

## DESEMPENHO DE RECEPTORES PSP-FK-2 COM DESAJUSTE NA MODELAGEM DO CANAL

JURACI F. GALDINO<sup>1</sup>, ERNESTO L. PINTO

Departamento de Engenharia Elétrica – IME  
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha  
22290-270 – Rio de Janeiro - RJ

### RESUMO

Investiga-se através de simulação computacional a robustez do desempenho de receptores adaptativos com critério de decisão de máxima verossimilhança, empregando o princípio do processamento do percurso sobrevivente e filtragem de Kalman com modelagem AR(2) do canal, aqui denominados receptores PSP-FK-2. Em [3 a 5] verificou-se que estes receptores produzem excelente desempenho em canais com desvanecimento rápido e seletivo em frequência. A avaliação de desempenho aqui desenvolvida contempla diversos desajustes na modelagem dos espalhamentos em frequência e de atrasos que não foram considerados em [3 a 5], além do treinamento do equalizador, que naqueles trabalhos se admitiu ideal. O desempenho é avaliado através da taxa de erro de símbolos (SER, de “symbol error rate”) e do erro médio quadrático (EMQ) na estimação do canal. Os resultados obtidos mostram que o receptor em estudo é robusto a todos os desajustes considerados.

### 1. INTRODUÇÃO

Os receptores MLSE/PSP (de “maximum likelihood sequence estimation – per survivor processing”) têm sido considerados recentemente, por pesquisadores de diversos países, visando a sua utilização em sistemas de comunicações digitais nos quais o efeito de desvanecimento rápido e seletivo em frequência (DRSF) é uma importante causa de degradação de desempenho [1,2]. Este é o caso de sistemas de telefonia móvel digital com tecnologia de acesso TDMA. Trata-se de um tema de pesquisa atual e muitas questões a ele relacionadas encontram-se em aberto [2].

Esses esquemas foram investigados em [3 a 5], principalmente no que se refere ao algoritmo usado para seleção das seqüências sobreviventes e ao algoritmo de filtragem adaptativa. Considerando canais com DRSF modelados como WSS-US (“wide-sense stationary – uncorrelated scattering”) mostrou-se através de simulação em computador que escolhas alternativas destes algoritmos produzem melhorias significativas no desempenho destes receptores, em relação a esquemas MLSE/PSP publicados na literatura internacional nos últimos anos. As principais inovações propostas em [3 a 5] foram o uso do algoritmo M para escolha de seqüências e de filtros de Kalman, com modelo AR(2) para o canal em tempo discreto, que caracterizam os receptores PSP-FK-2.

Em se tratando de investigações iniciais de desempenho, admitiu-se em [3 a 5] que diversos parâmetros relativos ao modelo de canal eram conhecidos (idealmente estimados) pelo receptor, além de se admitir que durante o período de treinamento o receptor conseguia estimar perfeitamente a resposta impulsional do canal (RIC).

O desempenho dos receptores PSP-FK-2 é avaliado no presente trabalho considerando a ocorrência de desajustes relativos ao perfil de espalhamento de atrasos e ao espalhamento Doppler (desvio Doppler máximo), além de se considerar não ideal o treinamento.

O restante do trabalho é organizado como segue. Na seção 2 é apresentado o modelo do sistema simulado, na seção 3 são apresentados os resultados das simulações e, por fim, na seção 4 são sumarizadas as principais conclusões do trabalho.

### 2. MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O modelo equivalente em banda básica do sistema simulado é mostrado na Figura 1, onde a seqüência  $\{I_n\}$  representa a informação transmitida,  $\eta(t)$  representa o ruído, modelado por um processo Gaussiano complexo branco de média nula,  $z(t)$  é o sinal em banda básica na entrada do receptor,  $\{r_n\}$  é a seqüência amostrada na taxa de símbolos  $(1/T)$  e, finalmente,  $\{\hat{I}_n\}$  representa a estimativa de  $\{I_n\}$ .

Considera-se um modulador QPSK com taxa de símbolos igual a 24,3 Kbaud. Os filtros do transmissor e do receptor são casados, com resposta impulsional conjunta do tipo coseno levantado. Supõe-se um perfeito sincronismo entre o receptor e transmissor, de modo que a interferência entre símbolos deve-se unicamente à ação dispersiva do canal. A variância do ruído é ajustada de acordo com a razão sinal ruído, que é expressa pela razão entre a energia recebida por símbolo ( $E_s$ ) e a densidade espectral de potência do ruído ( $N_0$ ).

Admite-se que os símbolos são transmitidos em blocos de comprimento 500, separados por intervalos de treinamento com duração de 10 intervalos de símbolo.

O canal é modelado como WSS-US (“Wide Sense Stationary - Uncorrelated Scattering”), com perfil de atrasos discreto, composto de 3 raios espaçados de um intervalo de símbolo. O sinal recebido sem ruído é dado por

$$y(t) = \sum_{i=0}^L h_i(t)x(t - iT),$$

onde  $\{h_i(t), i = 0, \dots, L\}$  são denominados raios do canal, modelados como processos complexos Gaussianos estatisticamente independentes, de média nula, variâncias que somam 1 e formatação espectral dada pelo modelo de Jakes para espalhamento Doppler, cuja largura de faixa (unilateral) é igual ao desvio Doppler máximo, aqui denotado por  $f_D$ .

<sup>1</sup> Atualmente em programa de doutorado no DEE-UFPb.

Como se vê na Figura 1, o receptor PSP-FK-2 é composto por um banco de filtros de Kalman associado ao algoritmo M, o qual é responsável pela escolha das seqüências sobreviventes. Os filtros de Kalman interagem com o algoritmo M fornecendo estimativas de canal calculadas com o emprego das seqüências sobreviventes. Na definição das equações de estado utiliza-se a modelagem AR(2) dos coeficientes do canal, otimizada no sentido de minimização do erro de predição do modelo [4]. Note-se aqui que os coeficientes AR(2) dependem do valor do desvio Doppler máximo. A definição completa do modelo associado a cada raio depende ainda do perfil de espalhamento de atrasos (ou perfil de intensidade de multipercursos), que é composto pelas variâncias destes raios.

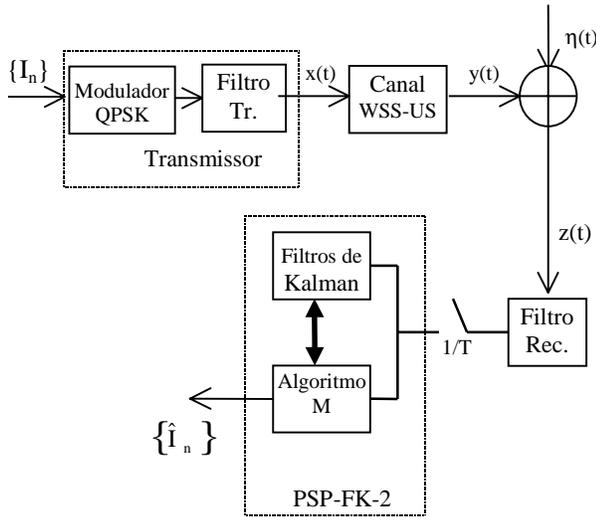


Fig. 1 – Modelo do Sistema de Transmissão.

Um dos objetivos do trabalho é investigar a sensibilidade deste receptor a desajustes entre os parâmetros que ele utiliza e os efetivamente usados na geração de amostras do sinal recebido. O valor de  $f_D$  admitido pelo receptor será representado por  $f_{DA}$ . Emprega-se a notação  $p$  para o perfil do canal (vetor cujas componentes são as variâncias dos coeficientes da RIC) e  $q^j$  para o  $j$ -ésimo perfil admitido pelo receptor nas equações de estado.

### 3. RESULTADOS

Os parâmetros de desempenho aqui adotados são a taxa de erro de símbolo (SER) e o erro médio quadrático (EMQ) na estimação da RIC. Várias simulações foram realizadas, sob condições diversas de desajustes do receptor, variando-se a razão  $E_s/N_0$  e o máximo desvio Doppler.

O número de seqüências sobreviventes mantidas pelo algoritmo M foi fixado em 16. Para obtenção de cada estimativa dos parâmetros de desempenho simulou-se a recepção de 1.500.000 símbolos QPSK, distribuídos em 3000 blocos independentes de 500 símbolos. Admitiu-se um retardo de decisão de 10 intervalos de símbolos (5 vezes maior que a memória do canal). O canal foi simulado pela técnica de Monte Carlo apresentada em [6].

#### 3.1 Desempenho com Desajuste no Desvio Doppler Máximo

Na Figura 2 são mostrados resultados de desempenho de SER em que o valor de  $f_D$  simulado é igual a 50 Hz e  $f_{DA}$  foi variado de 10 a 100 Hz. As duas curvas mostradas nesta figura foram obtidas com razão  $E_s/N_0$  de 20 e 30 dB, e sua comparação mostra a degradação de desempenho advinda da redução de  $E_s/N_0$ . Quanto à variação de  $f_{DA}$ , observa-se que o desempenho se degrada significativamente

quando  $f_{DA}$  é inferior ao do valor simulado (50 Hz), sendo tão pior quanto maior for a diferença  $f_D - f_{DA}$ . Quando o valor de  $f_{DA}$  é maior do que o de  $f_D$ , a variação de desempenho é bem menor.

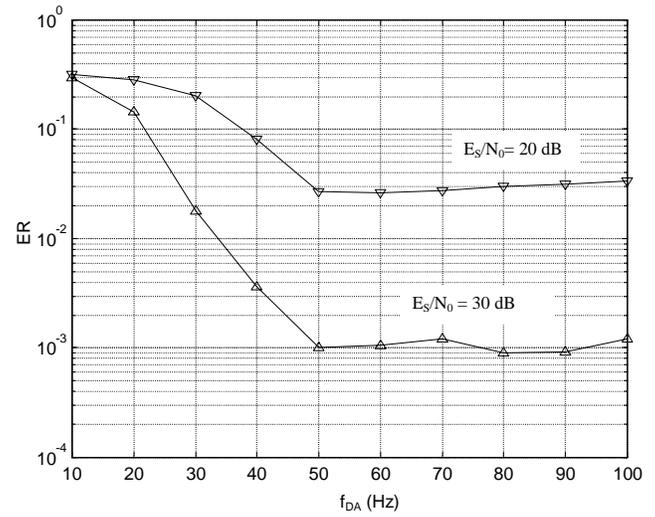


Fig. 2. Degradação da SER diante de Desajuste no Desvio Doppler Máximo:  $f_D = 50$  Hz.

Na Figura 3 são mostrados resultados em que o valor de  $f_D$  simulado é igual a 100 Hz e  $f_{DA}$  foi variado de 50 a 150 Hz. A razão  $E_s/N_0$  foi novamente fixada em 20 e 30 dB, produzindo a variação de desempenho esperada. Quanto ao desajuste no valor de  $f_{DA}$ , observa-se novamente que o desempenho se degrada significativamente quando ele é menor do que  $f_D$  (100 Hz), piorando com a diferença  $f_D - f_{DA}$ . Por outro lado, quando  $f_{DA}$  é maior do que  $f_D$ , o desempenho do receptor sofre pouca alteração.

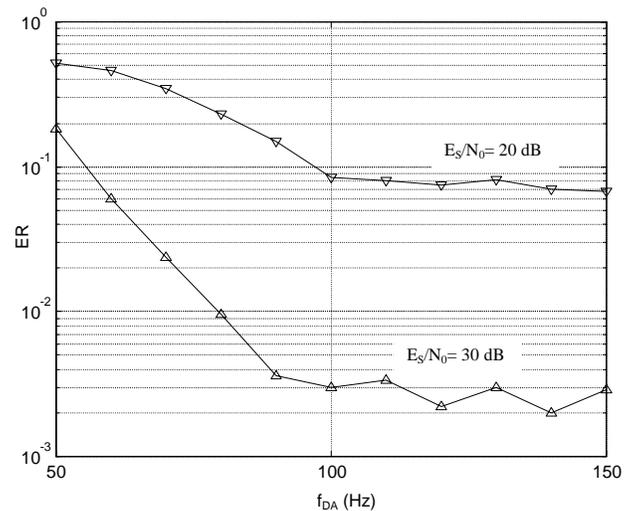


Fig. 3. Degradação da SER diante de Desajuste no Desvio Doppler Máximo:  $f_D = 100$  Hz

Observa-se na Figura 3 o efeito curioso de que, para alguns casos de desajuste de  $f_D$  "para cima", a taxa de erro de símbolo estimada chega a ser inferior à obtida sem desajuste ( $f_{DA} = f_D$ ). Este efeito parece estranho à primeira vista, mas pode ser explicado pelo fato de que os estimadores de canal (filtros de Kalman) usam as seqüências sobreviventes sem levar em conta a modelagem dos erros nelas contidos. Assim, é possível que um valor de  $f_{DA}$

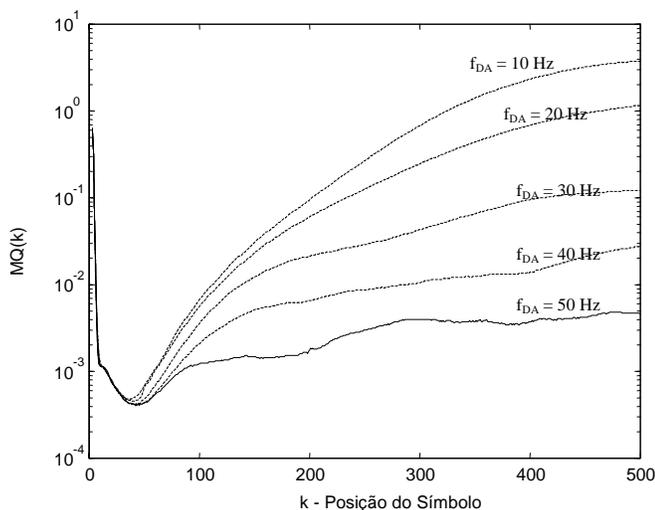
desajustado propicie uma melhor condição para lidar com estes erros não modelados.

A comparação das Figuras 2 e 3 mostra a degradação de desempenho provocada pelo aumento do desvio Doppler máximo na segunda (canal com variações mais rápidas).

Apresenta-se a seguir alguns resultados de avaliação do impacto de desajustes de  $f_{DA}$  sobre o erro médio quadrático na estimação da RIC. Na Figura 4 são mostrados curvas de evolução do EMQ ao longo da duração do bloco de símbolos, parametrizadas pelo valor de  $f_{DA}$ , que foi variado entre 10 e 50 Hz. Estas curvas foram obtidas com  $E_S/N_0 = 30$  dB e  $f_D = 50$  Hz, e mostram que o EMQ cai durante o processamento dos primeiros símbolos e parece convergir para valores mais altos no final do bloco.

A queda inicial de EMQ indica que o receptor consegue melhorar as estimativas do canal, em relação ao final do período de treinamento. Isto evidencia a habilidade do esquema de recepção em lidar com erros significativos nas estimativas iniciais da RIC.

A Figura 4 também mostra de maneira clara que o desajuste no valor de  $f_{DA}$  produz aumentos significativos no EMQ observado no final do bloco, em relação aos valores de EMQ obtidos com  $f_{DA}$  ajustado ( $f_{DA} = 50$  Hz). Vê-se também que este aumento no EMQ é tanto maior quanto maior é a diferença entre  $f_D$  e  $f_{DA}$ .

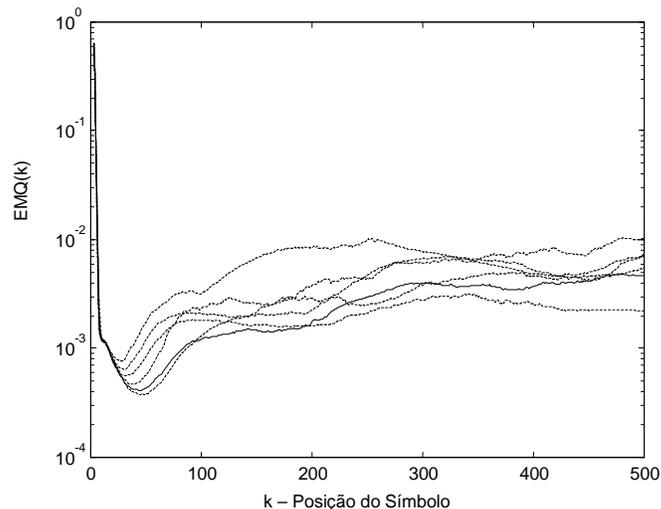


**Fig. 4.** Evolução do EMQ com Variação para Baixo no Valor de  $f_{DA} - f_D = 50$  Hz;  $E_S/N_0 = 30$  dB.

Já na Figura 5 são mostradas curvas de evolução do EMQ ao longo do bloco de símbolos recebidos, obtidas nas mesmas condições de transmissão admitidas na Figura 4 ( $E_S/N_0 = 30$  dB,  $f_D = 50$  Hz), considerando agora desajustes “para cima” no valor de  $f_{DA}$ . A curva cheia na Figura 5 foi obtida com  $f_{DA}$  ajustado e as demais foram obtidas variando este parâmetro de 60 e 100 Hz, com incremento de 10 Hz. De maneira diferente do que se observou quando o valor de  $f_D$  foi desajustado para baixo (Figura 4), vê-se na Figura 5 que o desempenho de EMQ obtido com desajuste de  $f_D$  para cima não é muito diferente do obtido na condição de ajuste. Verifica-se também o efeito curioso de que há curvas de EMQ obtidas com desajuste que chegam a ficar abaixo da obtida com  $f_D$  ajustado. Como já foi observado acima, este tipo de comportamento provavelmente está relacionado com o fato de que os erros de decisão do receptor não são modelados no algoritmo de estimação de canal. Esta conjectura será investigada em trabalhos futuros.

Cabe notar aqui que as curvas das Figuras 4 e 5 estão em perfeita

consonância com a curva inferior da Figura 2, confirmando o fato já observado nesta última, de que o desajuste para baixo no valor de  $f_{DA}$  degrada significativamente o desempenho do receptor, enquanto o desajuste para cima produz pouca degradação.



**Fig. 5.** Evolução do EMQ com Variação para Cima no Valor de  $f_{DA} - f_D = 50$  Hz;  $E_S/N_0 = 30$  dB;  $f_{DA} = 50$  Hz (linha cheia), 60, 70, 80, 90 e 100 Hz (linhas tracejadas).

A diferença entre os efeitos de desajuste do receptor com  $f_{DA} < f_D$  e  $f_{DA} > f_D$  pode estar associada a problemas de precisão numérica na determinação dos coeficientes do modelo AR(2) usado pelos algoritmos de filtragem, que depende da inversão de uma matriz cujo determinante se aproxima de zero com a redução do valor admitido para o desvio Doppler máximo [3, 4]. Este ponto será considerado em maiores detalhes em trabalho futuro.

Também foram levantadas curvas de evolução do EMQ para  $f_D = 100$  Hz, razão  $E_S/N_0$  de 30 dB e diversos valores de  $f_{DA}$ . Foram observadas características semelhantes às mostradas nas Figuras 4 e 5, e bastante coerentes com as características de degradação de desempenho de SER exibida na curva inferior da Figura 3.

### 3.2 Desempenho com Desajuste no Perfil de Espalhamento de Atrasos

Para avaliação do desempenho do receptor PSP-FK-2 diante de desajustes no perfil de espalhamento de atrasos, fixou-se o perfil do canal em  $p = [0.5 \ 0.3 \ 0.2]$  e foram utilizados diferentes exemplos de perfil admitido pelo receptor ( $q^j$ ).

Como medida básica do desajuste entre dois perfis utiliza-se a divergência ou distância relativa de Kullback-Leibler expressa em nats, dada por

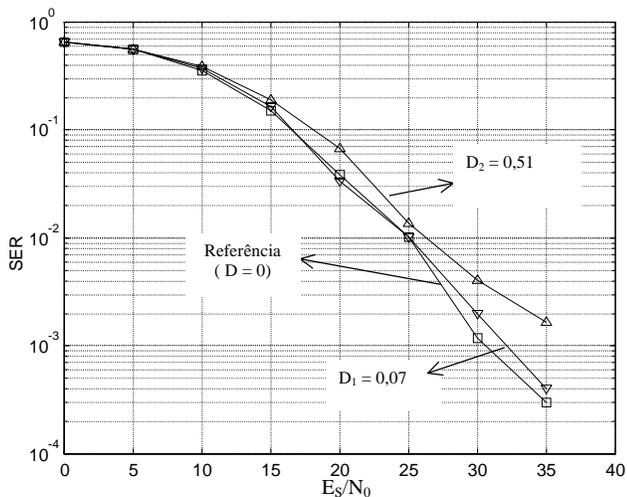
$$D_j = \sum_i p_i \cdot \log \frac{p_i}{q_i^j}$$

onde  $\log(\cdot)$  representa a função logaritmo natural.

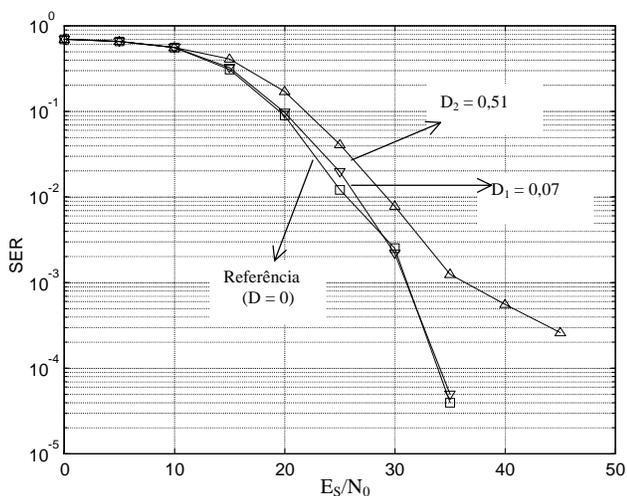
No que diz respeito ao desvio Doppler máximo, admitiu-se o perfeito ajuste entre o valor admitido pelo receptor e o valor usado para gerar as amostras do canal.

Mostra-se a seguir alguns resultados SER x  $E_S/N_0$  obtidos com dois perfis admitidos, dados por  $q^1 = [1/3 \ 1/3 \ 1/3]^T$  e  $q^2 = [0.1 \ 0.5 \ 0.4]^T$ , para os quais a divergência em relação ao perfil simulado é igual a 0,07 e 0,51, respectivamente.

As Figuras 6 e 7 foram obtidas considerando-se  $f_D$  igual a 50 e 100Hz, respectivamente. Em ambos os casos a razão  $E_s/N_0$  foi variada de 0 a 50 dB, com incrementos de 5 dB. Além dos resultados produzidos pelos perfis  $q^1$  e  $q^2$  mencionados acima, estas figuras mostram também as curvas de referência, obtidas com perfil perfeitamente ajustado ao canal ( $q=p$ ). Várias curvas não se estendem até os valores mais altos de  $E_s/N_0$  porque nesses casos não se observou nenhum erro na massa de dados simulada.



**Fig. 6.** SER X  $E_s/N_0$  para  $f_D = 50\text{Hz}$  e Diferentes Perfis Admitidos.



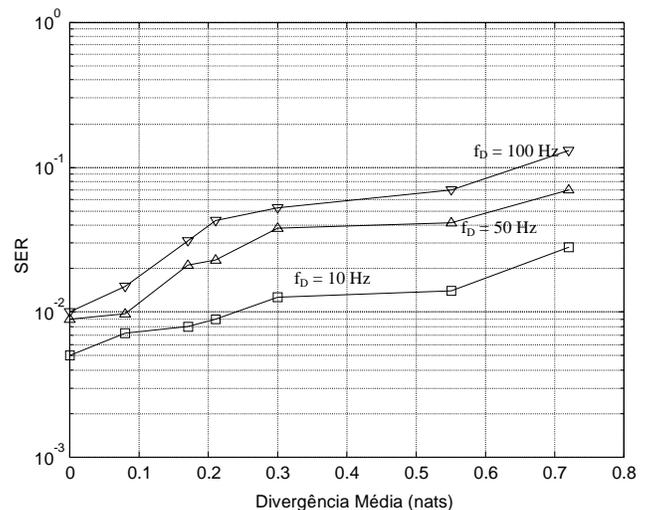
**Fig. 7.** SER X  $E_s/N_0$  para  $f_D = 100\text{ Hz}$  e Diferentes Perfis Admitidos.

Nota-se nas Figuras 6 e 7 que o receptor apresenta desempenho muito próximo do de referência quando se usa o perfil  $q^1$ . No caso de uso do perfil  $q^2$ , o desempenho se mostra bem pior, especialmente quando o desvio Doppler máximo é igual a 100.

Para avaliar a sensibilidade do receptor a variações maiores na divergência entre o perfil admitido e o perfil do canal ( $p$ ), fixou-se a relação sinal ruído em 25 dB e foram considerados 3 valores de  $f_D$ , a saber: 10, 50 e 100 Hz. Procurou-se então variar a escolha do perfil utilizado na recepção e medir o desempenho médio diante de desajustes de intensidade diferente.

A recepção de cada um dos 3000 blocos de símbolos foi executada com um perfil  $q^j$  distinto, selecionado através de um processo de escolha semi-aleatória no qual a primeira componente (da variância admitida para o primeiro raio) foi arbitrada, e a segunda foi modelada como uma variável aleatória com distribuição uniforme. (a terceira componente fica definida pelas outras). Para discussão dos resultados, tomou-se a média empírica das divergências calculada sobre cada amostra de 3000 perfis. Foram geradas 7 destas amostras, cada uma delas associada a um valor distinto da variância do primeiro raio.

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 8, na forma de curvas de SER X Divergência Média. Observa-se ali o aumento da degradação de desempenho com o aumento da divergência média. Com relação ao valor de  $f_D$ , a Figura 8 mostra um comportamento esperado: o desempenho piora com o seu aumento, devido à dificuldade de acompanhamento das variações rápidas na RIC.



**Fig. 8.** SER x Divergência Média, para  $E_s/N_0 = 25\text{ dB}$ .

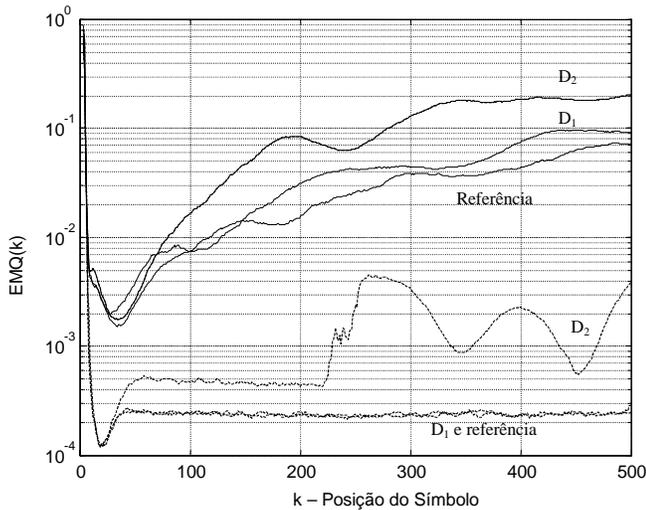
A variação do desempenho de SER com o valor da divergência média mostrada na Figura 8 pode parecer acentuada à primeira vista. No entanto, é preciso notar que valores pequenos de divergência estão associados a condições de significativa diferença entre o perfil admitido pelo receptor e o perfil de espalhamento de atrasos do canal. Um exemplo disso é o do perfil  $q^1$  utilizado na obtenção das Figuras 6 e 7, que se diferencia bastante do perfil  $p$ , apesar de produzir divergência igual a 0,07. Vê-se desta forma que a maior parte dos resultados da Figura 8 corresponde a situações de degradação bastante severa do perfil usado pelo receptor.

A fim de avaliar o erro médio quadrático na estimação do canal diante de desajustes no perfil admitido pelo receptor, foram fixados os mesmos perfis usados no levantamento das Figuras 6 e 7, para os quais a divergência em relação ao perfil do canal assume os valores 0,07, e 0,51. Para cada um destes perfis, considerou-se a recepção com  $E_s/N_0 = 25$  e 40 dB. Com relação ao desvio Doppler máximo, foram novamente utilizados os valores de 50 e 100 Hz, obtendo-se as estimativas de EMQ mostradas nas Figuras 9 e 10, respectivamente. Estas figuras também incluem com referências as curvas de EMQ obtidas com perfil ajustado ( $q=p$ ).

Nota-se nestas figuras que o perfil com divergência mais baixa produz desempenho bastante próximo da referência. Vale lembrar mais uma vez que, apesar de baixo, o valor de divergência 0,07 representa uma situação de desajuste significativo no perfil admitido. De fato, este valor foi obtido considerando que o perfil

admitido tem componentes iguais, o que seria razoável empregar quando o receptor não tivesse condição de dispor de um perfil estimado confiável.

Por outro lado, o valor de divergência 0,51 foi incluído nesta avaliação apenas com o intuito de caracterizar uma situação extrema de desajuste. Este valor dificilmente seria encontrado em alguma situação de interesse, pois se o receptor não tivesse condição de estimar o perfil de atrasos seria mais lógico usar um perfil admitido com componentes iguais.



**Fig. 9.** Evolução do EMQ sob Duas Condições de Desajuste no Perfil de Espalhamento de Atrasos Admitido.  $D_1 = 0,07$ ;  $D_2 = 0,51$ ;  $f_D = 50$  Hz;  $E_s/N_0 = 25$ dB (linhas cheias) e 40 dB (linhas tracejadas).

O que se observa nas Figuras 9 e 10 é que o EMQ produzido pelo perfil com divergência elevada aumenta ou oscila ao longo do tempo, indicando que o receptor tende a perder a capacidade de acompanhamento da RIC. Apesar disto, o receptor apresentou desempenho de SER satisfatório com desajustes intensos no perfil admitido (ver Figuras 6 e 7).

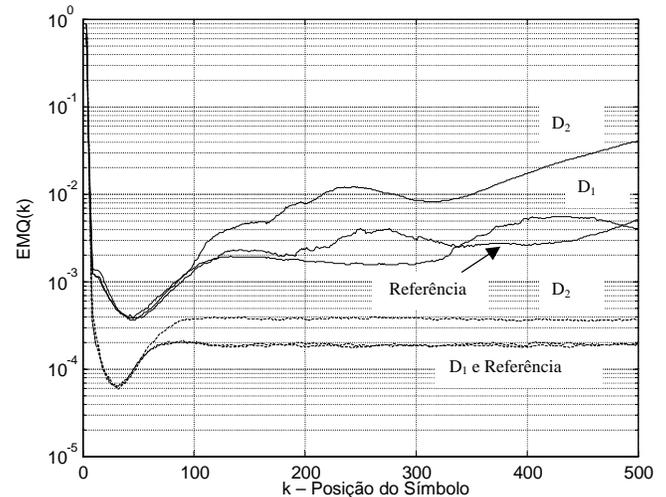
É interessante lembrar que os valores de  $f_D$  usados caracterizam condições de desvanecimento rápido, que por si só impõe grandes dificuldades de acompanhamento da RIC. Também se deve notar que o tamanho do bloco de recepção aqui considerado é bem maior do que o usado em outros trabalhos e em alguns padrões de sistemas de comunicações móveis [2]. Conclui-se portanto que o esquema PSP-FK-2 é robusto a ponto de lidar com desajustes extremos no perfil admitido sem comprometer muito o seu desempenho.

Observa-se novamente nas Figuras 9 e 10 que o receptor continua melhorando suas estimativas de canal logo após o final do período de treinamento. No que diz respeito à variação do desempenho na estimação da RIC com a divergência entre o perfil admitido e o perfil do canal, as curvas das Figuras 9 e 10 mostram o comportamento esperado: o EMQ atingido no final do bloco é tanto maior quanto maior é a divergência.

#### 4. Conclusões

Os resultados aqui apresentados mostram que o receptor PSP-FK-2 é bastante robusto a desajustes no desvio Doppler máximo e no perfil de espalhamento de atraso, que são usados na estimação da RIC. Conclui-se então que este receptor não exige grande precisão

na estimação destes parâmetros, conseguindo manter suas excelentes características de desempenho mesmo trabalhando com estimativas degradadas. No caso específico do desvio Doppler máximo, os resultados deste trabalho mostram que o receptor pode dispensar a sua estimação e ter pouca perda de desempenho, bastando para isso usar um valor elevado de  $f_{DA}$ , acima dos valores usualmente encontrados na aplicação a que se destina. Também se verificou que o receptor PSP-FK-2 é robusto a erros na estimativa inicial da RIC obtidas durante o treinamento. Por fim, cabe destacar que mesmo diante dos diversos tipos de desajustes aqui considerados, o receptor PSP-FK-2 exibe desempenho bem superior aos apresentados por outros esquemas na ausência destes desajustes. Em particular, o seu desempenho com desajustes ainda é muito superior ao desempenho sem desajustes de um receptor MLSE/PSP com algoritmo de Viterbi e filtragem de Kalman com modelo AR(1) [3 a 5], que tem sido considerado em diversos trabalhos, visando o mesmo tipo de aplicação.



**Fig. 10.** Evolução do EMQ sob Duas Condições de Desajuste no Perfil de Espalhamento de Atrasos Admitido.  $D_1 = 0,07$ ;  $D_2 = 0,51$ ;  $f_D = 100$  Hz;  $E_s/N_0 = 25$ dB (linhas cheias) e 40 dB (linhas tracejadas).

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] Chugg, K. M.; Polydoros, A., "MLSE for Unknown Channel - Part I: Optimality Considerations", *IEEE Trans. Commun.*, 1996, Jul., Vol. 44, No. 7, 836-846.
- [2] Chugg, K. M.; Polydoros, A., "MLSE for Unknown Channel - Part II: Tracking Performance", *IEEE Trans. Commun.*, 1996, Aug., Vol. 44, No. 8, pp. 949-958.
- [3] Galdino, J. F. "Recepção de Sequências de Símbolos em Canais Variantes com o Tempo", *Tese de Mestrado*, Dez., 1997, IME.
- [4] Galdino, J. F. e Pinto, E. L. "A Simulation Study of Adaptive Filtering Applied to MLSE-PSP Receivers", *IEEE Military Communications Conference - Unclassified Program*, Bedford, MA, EEUU, 18 a 21 de outubro de 1998.
- [5] Galdino, J. F. e Pinto, E. L. "A New MLSE-PSP Scheme Over Fast Frequency-Selective Fading Channels", *International Symposium on Information Theory and Its Applications*, Cidade do México, México, 14-16 de outubro de 1998.
- [6] Muller, A., "Simulation of Multipath Fading Channels Using Monte Carlo Method", *IEEE 44th Vehic. Tech. Conf. Proc.*, 1994.