

6

Desempenho de Receptores Multiusuário com Detecção e Estimação de Canal por Grupos

6.1

Introdução

No capítulo anterior, curvas ilustrando os ganhos de desempenho ao adotar-se o esquema de detecção ótima por grupos na saída do estágio decorrelador foram obtidas, supondo que o receptor tivesse sempre pleno conhecimento do canal, ou seja, da matriz $\mathbf{A}(i)$. Todavia, em sistemas "reais", não é isso que ocorre. Estimativas dos parâmetros do canal são obtidas a partir de seqüências de treinamento ou através da realimentação das estimativas dos símbolos recebidos.

Por outro lado, a métrica utilizada pelo Algoritmo de Viterbi pressupõe o conhecimento das amplitudes complexas do canal ao longo do tempo discreto. Sempre que a presença de parâmetros desconhecidos do canal, como a sua amplitude complexa por exemplo, impede a realização exata do Algoritmo de Viterbi, ou seja, o cálculo exato das métricas de ramo, um processamento conhecido como Processamento por Percurso Sobrevivente [8] oferece um meio eficaz para a sua realização aproximada.

Neste processamento, estimativas dos parâmetros são obtidas utilizando-se a seqüência de dados associada ao percurso sobrevivente que leva a cada nó da treliça, de modo que, em um dado instante, cada nó trabalha com estimativas distintas. Isso implica que, caso um dado sobrevivente esteja correto, as estimativas a ele associadas terão sido obtidas utilizando a seqüência de dados correta.

Todavia, ainda é preciso especificar o modo como essas estimativas locais (uma para cada nó) são obtidas através da seqüência de dados associada a um dado percurso sobrevivente. Neste trabalho adota-se o esquema de identificação de canal baseado no popular LMS (Least Mean Squares) [16]. O LMS pertence à família de algoritmos de gradiente estocástico. Sua marca registrada é a simplicidade de implementação.

Assim como outros algoritmos de adaptação, o LMS atualiza suas estimativas através do processamento do sinal recebido.

Uma vez, que, em geral, sinais dos diferentes usuários na saída do estágio decorrelator não são decorrelatados, surge então a seguinte pergunta: Seria possível tirar proveito desta dependência estatística uma vez mais, com vistas à obter estimativas de canal mais confiáveis, através da adoção do esquema de detecção por grupos e da aplicação do Processamento por Percorso Sobrevivente (ou PSP) na supertreliça equivalente do grupo?

6.2

Estimação Conjunta por Grupos

Supõe-se, sem perda de generalidade, que o agrupamento formado é composto por grupos de 2 usuários.

Seja $\mathbf{a}_u(i)$ o vetor contendo as amplitudes complexas dos sinais dos dois usuários que compõem o grupo u -ésimo, tal que:

$$\begin{aligned}\mathbf{a}_u(i) &= \begin{pmatrix} A_{u_1}[i] \\ A_{u_2}[i] \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \alpha_{u_1}[i]\sqrt{E_{u_1}} \\ \alpha_{u_2}[i]\sqrt{E_{u_2}} \end{pmatrix},\end{aligned}\quad (6-1)$$

e a matriz $\mathbf{B}(i)$, suposta conhecida (seqüência de treinamento) ou estimada (*data-aided*), e contendo os símbolos transmitidos pelos usuários que formam o grupo, no i -ésimo intervalo de sinalização, tal que:

$$\mathbf{B}_u(i) = \begin{pmatrix} b_{u_1}[i] & 0 \\ 0 & b_{u_2}[i] \end{pmatrix}. \quad (6-2)$$

O problema de estimação conjunta das amplitudes complexas dos dois usuários que compõem o u -ésimo grupo é equivalente ao problema de estimação de vetores complexos. Assim, a expressão geral para o vetor estimativa das amplitudes complexas dos usuários que constam do grupo formado, no $(i + 1)$ -ésimo intervalo de sinalização, $\hat{\mathbf{a}}_u(i + 1)$, é dada por:

$$\hat{\mathbf{a}}_u(i + 1) = \hat{\mathbf{a}}_u(i) - \frac{1}{2}\mu\hat{\nabla}_{\mathbf{a}_u}\|\mathbf{e}(i)\|^2 \quad (6-3)$$

Seja o sinal desejado branqueado, na saída do estágio de agrupamento, $\mathbf{z}_{w_u}^{(d)}$ escrito como segue:

$$\begin{aligned}\mathbf{z}_{w_u}^{(d)} &= \mathbf{K}_{\hat{\mathbf{B}}_{d_u}}^{-1/2} \mathbf{A}_u(i) \mathbf{b}_u(i) \\ &= \mathbf{K}_{\hat{\mathbf{B}}_{d_u}}^{-1/2} \mathbf{B}_u(i) \mathbf{a}_u(i)\end{aligned}$$

Então, o erro quadrático $\|e(i)\|^2$ da Equação (6-3) fica:

$$\|e(i)\|^2 = \|\mathbf{z}_{w_u}(i) - \mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_{d_u}}^{-1/2} \mathbf{B}_u(i) \hat{\mathbf{a}}_u(i)\|^2 \quad (6-4)$$

Levando (6-4) em (6-3) e aplicando a definição de derivada com relação a um vetor complexo [16] chega-se à expressão final para a estimativa conjunta das amplitudes complexas dos sinais dos usuários que compõem o u -ésimo grupo:

$$\hat{\mathbf{a}}_u(i+1) = \hat{\mathbf{a}}_u(i) + \mu [\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_{d_u}}^{-1/2} \mathbf{B}_u(i)]^H \left\{ \mathbf{z}_{w_u}(i) - [\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_{d_u}}^{-1/2} \mathbf{B}_u(i)] \hat{\mathbf{a}}_u(i) \right\}, \quad (6-5)$$

onde μ é, no caso mais geral, um parâmetro matricial, e $\mathbf{z}_{w_u}(i) = \mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_{d_u}}^{-1/2} \mathbf{z}_u(i)$, ou seja, $\mathbf{z}_{w_u}(i)$ é um vetor branqueado. Nota-se que ao introduzir a matriz de branqueamento, acopla-se as duas componentes do vetor $\hat{\mathbf{a}}_u(i+1)$. Supõe-se a partir de agora que o parâmetro μ é uma matriz proporcional à matriz identidade (ou seja, $\mu = \mu \mathbf{I}$), para o caso de estimação conjunta (por grupos), ou de forma equivalente, supõe-se que μ é um parâmetro escalar, contemplando o caso de estimação simples (estimação de escalares).

A expressão para o LMS simples é dada por:

$$\hat{A}_k[i+1] = \hat{A}_k[i] + \mu_k b_k^*[i] \left\{ z_k[i] - b_k[i] \hat{A}_k[i] \right\}, \quad (6-6)$$

6.3

Resultados de Simulações

O sistema considerado nesta seção é o mesmo sistema de 6 usuários abordado no Capítulo 5. Da mesma forma, a matriz $\mathbf{R}$ de correlação do sistema e sua inversa $\mathbf{H}$ são dadas respectivamente pelas equações (5-1) e (5-2). Supõe-se também o uso do mesmo codificador convolutacional (2,1,2) e o mesmo esquema de detecção por grupos de 2 usuários, com *soft-decision* na decodificação. Finalmente, o mesmo agrupamento também é considerado, ou seja, o agrupamento formado pelos grupos (1,5), (2,3) e (4,6). Convém observar que os usuários 1,2,3 e 5, bem como 4 e 6, são estatisticamente equivalentes. Portanto, para aferir os resultados pode-se considerar somente os usuários 1 e 4.

O canal de interesse agora é um canal com desvanecimento Rayleigh, cujas amostras, para um mesmo usuário, estão correlatadas no tempo discreto e têm potência média unitária. As amplitudes complexas do sinal de um mesmo usuário são modeladas por uma sequência de variáveis aleatórias gaussianas complexas, obtida a partir da filtragem de ruído complexo gaussiano branco por um filtro com função de transferência aproximada $\beta / \sqrt{1 - (f/f_d)^2}$, onde β é

uma constante de normalização, $f_d = v/\lambda_{fc}$ é o máximo deslocamento Doppler, λ_{fc} é o comprimento de onda da frequência da portadora e v é a velocidade do móvel [15]. A frequência da portadora foi escolhida como 1900MHz. Três cenários são contemplados, a saber: canais como caracterizados acima, com razões frequência Doppler normalizada (produto $f_d T$) valendo respectivamente 0.001, 0.010 e 0.015.

6.3.1

Dimensionando o parâmetro do LMS

O parâmetro μ para cada usuário no estágio decorrelator, e para cada grupo no estágio de detecção por grupos é então dimensionado. O critério para dimensionamento é forçar, para todos os usuários e grupos, um mesmo valor de erro médio quadrático em regime permanente. A relação E_B/N_0 escolhida para efetuar o dimensionamento é de 6dB. Para o dimensionamento, é utilizada uma seqüência de treinamento de 1000 símbolos. Os experimentos são repetidos 500 vezes. As figuras 6.1 e 6.2 ilustram o desempenho do LMS simples, equivalente ao que seria utilizado no estágio decorrelator, em termos do erro médio quadrático, para os usuários 1 e 4 respectivamente, para $f_d T = 0.001$. As figuras 6.3 e 6.4 apresentam o desempenho do LMS conjunto, equivalente ao que seria utilizado no estágio de detecção por grupos, em termos do erro médio quadrático, para os usuários 1 (grupo (1,5)) e 4 (grupo (4,6)) respectivamente, para $f_d T = 0.001$.

Os parâmetros μ escolhidos de forma a se obter um erro médio quadrático em regime permanente é da ordem de 0.05. Assim, para estimação simples, atribui-se aos parâmetros dos usuários 1, 2, 3 e 5 o valor 0.06. Já para os usuários 4 e 6, o parâmetro para estimação simples vale 0.12. Em termos de estimação conjunta, atribui-se aos parâmetros dos grupos (1,3) e (2,5) o valor 0.35. Já o parâmetro do LMS para estimação conjunta dos usuários do grupo (4,6) é 0.36. A escolha deste valor não é empírica. De fato, e lembrando que os usuários 4 e 6 são descorrelatados, é possível mostrar que, para usuários descorrelatados, a expressão do LMS conjunto fica reduzida a duas expressões de LMS simples (estimação de escalares), com parâmetro escalar μ equivalente. A Equação (6-5) pode ser reescrita como segue:

$$\hat{\mathbf{a}}_u(i+1) = \hat{\mathbf{a}}_u(i) + \mu \mathbf{B}_u^H(i) \mathbf{K}_{\hat{\mathbf{n}}_{du}}^{-1} \left\{ \mathbf{z}_u(i) - \mathbf{B}_u(i) \hat{\mathbf{a}}_u(i) \right\}. \quad (6-7)$$

Comparando agora (6-7) com a expressão para estimação simples, Equação (6-6), e observando que para sinais descorrelatados a matriz $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{n}}_{du}}^{-1}$ é diagonal, chega-

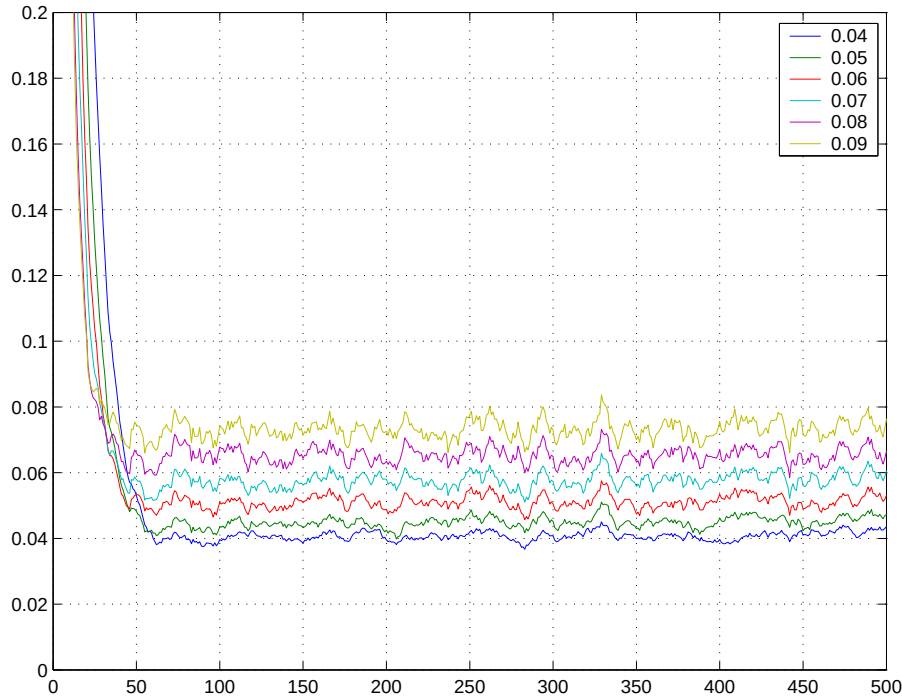


Figura 6.1: Erro médio quadrático para estimativa da amplitude complexa do canal versus número de símbolos da sequência de treinamento, usuário 1, LMS simples. $f_dT = 0.001$

se à conclusão que o parâmetro de estimação conjunta é igual ao parâmetro de estimação simples multiplicado pela covariância do ruído na saída do estágio decorrelator (matriz $\mathbf{H}$). Assim, observando-se essa relação entre os parâmetros, obtém-se curvas de erro médio quadrático para o LMS simples que são iguais às do LMS conjunto, para o usuário 4 (vide figuras 6.2 e 6.4).

Das figuras apresentadas, nota-se que em geral, para um mesmo erro médio quadrático em regime permanente, estimativas obtidas conjuntamente tendem a convergir mais rápido do que as estimativas obtidas individualmente (LMS simples). Comparando-se as figuras 6.1 e 6.3, observa-se que a estimação por grupos consegue mesmo valor de erro médio quadrático com convergência mais rápida, ou com mesma velocidade de convergência consegue-se menor erro médio quadrático em estado estacionário. Assim, por exemplo, na Figura 6.1, para um erro médio quadrático de 0.04, a convergência requer mais de 50 símbolos, enquanto que na Figura 6.3 tem-se convergência com aproximadamente 25 símbolos.

O mesmo procedimento para o dimensionamento dos parâmetros é repetido para os demais valores de f_dT , com valores diferentes de erro médio quadrático em estado estacionário. Recapitulando, para $f_dT = 0.001$, e um erro médio quadrático de 0.05, ao parâmetro de estimação simples dos usuários 1, 2, 3 e

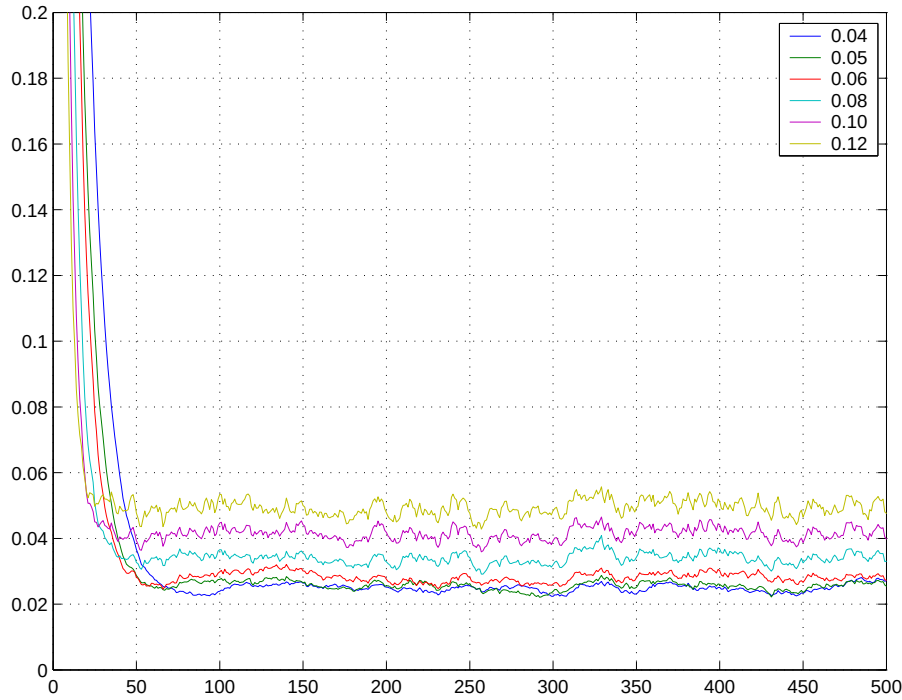


Figura 6.2: Erro médio quadrático para estimativa da amplitude complexa do canal versus número de símbolos da sequência de treinamento, usuário 4, LMS simples. $f_dT = 0.001$

5 foi atribuído o valor 0.06. O parâmetro dos grupos (1,5) e (2,3) vale 0.35. Já para os usuários 4 e 6, o parâmetro de estimação simples vale 0.12 e o de estimação conjunta 0.36. Para os outros valores de f_dT não é possível atingir erros em estado estacionário tão baixos.

Para $f_dT = 0.010$, os parâmetros foram dimensionados para um erro médio quadrático em estado estacionário valendo 0.15. Ao parâmetro de estimação simples dos usuários 1, 2, 3 e 5 foi atribuído o valor 0.1. O parâmetro dos grupos (1,5) e (2,3) vale 0.22. Já para os usuários 4 e 6, o parâmetro de estimação simples vale 0.3 e o de estimação conjunta 0.9.

Finalmente, para $f_dT = 0.015$, os parâmetros foram dimensionados para um erro médio quadrático em estado estacionário valendo 0.18. O parâmetro de estimação simples dos usuários 1, 2, 3 e 5 vale 0.12. O parâmetro dos grupos (1,5) e (2,3) vale 0.22. Já para os usuários 4 e 6, o parâmetro de estimação simples vale 0.35 e o de estimação conjunta 1.05.

6.3.2 Desempenho com implementação PSP

Uma vez os parâmetros dos diversos LMS dimensionados, estes são incorporados ao Processamento por Percurso Sobrevivente, nos receptores dos está-

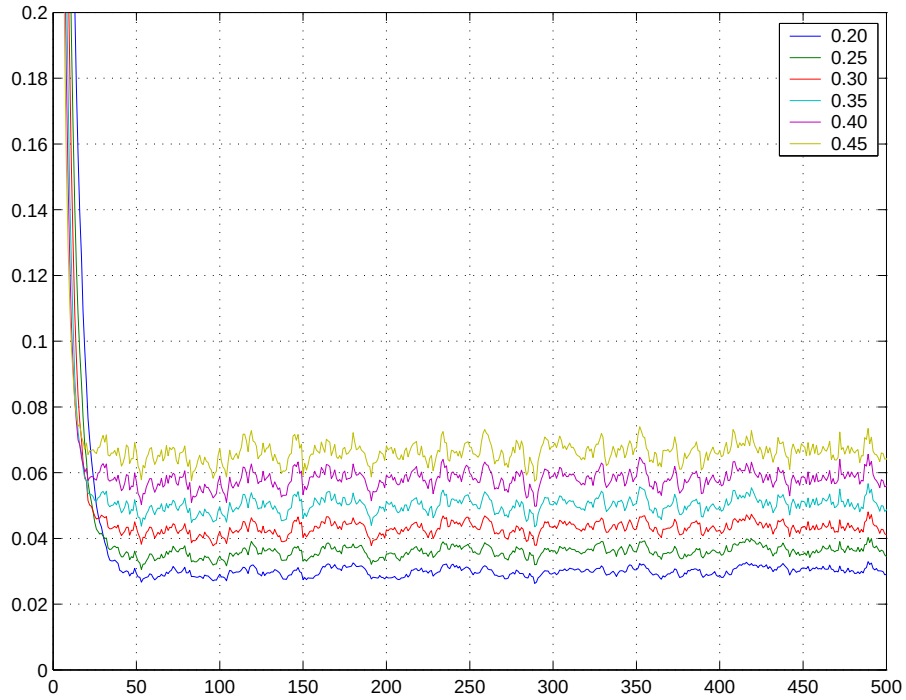


Figura 6.3: Erro médio quadrático para estimativa da amplitude complexa do canal versus número de símbolos da sequência de treinamento, usuário 1, LMS conjunto. $f_d T = 0.001$

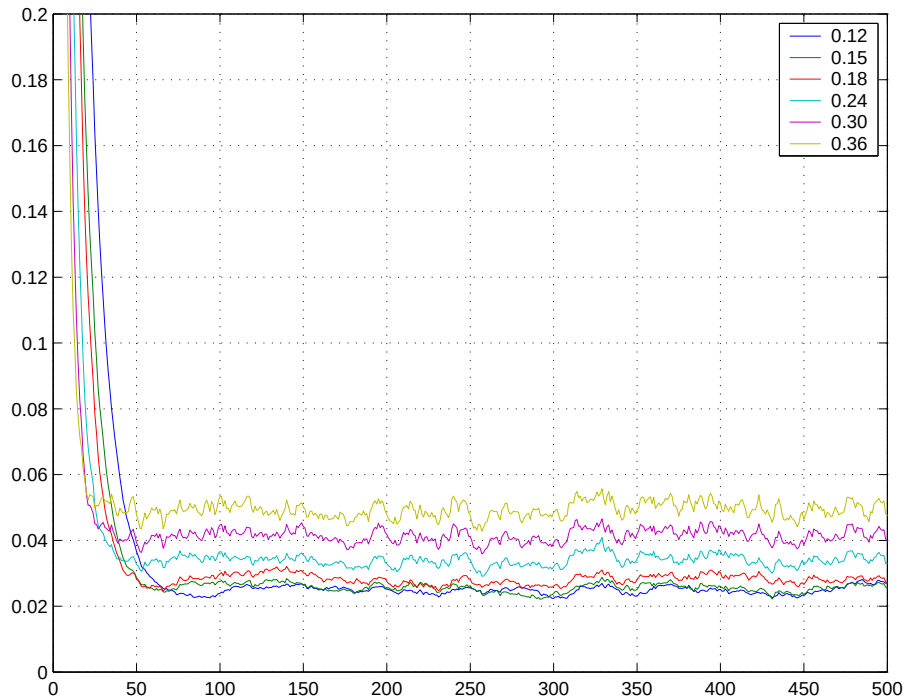


Figura 6.4: Erro médio quadrático para estimativa da amplitude complexa do canal versus número de símbolos da sequência de treinamento, usuário 4, LMS conjunto. $f_d T = 0.001$

gios decorrelator e de detecção por grupos, para os três canais considerados.

O desempenho do sistema é medido em termos da TEB média tirada ao longo de 500 experimentos independentes. Seqüências independentes e aleatórias de 1000 bits de informação são geradas para cada usuário.

As figuras 6.5, 6.7 e 6.9 ilustram o desempenho dos usuários 1 e 5, tanto na saída do estágio decorrelator quanto na saída do estágio de detecção por grupos. Resultados obtidos com o auxílio de um gênio são confrontados aos obtidos através do uso conjunto do PSP e das estimativas de canal (tanto simples, na saída do estágio decorrelator, quanto conjunta, na saída do estágio de detecção por grupos). Observa-se das figura que o emprego da detecção por grupos continua fornecendo ganhos da ordem de 2 a 3dB. Todavia, com a introdução de um esquema de estimação do canal, o desempenho do sistema apresenta perdas da ordem de 4dB, com relação ao sistema operando com gênio (pleno conhecimento do canal).

As figuras 6.6, 6.8 e 6.10 apresentam o desempenho dos usuários 4 e 6. Como era esperado, não existe ganho de desempenho ao se agrupar os dois usuários, pois estes são decorrelatados. Por outro lado, verifica-se a partir das figuras a equivalência entre os parâmetros μ para estimativas conjuntas e separadas.

Uma vez que o sistema apresentou queda de desempenho quando da introdução dos estimadores de canal, faz-se necessário verificar até que ponto o esquema de estimação conjunta apresenta vantagens sobre o esquema de estimação simples. O desempenho dos estimadores simples e conjuntos, para cada usuário, é medido em termos de erro médio quadrático e pode ser observado nas figuras 6.11, 6.12 e 6.13, para uma relação $E_B/N_0 = 2\text{dB}$ e nas figuras 6.14, 6.15 e 6.16, para uma relação $E_B/N_0 = 8\text{dB}$. Observa-se que as estimativas obtidas conjuntamente são sempre superiores às estimativas obtidas de forma separada, exceto para os casos em que os usuários são decorrelatados, casos estes em que as estimativas são equivalentes. Ou seja, é possível tirar proveito da correlação entre os sinais para obter estimativas mais confiáveis.

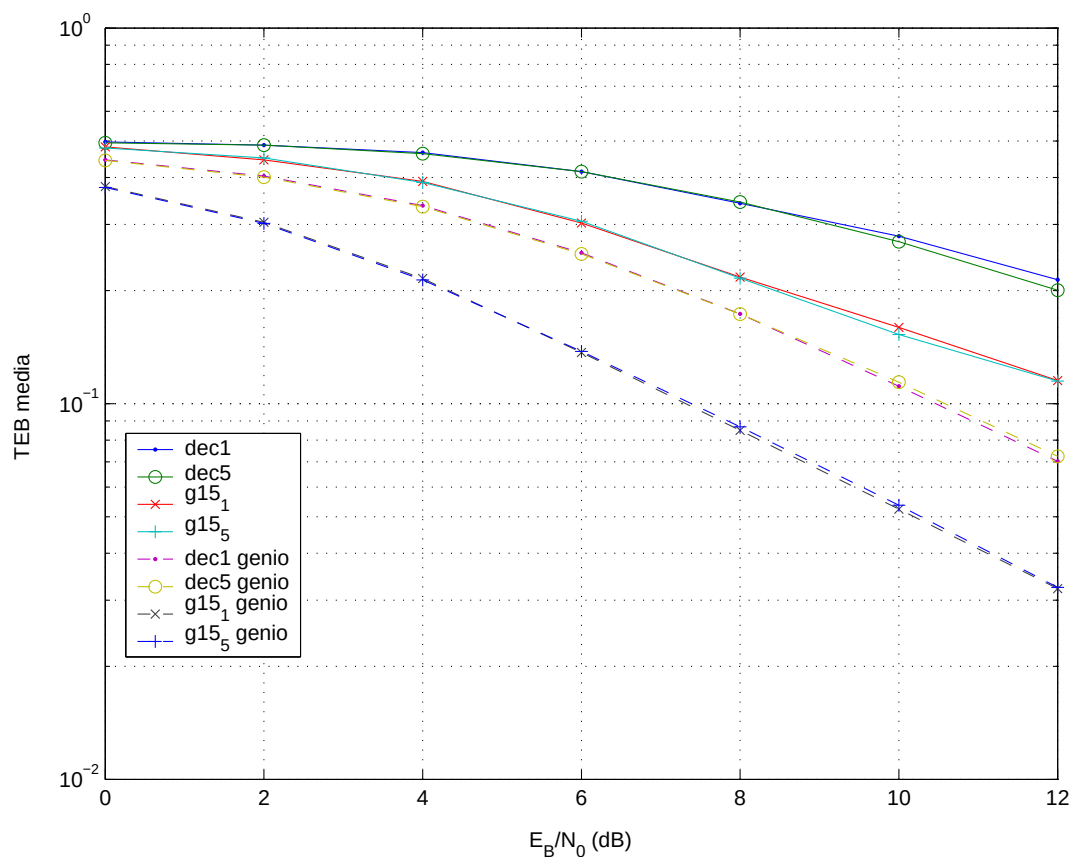


Figura 6.5: Desempenho médio na saída dos estágios decorrelator e detecção ótima por grupos, grupo (1,5), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase), gênio e PSP, $f_d T = 0.001$.

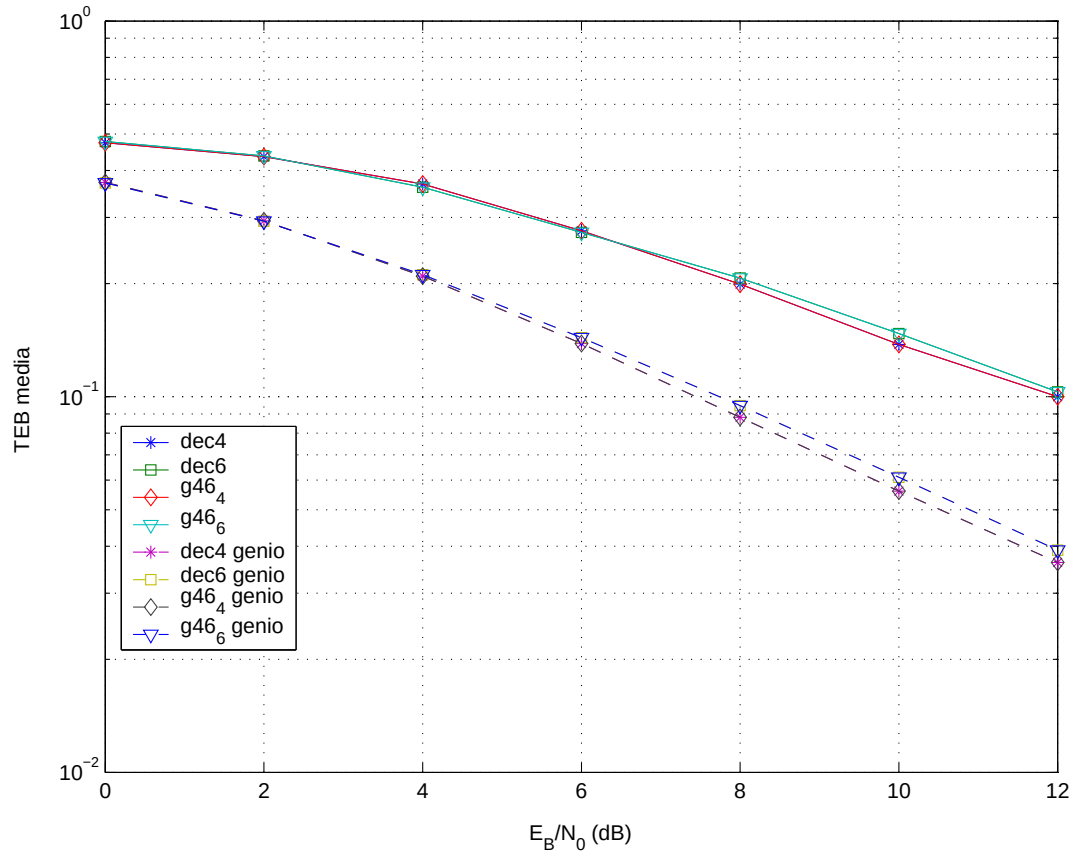


Figura 6.6: Desempenho médio na saída dos estágios decorrelator e detecção ótima por grupos, grupo (4,6), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase), gênio e PSP, $f_d T = 0.001$.

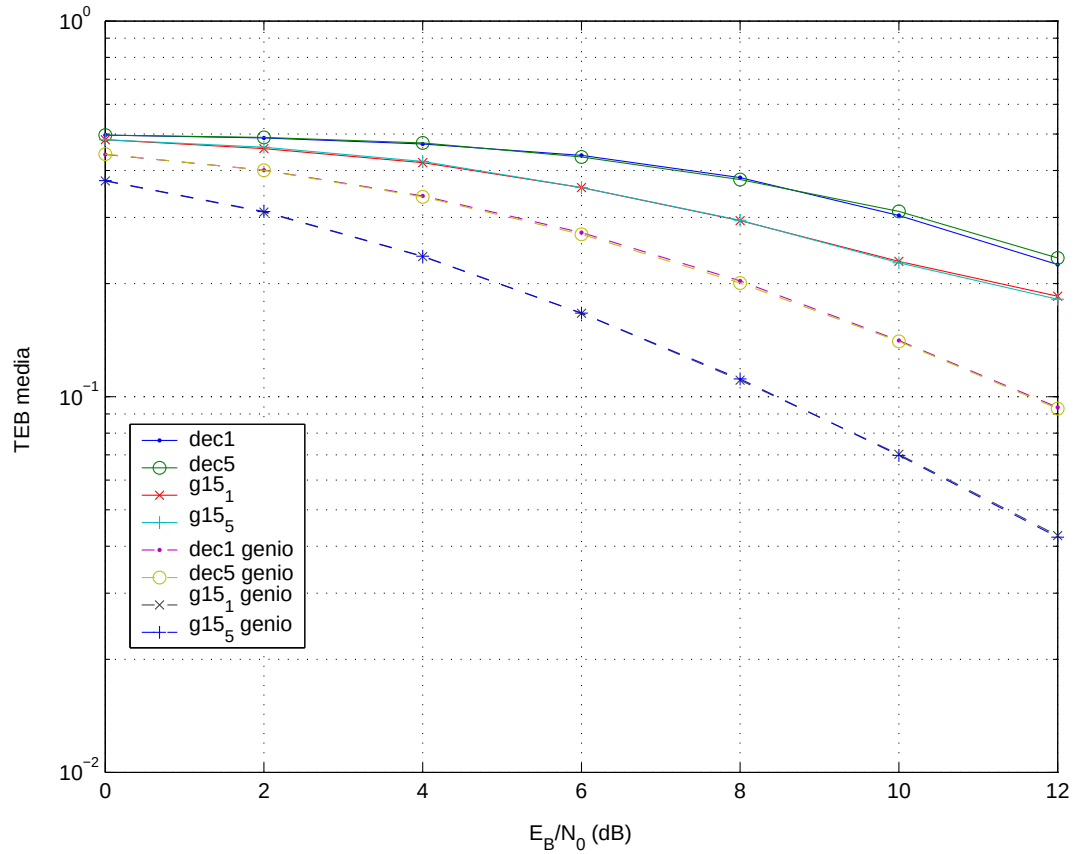


Figura 6.7: Desempenho médio na saída dos estágios decorrelator e detecção ótima por grupos, grupo (1,5), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase), gênio e PSP, $f_d T = 0.010$.

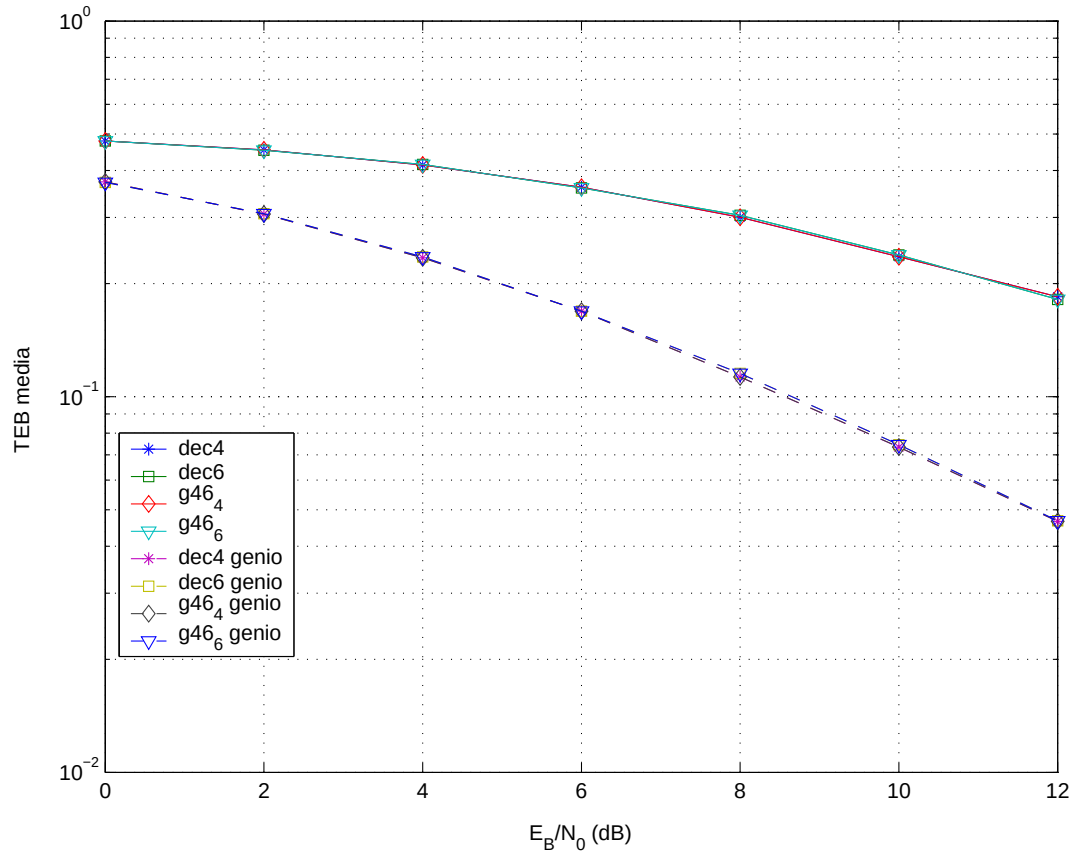


Figura 6.8: Desempenho médio na saída dos estágios decorrelator e detecção ótima por grupos, grupo (4,6), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase), gênio e PSP, $f_d T = 0.010$.

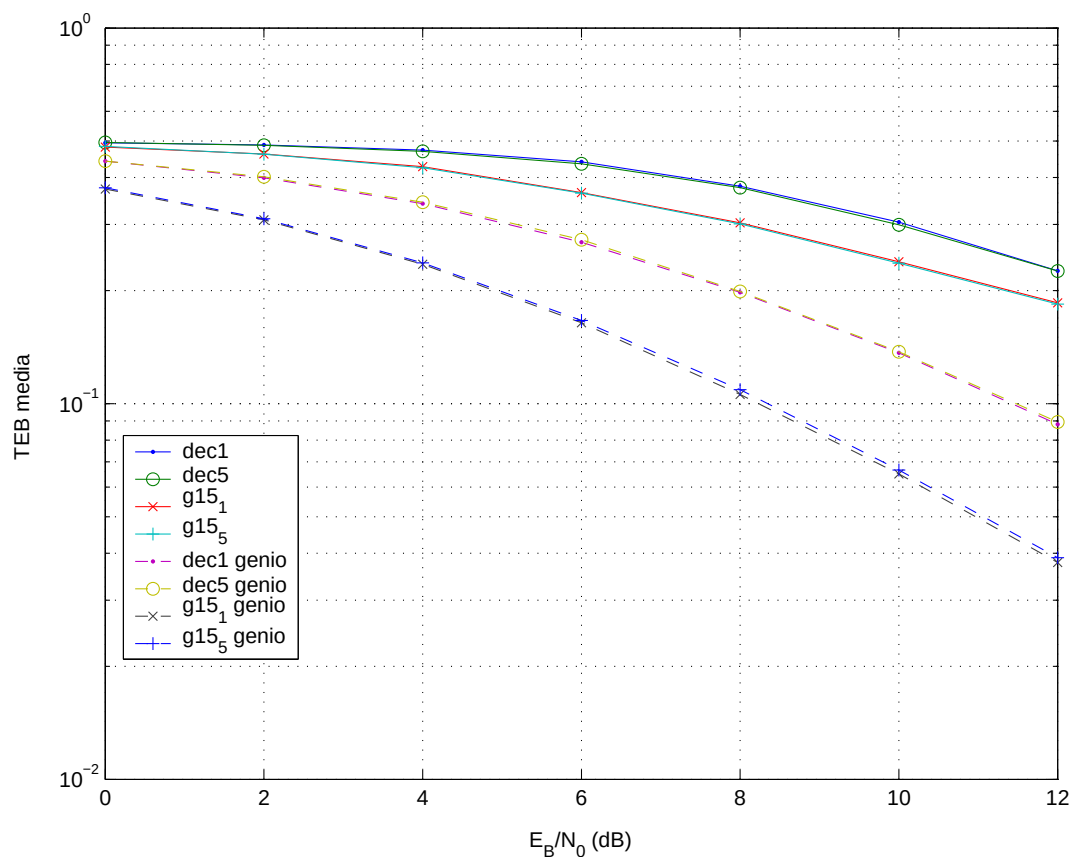


Figura 6.9: Desempenho médio na saída dos estágios decorrelator e detecção ótima por grupos, grupo (1,5), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase), gênio e PSP, $f_d T = 0.015$.

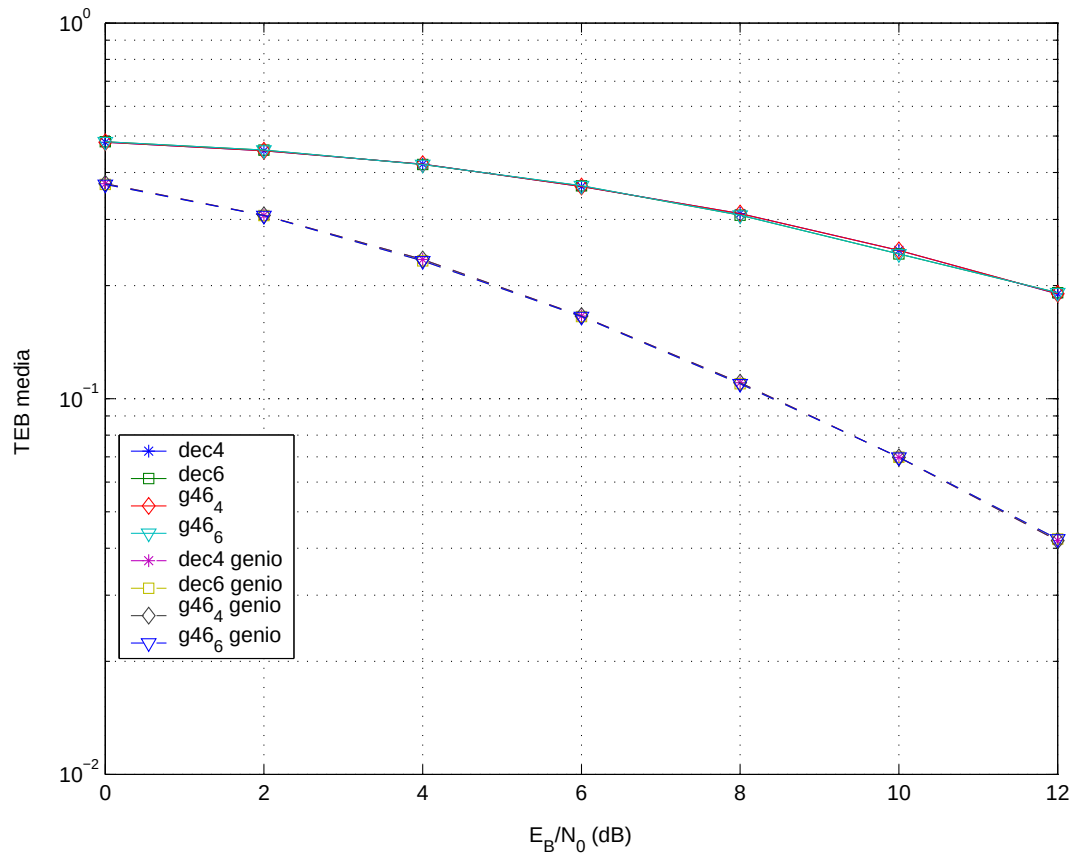


Figura 6.10: Desempenho médio na saída dos estágios decorrelator e detecção ótima por grupos, grupo (4,6), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolutacional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase), gênio e PSP, $f_d T = 0.015$.

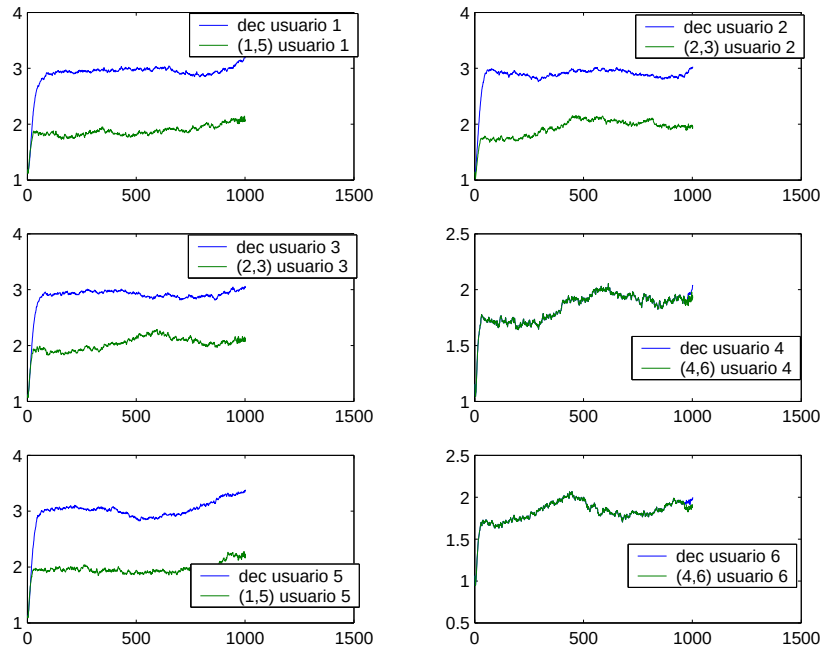


Figura 6.11: Erro médio quadrático das estimações simples e conjunta versus número de símbolos recebidos, para os 6 usuários. $E_B/N_0 = 2dB$, $f_dT = 0.001$.

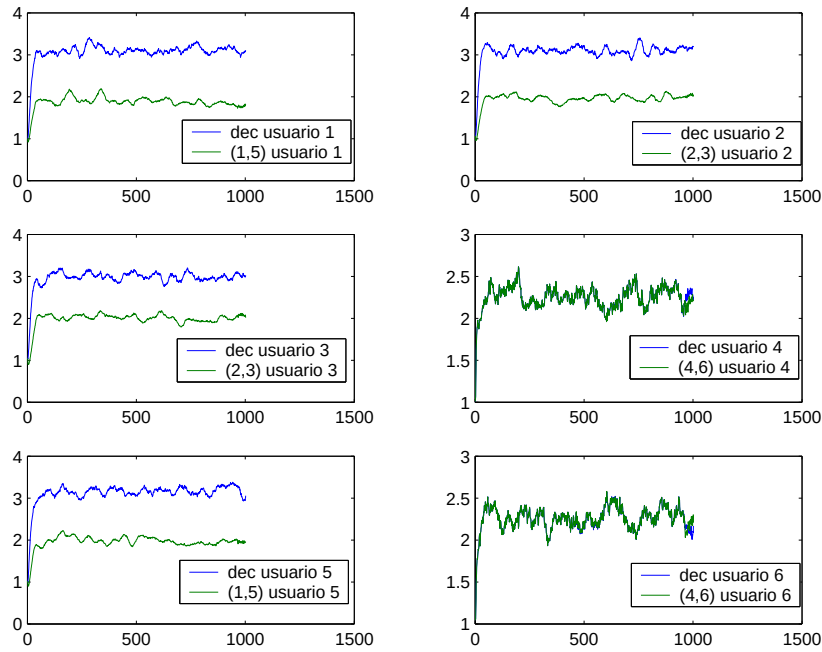


Figura 6.12: Erro médio quadrático das estimações simples e conjunta versus número de símbolos recebidos, para os 6 usuários. $E_B/N_0 = 2dB$, $f_dT = 0.010$.

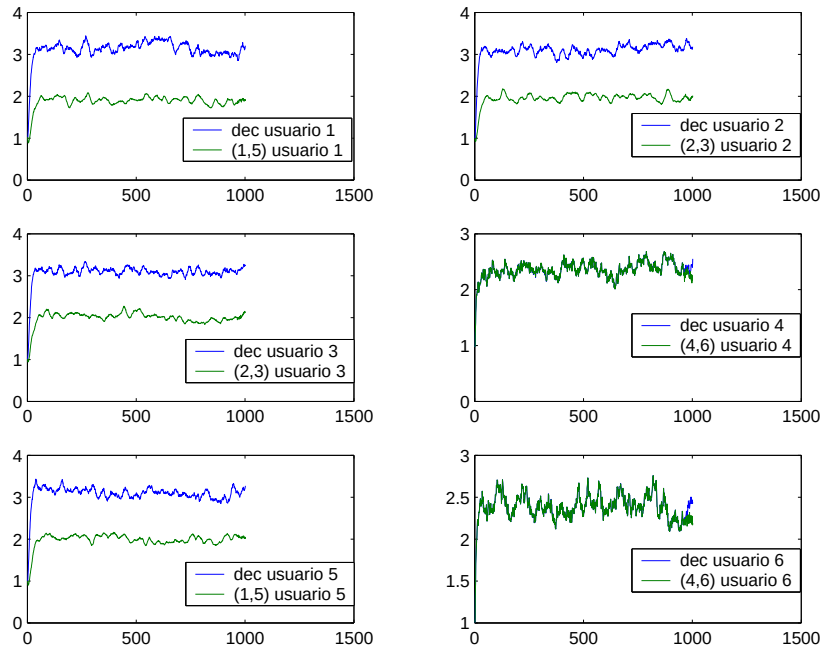


Figura 6.13: Erro médio quadrático das estimações simples e conjunta versus número de símbolos recebidos, para os 6 usuários. $E_B/N_0 = 2dB$, $f_dT = 0.015$.

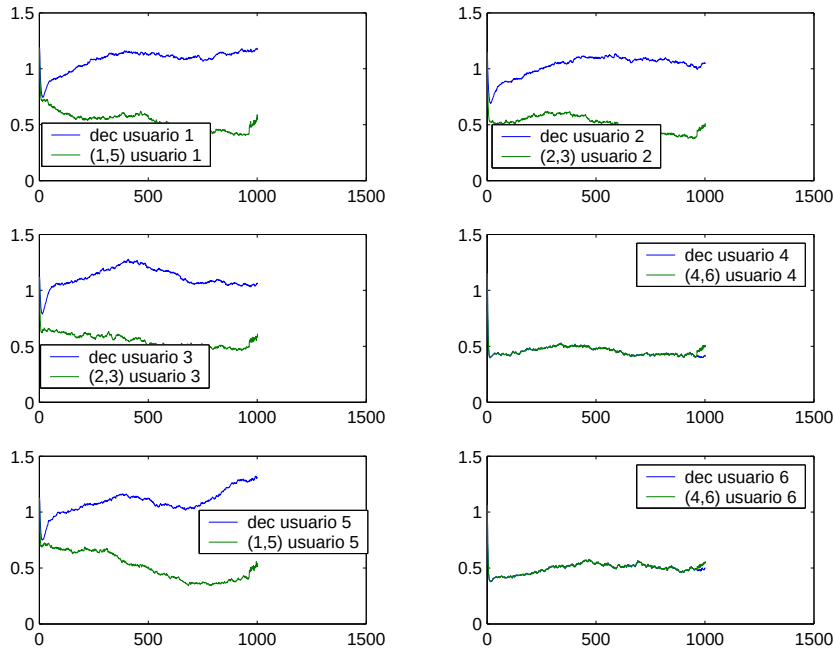


Figura 6.14: Erro médio quadrático das estimações simples e conjunta versus número de símbolos recebidos, para os 6 usuários. $E_B/N_0 = 8dB$, $f_dT = 0.001$.

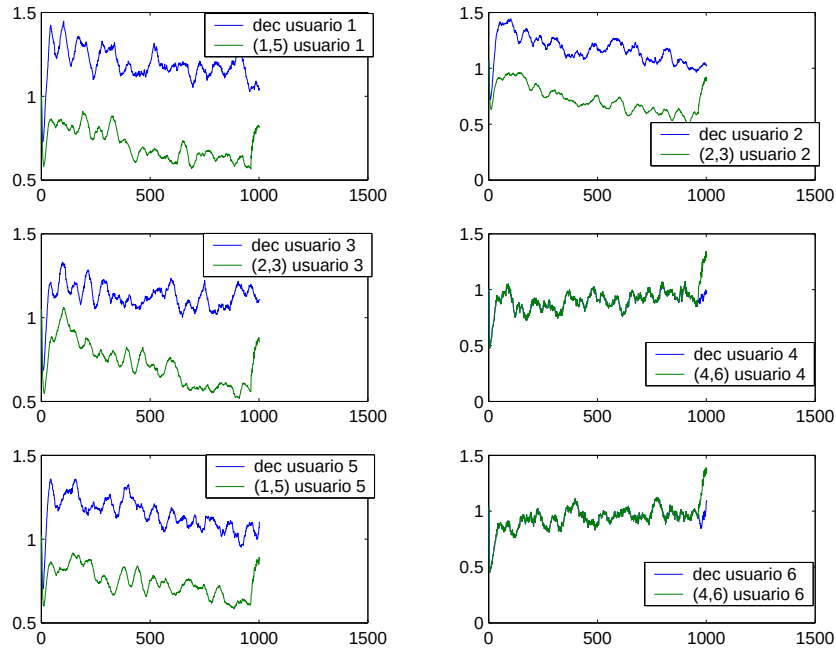


Figura 6.15: Erro médio quadrático das estimações simples e conjunta versus número de símbolos recebidos, para os 6 usuários. $E_B/N_0 = 8dB$, $f_dT = 0.010$.

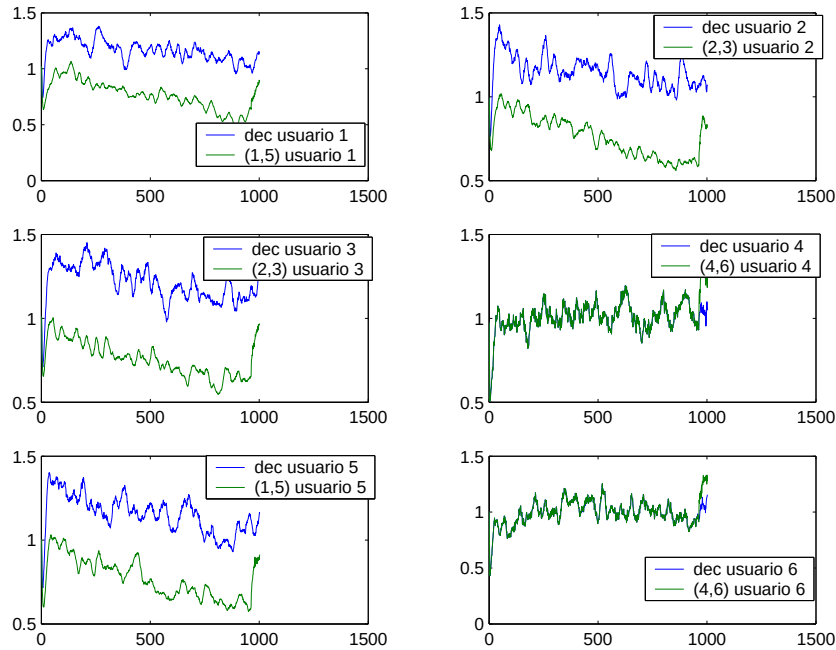


Figura 6.16: Erro médio quadrático das estimações simples e conjunta versus número de símbolos recebidos, para os 6 usuários. $E_B/N_0 = 8dB$, $f_dT = 0.015$.