

5

Desempenho de Receptores Multiusuário com Detecção Ótima por Grupos

5.1

Introdução

No capítulo anterior, foi proposto um receptor multiusuário híbrido formado por um estágio decorrelator na saída do qual é feita uma decodificação ótima por grupos. Para sistemas com mais de 2 usuários, existe mais de uma possibilidade de agrupamento. De fato, a complexidade do receptor pode variar desde K vezes a complexidade do decorrelator, para o caso em que são formados K grupos com um único usuário, até a complexidade do detector ótimo, para o caso em que apenas um grupo, contendo todos os K usuários do sistema, é formado. Observa-se que os grupos não precisam ter o mesmo número de usuários. Convém frisar que qualquer que seja o agrupamento, o desempenho do k -ésimo usuário na saída do estágio de detecção ótima por grupos é sempre melhor ou igual ao respectivo desempenho na saída do estágio decorrelator.

Em [17], é proposto um critério a partir do qual, uma vez fixados os tamanhos dos grupos, define-se o agrupamento ótimo como sendo aquele que minimiza a taxa de erro de bit (TEB) do usuário com pior desempenho do sistema, na saída do estágio de detecção ótima por grupos. Ainda em [17], é apresentado um limitante para a probabilidade de erro de bit em sistemas que utilizam detecção ótima por grupos, a partir do qual formula-se uma métrica com vistas a fornecer um método para formar, a partir da matriz de correlação das seqüências de espalhamento e da matriz de amplitudes dos sinais dos usuários, o agrupamento ótimo.

Para sistemas com codificação convolucional, uma expressão semi-analítica para um limitante da probabilidade de erro de bit pode ser obtida [12, 13] utilizando-se as técnicas de análise de códigos convolucionais. Contudo, esse limitante depende da estrutura do código utilizado, ou, de forma equivalente, da treliça associada ao código, o que, além da complexidade envolvida para sua obtenção, torna sua utilização muito particularizada.

A seguir, propõe-se uma abordagem alternativa, que não depende da estrutura do código, mas que não garante contudo a obtenção do agrupamento ótimo. Considera-se, para fins de praticidade que o agrupamento é formado por grupos de dois usuários. Caso K , o número de usuários ativos no sistema, seja ímpar, um dos grupos conterá o sinal de apenas um usuário. Os sinais dos usuários são então agrupados observando-se a matriz covariância, $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_d}$, do ruído presente na saída do estágio decorrelator, $\tilde{\mathbf{n}}_d$. A idéia central é colocar no mesmo grupo pares de sinais cujas componentes do ruído sejam as mais correlatadas, já que quanto maior for a correlação, maior será o benefício proporcionado pela detecção conjunta (ótima) do grupo. No caso geral, para grupos com mais de dois usuários (acarretando um aumento na complexidade), e com usuários tendo possivelmente níveis de potência diferentes na recepção, a estratégia de agrupamento utilizada em [17] para sistemas não codificados poderia indicar bons agrupamentos para o caso de sistemas codificados.

5.2

Resultados de Simulações

Nesta seção, é avaliado o desempenho na saída de cada um dos estágios que compõem o receptor proposto, para dois canais distintos. O primeiro é um simples canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). No segundo canal, além do ruído aditivo, é considerada a presença de desvanecimento de Rayleigh, tal como descrito no Capítulo 2.

O sistema CDMA compreende $K = 6$ usuários ativos. O espalhamento espectral é realizado utilizando-se seqüências de assinatura normalizadas, com componentes independentes $\pm \frac{1}{\sqrt{N}}$ geradas aleatoriamente, e de comprimento $N = 6$. O sistema pode ser portanto considerado bastante carregado. A matriz $\mathbf{R}$ de correlação dos sinais é dada por:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1.0 & 0.33 & 0 & 0.33 & 0.67 & 0 \\ 0.33 & 1.0 & 0.67 & -0.33 & 0 & 0 \\ 0 & 0.67 & 1.0 & 0 & -0.33 & 0.33 \\ 0.33 & -0.33 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0 & -0.33 & 0 & 1.0 & 0.33 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0.33 & 1.0 \end{pmatrix} \quad (5-1)$$

e sua inversa, $\mathbf{H} = \mathbf{R}^{-1}$ dada por:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 6.0 & -3.0 & 0.0 & -3.0 & -4.5 & 1.5 \\ -3.0 & 6.0 & -4.5 & 3.0 & 0.0 & 1.5 \\ 0.0 & -4.5 & 6.0 & -1.5 & 3.0 & -3.0 \\ -3.0 & 3.0 & -1.5 & 3.0 & 1.5 & 0.0 \\ -4.5 & 0.0 & 3.0 & 1.5 & 6.0 & -3.0 \\ 1.5 & 1.5 & -3.0 & 0.0 & -3.0 & 3.0 \end{pmatrix}. \quad (5-2)$$

O esquema de modulação utilizado é o QPSK. É suposto também que os sinais de todos os 6 usuários têm mesma potência na recepção, e que a matriz de amplitudes $\mathbf{A}(i)$ em (2-36) é conhecida pelo receptor.

Com relação ao esquema de codificação, é suposto que todos os 6 usuários utilizam o mesmo codificador convolutacional (2, 1, 2) ilustrado na Figura 5.1 e que todos os decodificadores operam com *soft-decision*. A treliça associada ao codificador convolutacional individual (Figura 5.1) tem $2^2 = 4$ estados e $2^1 = 2$ ramos saintes por estado. Para o estágio de detecção ótima por grupos, são considerados grupos de dois usuários. O codificador equivalente ao qual está associado a supertreliça de codificação para dois usuários está ilustrado na Figura 5.2. A título de comparação, convém observar que a supertreliça para detecção conjunta dos 6 usuários é formada por $2^{12} = 4096$ estados distintos e $2^6 = 64$ ramos saintes por estado. A supertreliça de decodificação conjunta para dois usuários é composta por $2^4 = 16$ estados distintos e $2^2 = 4$ ramos saintes por estado.

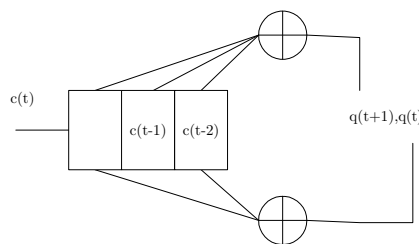


Figura 5.1: Codificador convolutacional (2,1,2) utilizado por cada um dos os seis usuários.

5.2.1

Sistema DS/CDMA QPSK com 6 usuários ativos em canal AWGN

Os resultados de simulação apresentados a seguir para o caso do canal AWGN foram obtidos tirando-se a média sobre 5 realizações independentes.

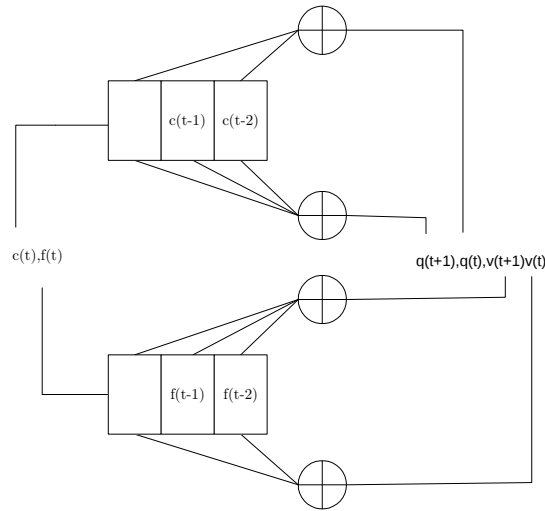


Figura 5.2: Codificador convolucional (4,2,2) equivalente associado à supertreliça utilizada no estágio de detecção ótima por grupos de dois usuários.

Para cada experimento, seqüências aleatórias e independentes de 10^5 bits de informação por usuário foram geradas.

A Figura 5.3 mostra o desempenho, na saída do banco de filtros casados, para cada um dos seis usuários ativos no sistema, em termos da TEB, variando-se a relação $\frac{E_B}{N_0}$, onde E_B é a energia por bit de informação. Nota-se na figura dois "grupos" de usuários com desempenhos semelhantes. Isso pode ser explicado observando-se na matriz $\mathbf{R}$ que os usuários 1,2,3 e 5 têm mesmo padrão de IMA, assim como os usuários 4 e 6. Como era esperado, os usuários 4 e 6, cujos sinais são afetados por menos IMA, têm desempenho superior aos demais usuários.

A Figura 5.4 ilustra o desempenho, na saída do decorrelator, para cada um dos seis usuários ativos no sistema, em termos da TEB, variando-se a relação $\frac{E_B}{N_0}$. Uma vez mais, nota-se a presença de dois "grupos" de usuários com desempenhos semelhantes. Esse fato é justificado observando-se a diagonal da matriz $\mathbf{H}$, que vem a ser proporcional à matriz covariância do ruído na saída do estágio decorrelator. Os ruídos que corrompem os sinais dos usuários 1,2,3 e 5 têm mesmo nível. A mesma observação abrange os ruídos relativos aos usuários 4 e 6.

Comparando-se os gráficos das figuras 5.3 e 5.4 observa-se que para regiões de razão $\frac{E_B}{N_0}$ baixa, onde o ruído é preponderante com relação à IMA, o desempenho na saída do banco de filtros casados é superior ao desempenho na saída do decorrelator, uma vez que o banco de filtros casados maximiza a relação sinal ruído no instante de amostragem, enquanto que o decorrelator elimina a IMA, às custas de um aumento no nível de ruído. Para regiões de razão $\frac{E_B}{N_0}$ alta, ocorre o inverso: a IMA é preponderante com relação ao ruído e portanto

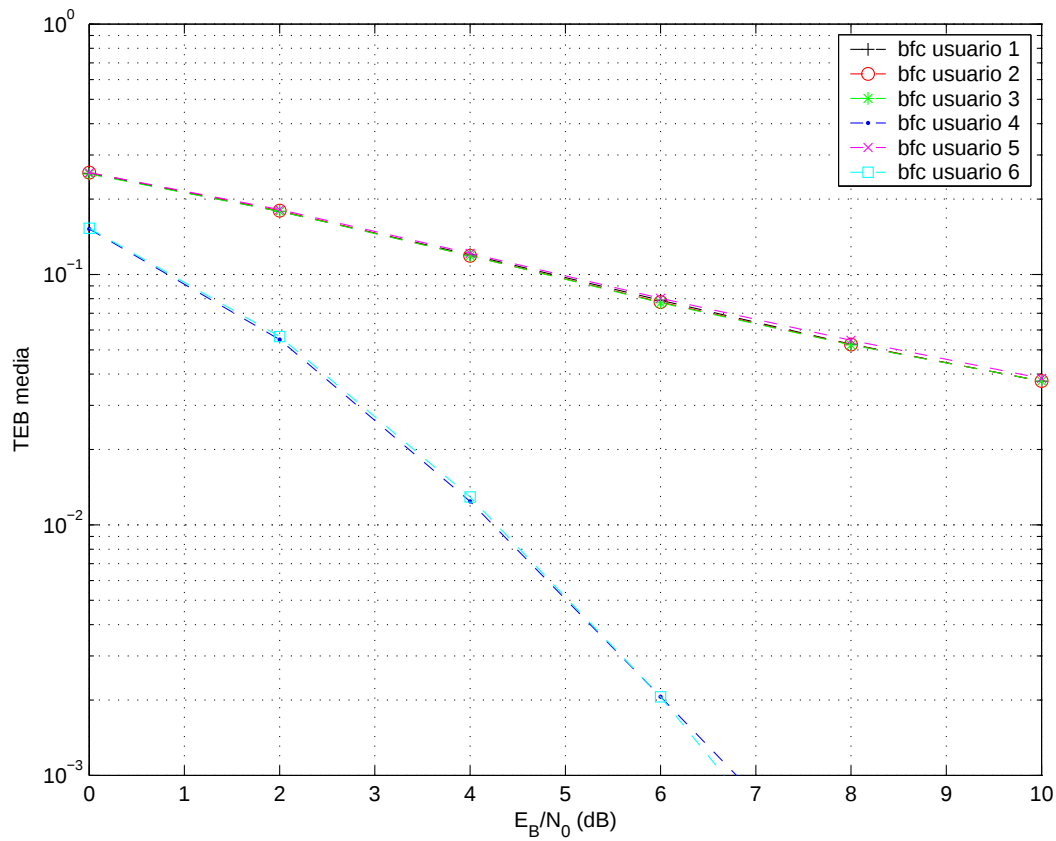


Figura 5.3: Desempenho na saída do estágio convencional (banco de filtros casados - bfc), por usuário, para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal AWGN.

o desempenho na saída do decorrelator tende a ser superior ao desempenho na saída do banco de filtros casados. Nota-se no entanto que para a faixa de TEB considerada, o desempenho dos usuários 4 e 6 na saída do banco de filtros casados é sempre superior ao desempenho na saída do decorrelator. Isso se deve ao fato dos sinais dos usuários 4 e 6 estarem sujeitos a menos IMA do que os demais usuários. Assim, o efeito de aumentar o nível de ruído ao eliminar a IMA, no estágio decorrelator, acaba sendo maléfico para estes usuários na faixa considerada.

A Figura 5.5 mostra o desempenho, na saída do estágio de detecção ótima por grupos de dois usuários, para cada um dos seis usuários ativos no sistema, em termos da TEB, variando-se a relação $\frac{E_b}{N_0}$. O agrupamento formado pelos grupos (1,5), (2,3) e (4,6) é ótimo de acordo com o critério descrito na seção anterior. Para determinação do agrupamento ótimo, foram comparadas as curvas de desempenho de todos os usuários obtidas através de simulação para todos os agrupamentos possíveis (em um total de 15). A comparação foi possível uma vez

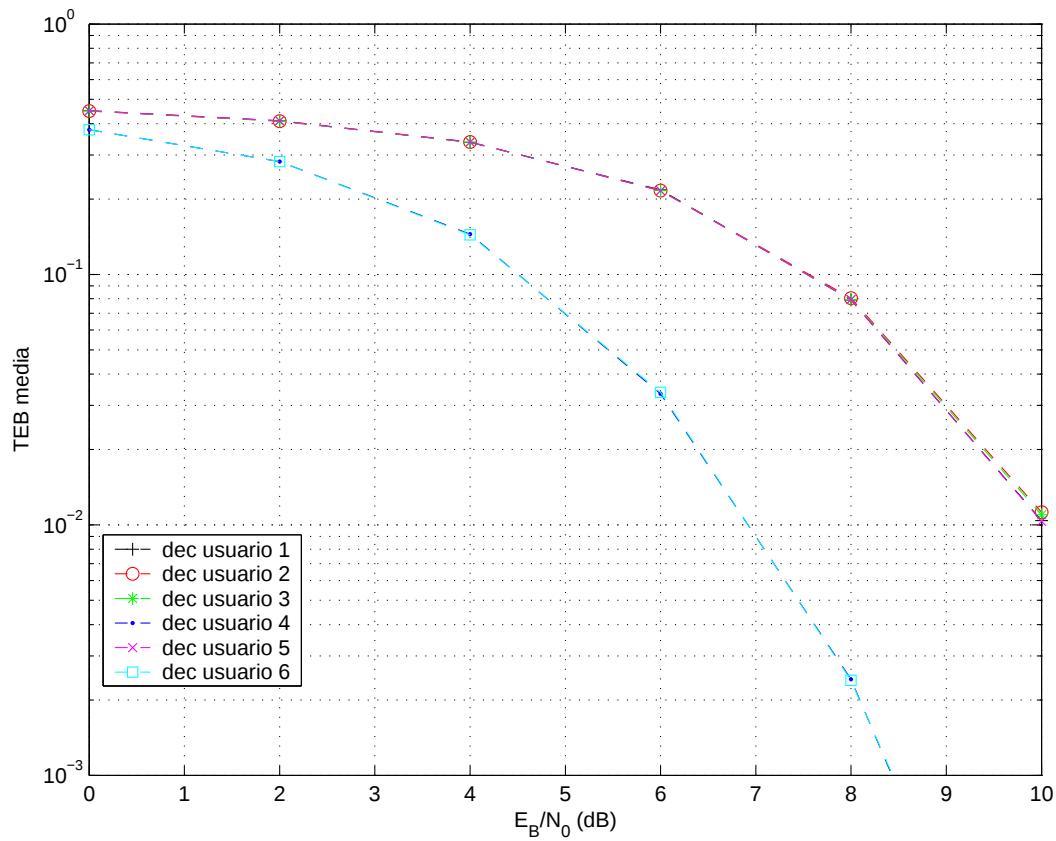


Figura 5.4: Desempenho na saída do estágio decorrelator (dec), por usuário, para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal AWGN.

que foi observado que as curvas dos usuários mantinham a hierarquia (i.e. não se cruzavam) para toda a faixa de razão $\frac{E_B}{N_0}$.

Comparando-se os gráficos das figuras 5.4 e 5.5 observa-se que a utilização da detecção ótima por grupos proporciona ganhos de quase $3dB$ com relação ao receptor decorrelator, para os usuários 1, 2, 3 e 5. O ganho ao utilizar esta detecção para os usuários 4 e 6 é de zero dB, uma vez que as componentes de ruído que afetam os sinais destes usuários são descorrelatadas, como nota-se do elemento H_{46} (ou H_{64}) da matriz $\mathbf{H}$ em (5-2).

As curvas da Figura 5.6 ilustram o desempenho do pior usuário para cada estágio do receptor proposto, em termos da TEB, variando-se a relação $\frac{E_B}{N_0}$. Vale salientar que o usuário de pior desempenho não será necessariamente o mesmo em cada estágio. No entanto, no caso da Figura 5.6, o usuário 1 resulta como sendo o de pior desempenho na saída de todos os 3 estágios do receptor. Assim, para um receptor convencional seguido de um estágio decorrelator, a operação de um serviço hipotético cuja TEB máxima seja de 10^{-2} fica garantida para uma

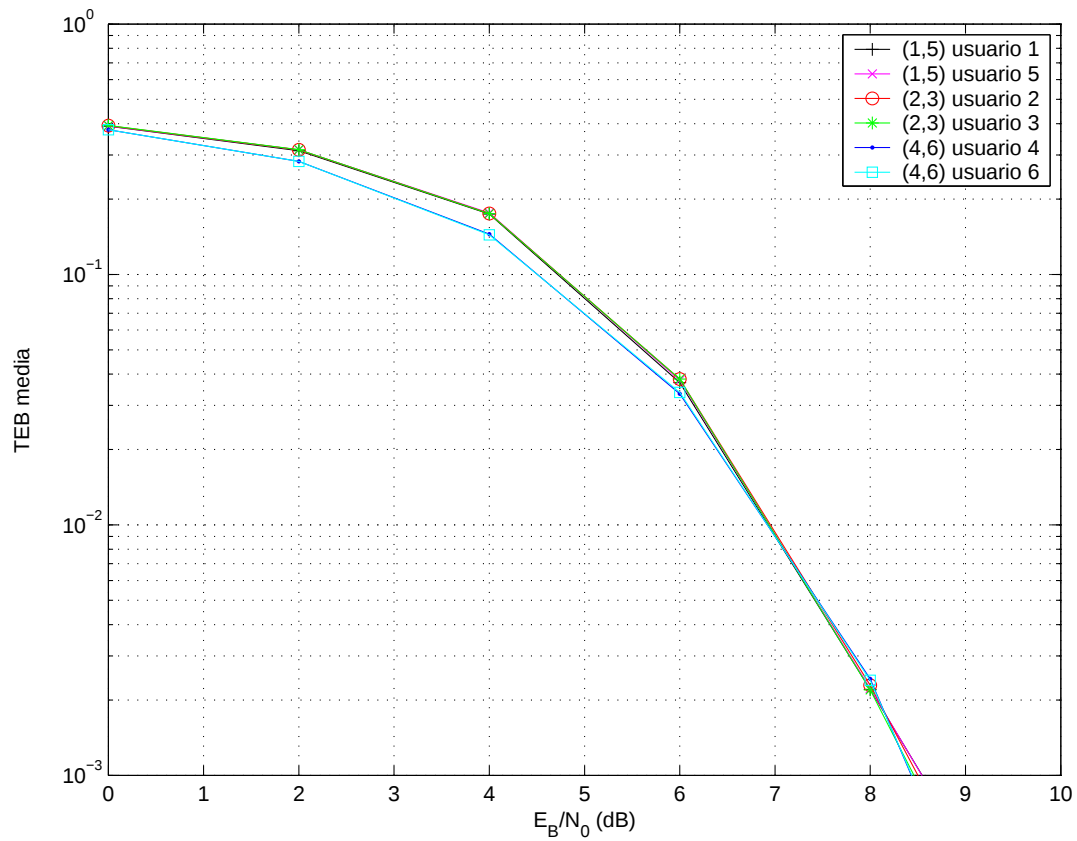


Figura 5.5: Desempenho na saída do estágio de detecção ótima por grupos de dois usuários, por usuário, para agrupamento [(1,5),(2,3),(4,6)], para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutiva, canal AWGN.

relação de $\frac{E_B}{N_0}$ maior ou igual a 10.0dB na recepção. Observa-se também que, para o receptor proposto, essa relação cai para aproximadamente 7.0dB. Para um receptor convencional, a operação deste serviço para a TEB máxima considerada é virtualmente impossível.

Por fim, a Figura 5.7 apresenta o desempenho médio do sistema, ao longo dos 6 usuários, na saída dos estágios convencional, decorrelator e para cada um dos grupos que formam o agrupamento considerado.

5.2.2

Sistema DS/CDMA QPSK com 6 usuários ativos em presença de desvanecimento Rayleigh

O segundo canal considerado incorpora ao modelo o desvanecimento de Rayleigh. Foram realizados 500 experimentos independentes com as características descritas como segue. Seqüências de 10^3 bits de informação independentes por usuário foram geradas em cada experimento. Para simular o desvanecimento,

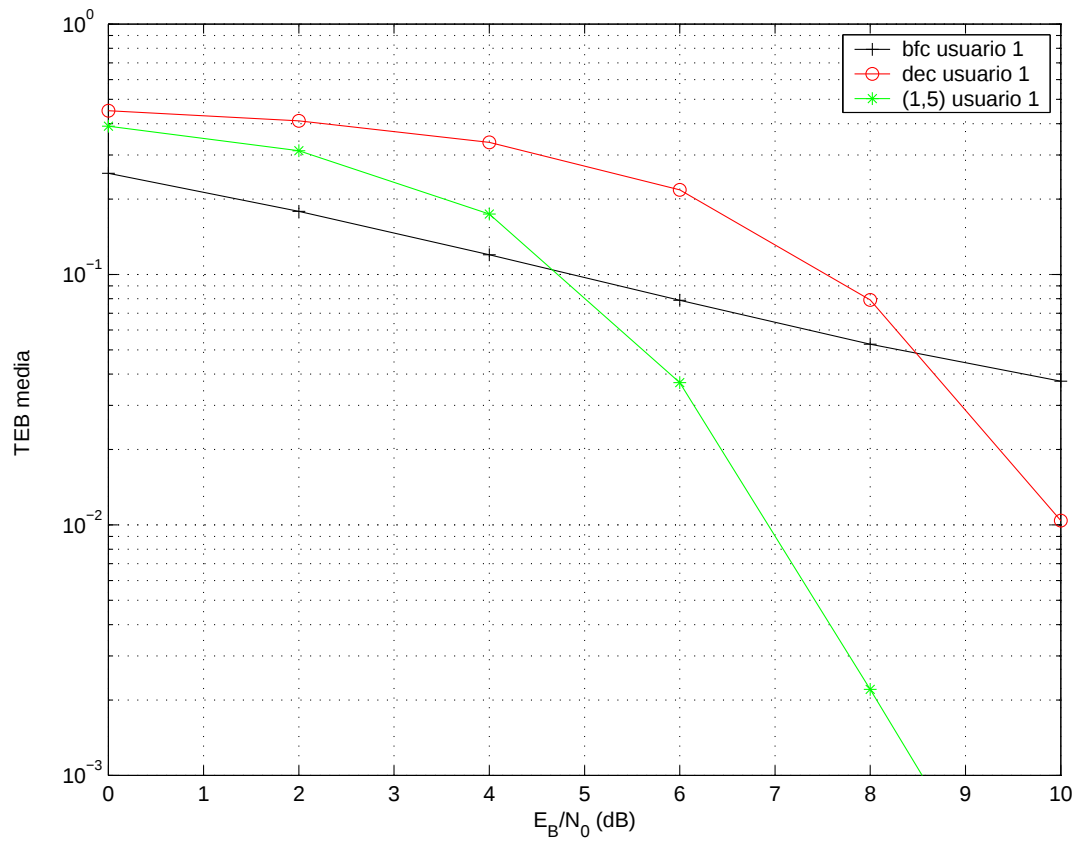


Figura 5.6: Desempenho do pior usuário de cada estágio, para agrupamento [(1,5),(2,3),(4,6)], para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal AWGN.

foi gerada para cada usuário uma sequência de variáveis aleatórias independentes gaussianas complexas $\{\alpha_k(i)\}_{i=I_1}^{i=I_2}$, com partes real e imaginária independentes e identicamente distribuídas. As sequências relativas a usuários distintos também são estatisticamente independentes entre si. Assim, o desvanecimento, que também introduz uma alteração na fase do sinal recebido, pode ser considerado "rápido" (ou uso de *interleaving*). Supõe-se ainda a presença de um "gênio" no receptor, de modo que o canal é perfeitamente conhecido (módulo e fase).

São apresentadas também as figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, similares às figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7. O agrupamento escolhido é o mesmo considerado ótimo para canal AWGN, não sendo portanto necessariamente o ótimo para canal com desvanecimento Rayleigh.

Tomando como exemplo mais uma vez um serviço hipotético que exija TEB inferior a 10^{-2} , foi constatado que sua operação fica garantida para uma relação de $\frac{E_b}{N_0}$ maior ou igual a 13dB na recepção, para um receptor decorrelator. Para o receptor proposto, essa relação cai para pouco menos de 10.0dB. Para o

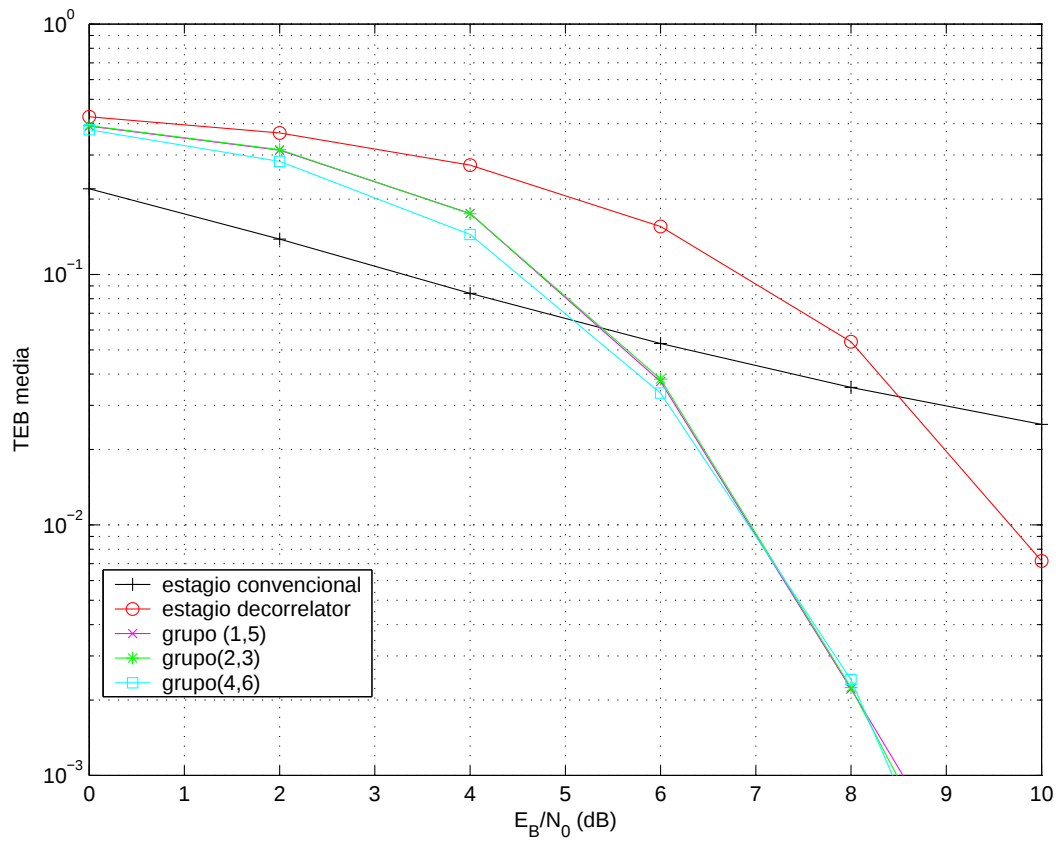


Figura 5.7: Desempenho médio na saída dos estágios convencional, decorrelator e detecção ótima por grupos de dois usuários (grupos (1,5), (2,3) e (4,6)), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal AWGN.

receptor convencional, a operação deste serviço para a TEB máxima considerada é mais uma vez virtualmente impossível. É interessante observar que os ganhos obtidos ao introduzir-se a detecção por grupos ainda são da ordem de 3dB (vide figuras 5.9, 5.10 e 5.11).

Assim, o desvanecimento introduzido tem forte impacto negativo no desempenho de todos os receptores considerados. A adição de um estágio de detecção ótima por grupos ao final do estágio decorrelator torna-se não somente vantajosa como necessária.

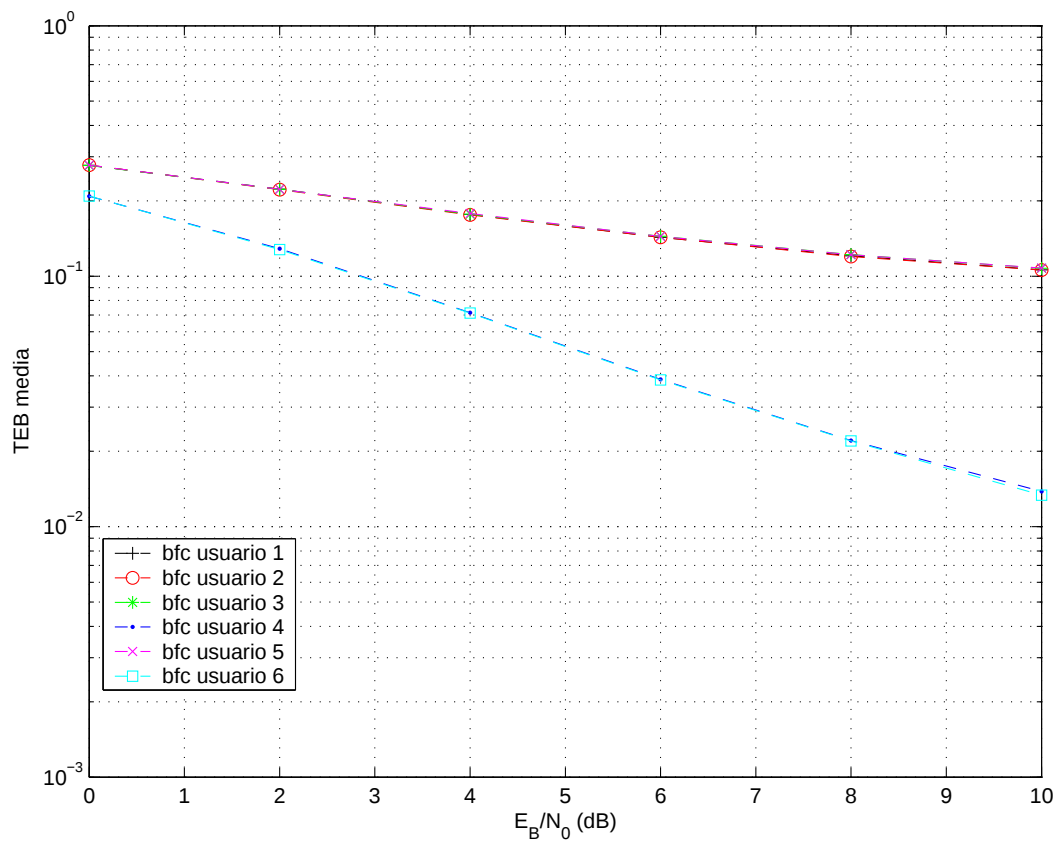


Figura 5.8: Desempenho na saída do estágio convencional (banco de filtros casados - bfc), por usuário, para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase).

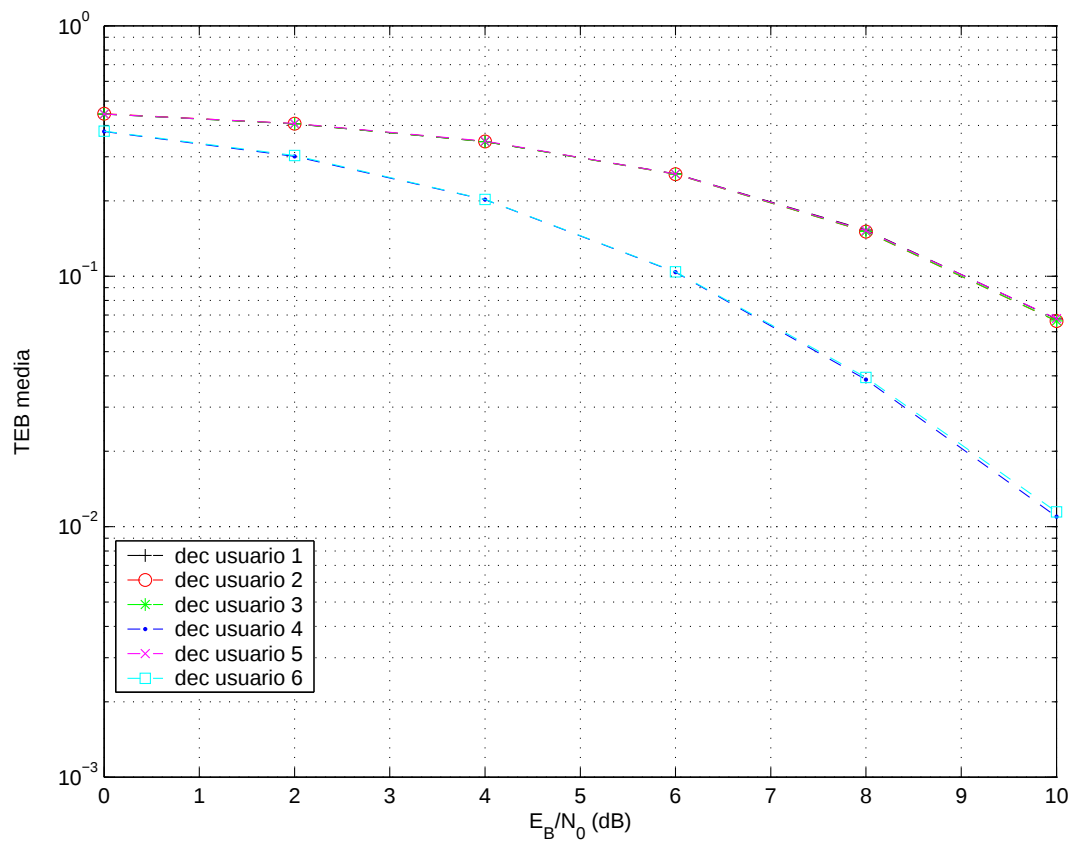


Figura 5.9: Desempenho na saída do estágio decorrelator (dec), por usuário, para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase).

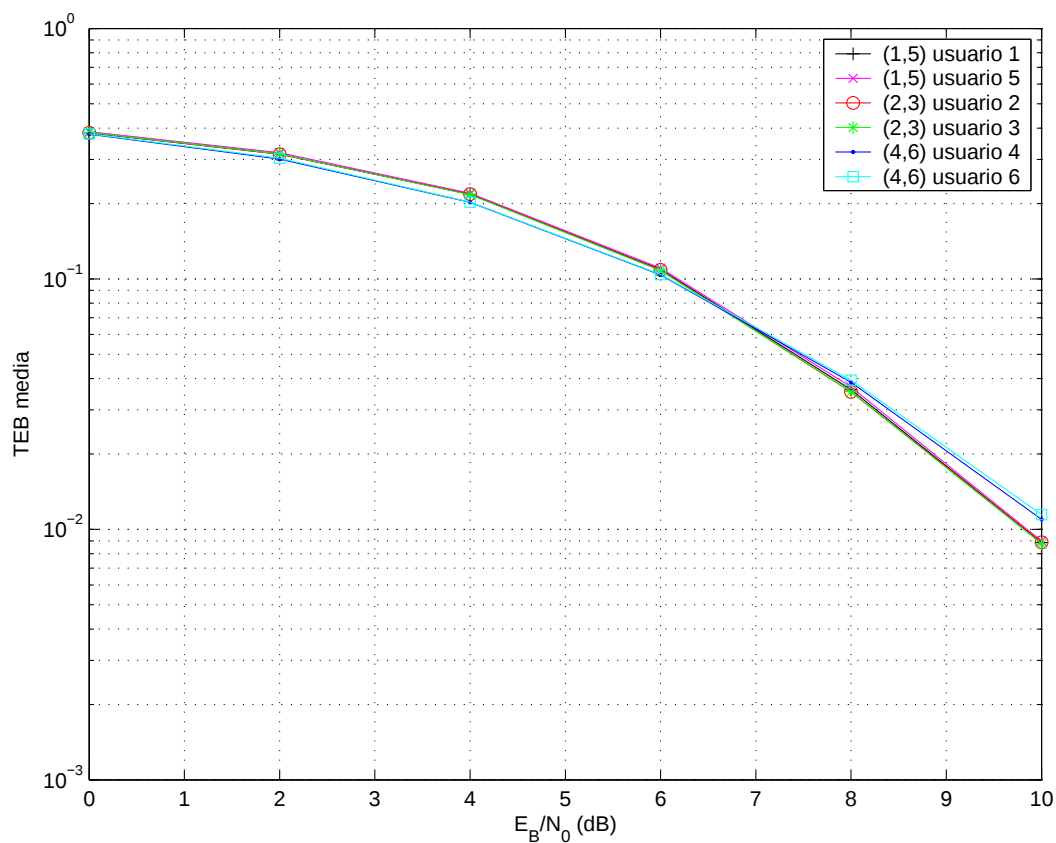


Figura 5.10: Desempenho na saída do estágio de detecção ótima por grupos de dois usuários, por usuário, para agrupamento [(1,5),(2,3),(4,6)], para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase).

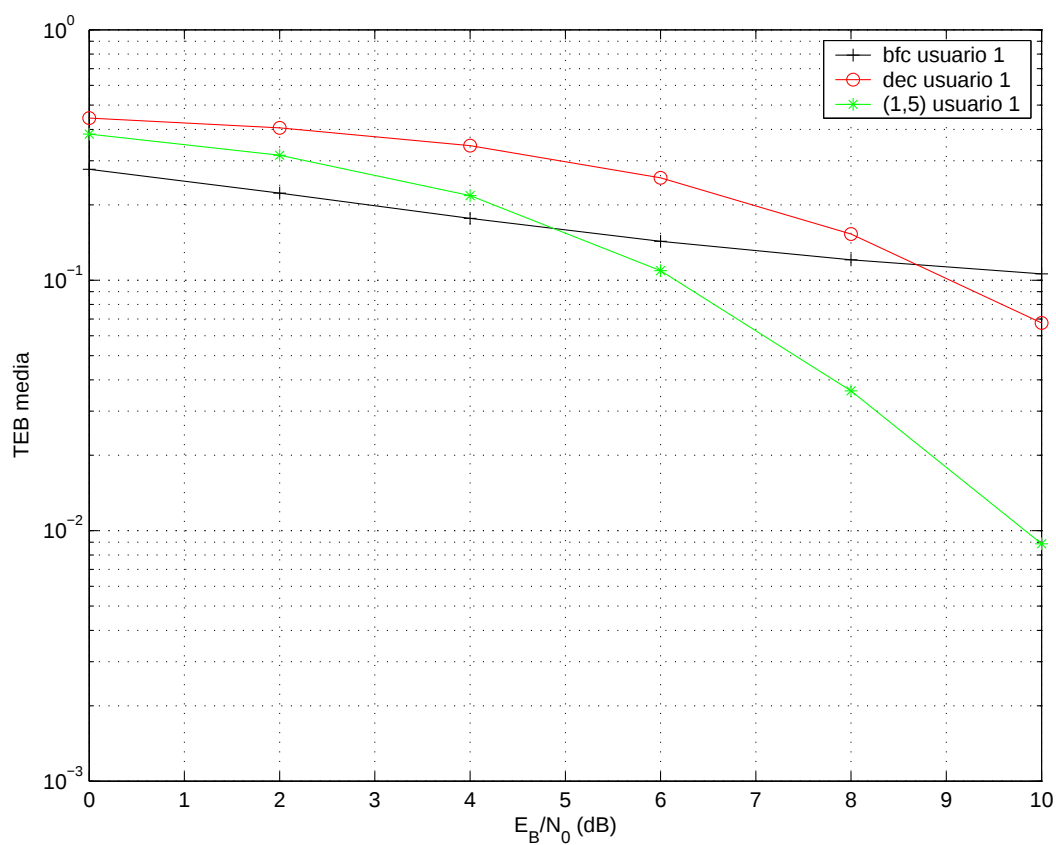


Figura 5.11: Desempenho do pior usuário de cada estágio, para agrupamento [(1,5),(2,3),(4,6)], para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase).

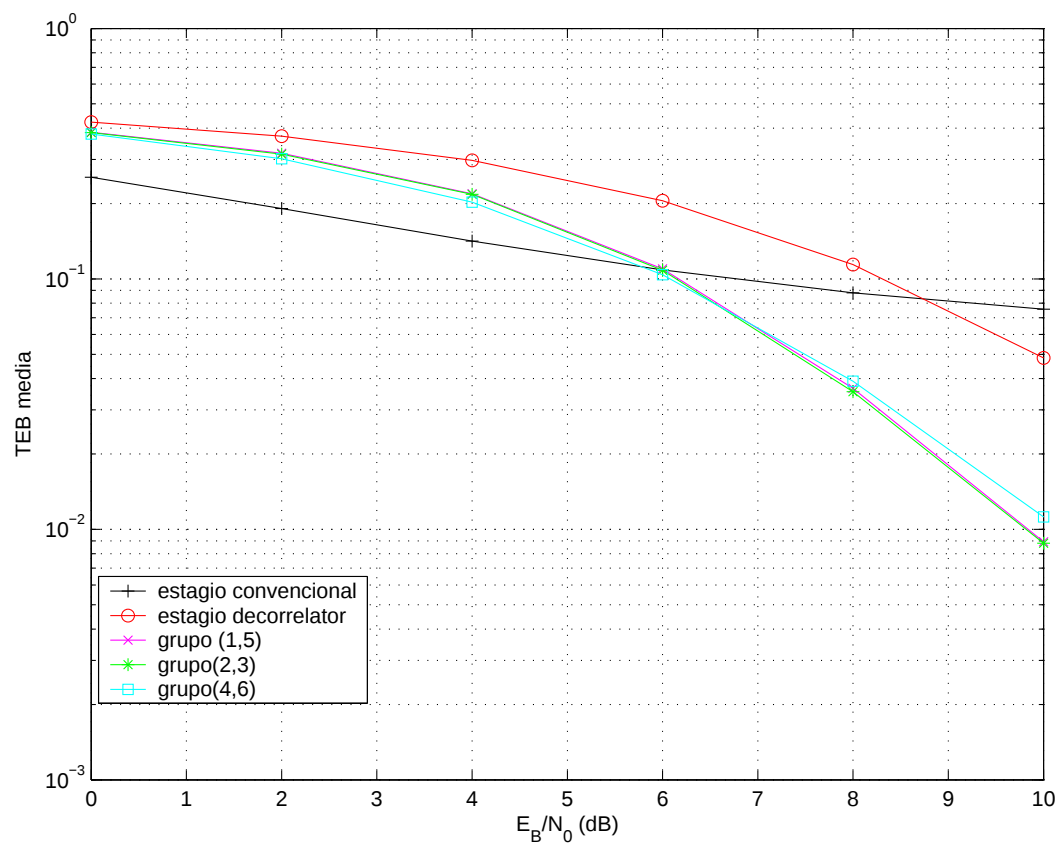


Figura 5.12: Desempenho médio na saída dos estágios convencional, decorrelator e detecção ótima por grupos de dois usuários (grupos (1,5),(2,3) e (4,6)), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase).