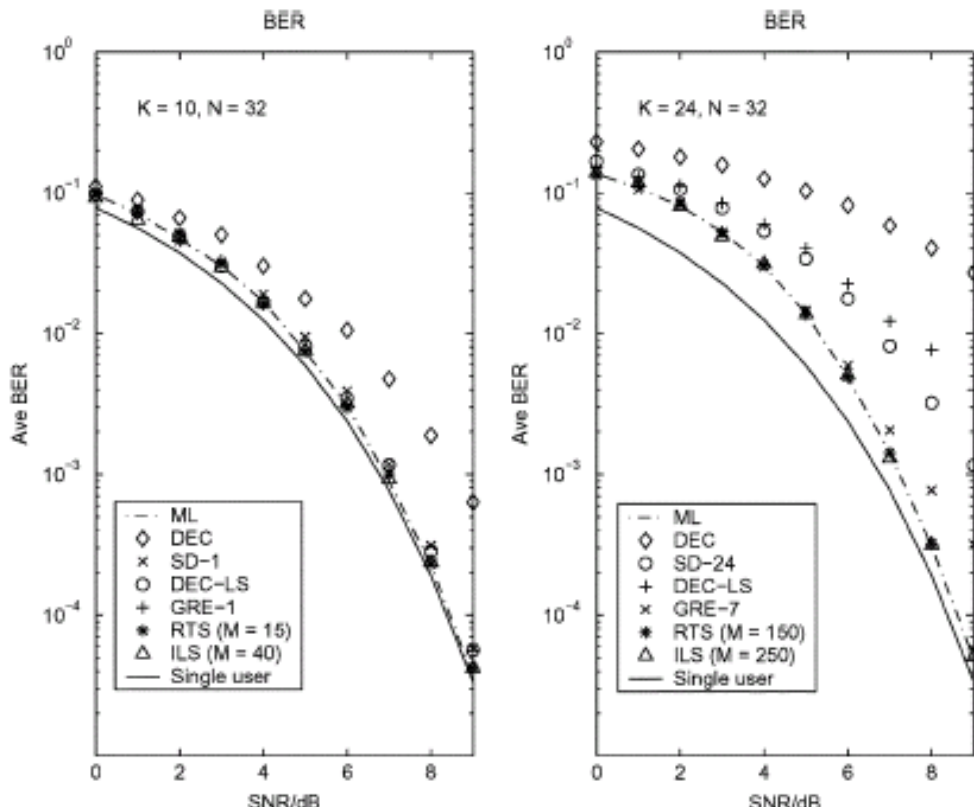


Figura 2. Comparação da taxa de erro de bits média versus razão sinal-ruído para os detectores baseados em busca heurística em sistemas com $K=10$ e $K=24$ usuários e $N=32$.

O primeiro sistema apresenta carga de 10 usuários e ganho de processamento de 32. Nesse sistema, o detector de busca tabu RTS, com 15 interações, se aproxima do desempenho do detector ótimo em termos da BER. O detector ILS precisa de 40 interações para se aproximar do desempenho ótimo. O detector *greedy* GRE-1 apresenta o mesmo desempenho BER que o detector ILS. Os detectores DEC-LS e SD-1 também conseguem boas aproximações, sendo o de pior desempenho o detector DEC.

No segundo sistema aumentou-se a carga para 24 usuários mantendo o mesmo ganho de processamento de 32. O detector de busca tabu RTS, para manter o mesmo desempenho anterior, precisou realizar 150 interações; enquanto o detector ILS precisou de 250 interações. O detector GRE-7 não consegue se aproximar do desempenho ML mantendo complexidade similar ao primeiro teste. Os detectores DEC-LS, SD-24 e DEC apresentam desempenhos pobres quando a carga no sistema aumenta.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, nós apresentamos uma breve introdução ao sistema CDMA considerado um dos métodos mais eficientes para multiplexar usuários em sistemas de comunicações sem fio. O maior obstáculo ao desempenho desses sistemas é a interferência de múltiplo acesso – IMA, resultante da impossibilidade de manter a ortogonalidade entre os sinais dos usuários na recepção. A detecção multiusuário (MUD) é a estratégia desenvolvida para suprimir os efeitos adversos da IMA, aumentando a capacidade de sistemas CDMA. Infelizmente, a detecção multiusuário ótima padece de uma complexidade exponencial proibitiva para aplicações práticas, sendo considerada um problema *NP-Hard*. Por este motivo, nos últimos anos observou-se um grande esforço de pesquisa para desenvolver

receptores sub-ótimos, que minimizam os efeitos adversos da IMA, com baixos requisitos de complexidade e desempenhos próximos ao detector ótimo.

Dentre as possíveis soluções sub-ótimas os métodos heurísticos de construção e os métodos heurísticos de construção e busca promovem soluções bastante atrativas. Nossa investigação baseada em [7] permitiu observar que os métodos heurísticos de busca: LS - *Local Search* e SD - *Slowest Decent* são muito rápidos, porém, incapazes de escapar de mínimos locais. A fim de evitar tais situações, podem ser empregados os métodos ILS *Iterated Local Search* e RTS *Reactive Tabu Search*. Estes métodos são específicos para procurar ótimos globais, entretanto, não podem garantir que a melhor solução global encontrada após determinado critério, seja a solução ótima global do problema.

Na instância de testes realizados para um número de usuários $K = 10$, $K = 24$ e ganho de processamento $N=32$, ambos os métodos RTS e ILS tem desempenho similar ao desempenho do receptor ótimo ML (*Maximum Likelihood*), com taxa de erro de bit (BER) indistinguível. O método de busca tabu é bastante efetivo em termos da BER e eficiente em termos da complexidade computacional quando comparado com as heurísticas LS e ILS. Além disso, quando o número de usuários aumenta, a busca tabu é a mais efetiva e eficiente que as outras.

O objetivo deste trabalho foi investigar a eficiência de alguns métodos sub-ótimos, baseados em busca heurística, para o problema da detecção multiusuário. Os métodos foram comparados com o intuito de mostrar quanto se aproximam do desempenho ótimo da Máxima Verossimilhança ML, em termos da taxa de erro de bis (BER).

7. AGRADECIMENTOS

Os autores apresentam um agradecimento especial ao Professor-Orientador Raimundo Sampaio Neto e ao Professor Weiler Alves Finamore, ambos do Centro de Telecomunicações da PUC-Rio, pelas valiosas contribuições para este trabalho.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAMPAIO NETO, R. Reduced-rank Interference Suppression for DS-CDMA using Adaptive Interpolated FIR Filters with Adaptive Interpolators. In: Proceedings IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Barcelona. CD-ROM, 5 páginas, 2004.
- [2] DE LAMARE, R. C.; SAMPAIO NETO, R. . Adaptive Decision Feedback Multiuser Detectors with Recurrent Neural Networks for DS-CDMA in Fading Channels. In: Proceedings IEEE International Conference on Telecommunications (ICT), Fortaleza. CD-ROM, 5 páginas. 2004
- [3] VERDU, Sérgio. Multiuser Detection. Livro Didático. Cambridge University Press. 1998.
- [4] VERDU, Sérgio. Computacional Complexity of Optimum Multiuser Detection. *Algorithmica*, vol.4, 303-312, 1989.
- [5] MOSHAVI, S. Multi-User Detection for DS-CDMA Communications. *IEEE Communications Magazine*. Outubro de 1996.
- [6] ALRUSTAMANI, A e VOJCIC B. R. Greedy multiuser detection over single-path fading channel. In Proc. IEEE Int. Symposium Spread Spectrum Techniques and Application, (New Jersey, USA) 708-712, 2000.
- [7] TAN, P. H.; RASMUSSEM, L. K. Multiuser Detection in CDMA – A Comparison of Relaxations, Exact, and Heuristic Search Methods. *IEEE* julho de 2003