

Desempenho de Códigos Espaço-Temporais com Estimação de Canal Utilizando o Algoritmo LMS

George A. da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte

Juraci F. Galdino

Instituto Militar de Engenharia

Francisco M. de Assis

Universidade Federal da Paraíba

gasilva@digicom.br, galdino@dee.ufpb.br, fmarcos@dee.ufpb.br

RESUMO

Resumo – Códigos espaço-temporais têm sido construídos admitindo-se canais conhecidos e caracterizados pelo efeito de desvanecimento lento e plano. Motivado pelos bons desempenhos propiciados por esses códigos, muitos pesquisadores propõem estender o seu uso para ambientes de comunicações móveis. Entretanto, resultados de simulação desses códigos nessas aplicações não são encontrados com facilidade na literatura. Neste trabalho avalia-se, mediante simulação computacional, o desempenho desses códigos em canais com desvanecimento plano e rápido. No esquema de recepção aqui investigado emprega-se o algoritmo LMS para estimar e acompanhar a resposta impulsional do canal.

1. INTRODUÇÃO

Após o trabalho de Divsalar and Simon [1], muitas técnicas têm sido propostas para melhorar o desempenho de sistemas de comunicações digitais que envolvem canais com desvanecimento. Tarokh et al [2] complementaram o trabalho de Divsalar [1] combinando diversidade espaço-temporal e codificação, definindo a expressão codificação espaço-temporal (*space-time coding*). Após [2], muitos trabalhos têm sido publicados analisando o desempenho desses códigos.

Sabe-se que esquemas de codificação espaço-temporal atingem um bom desempenho em sistemas digitais que envolvem canais modelados pelo efeito de desvanecimento plano e lento e que são perfeitamente estimados no extremo receptor, suposições que foram admitidas na concepção desses códigos.

Devido aos bons resultados de desempenho propiciado pelo uso de tais códigos para canais com desvanecimento plano e lento, muitos trabalhos propõem utilizá-los em cenários

que envolvem canais móveis. Contudo, existem poucos resultados de simulação em tais condições.

Neste artigo, o desempenho de codificação é avaliado, mediante simulação computacional de Monte-Carlo, considerando-se canais com desvanecimento plano e rápido. No esquema de recepção aqui investigado a resposta impulsional do canal (CIR, do termo em inglês channel impulse response) (RIC) é estimada pelo algoritmo LMS [3].

O restante deste artigo é organizado da seguinte forma: o sistema simulado é descrito na Seção 2, os resultados de simulação são apresentados na Seção 3 e as conclusões são resumidas na Seção 4.

2. SISTEMA SIMULADO

Os códigos investigados neste artigo foram propostos por Tarokh [2]. Em particular, são considerados os códigos com 4, 16 e 32 estados para sistemas que empregam duas antenas de transmissão e uma de recepção.

Para o sistema proposto o sinal recebido no instante t é dado por

$$r_t = \sum_{i=1}^2 \mathbf{a}_t^i \cdot c_t^i + \mathbf{h}_t, \quad (1)$$

na qual o \mathbf{h}_t denota o ruído na entrada do receptor no instante t e é modelado por uma variável aleatória gaussiana complexa com média nula e variância igual a 1 por dimensão, c_t^i é o sinal da constelação transmitido pela antena i e o termo \mathbf{a}_t^i representa a CIR que conecta a antena de transmissão i ao receptor no instante de tempo t .

O canal é modelado por um processo gaussiano complexo estacionário em sentido amplo com densidade espectral de potência dada por

$$G(f) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1-(f/f_D)^2}}, & \text{se } |f| < f_D \\ 0, & \text{se } |f| > f_D \end{cases}$$

em que f_D é o máximo desvio Doppler.

O algoritmo de detecção requer o conhecimento da CIR. Como o canal considerado neste trabalho é aleatório e rapidamente variante no tempo, é necessário lançar mão de procedimentos adaptativos para estimá-lo e acompanhá-lo durante a fase de recuperação da informação digital transmitida.

Aqui propõe-se estimar a CIR com o algoritmo LMS. Esta escolha foi determinada principalmente pela baixa complexidade computacional desse algoritmo de filtragem adaptativa, o que, apesar de seus problemas de acompanhamento em canais rapidamente variantes no tempo, têm justificado o seu maciço uso em sistemas de comunicações móveis.

Para auxiliar o processo de estimativa da RIC e considerando a intensa mobilidade dos canais aqui investigados, os dados são divididos em blocos, no início dos quais são inseridas seqüências de treinamento. Durante o processo de recuperação da informação o receptor atualiza a RIC, utilizando para tal os símbolos que vão sendo detectados, abordagem comumente conhecida como adaptação orientada pela decisão.

Neste artigo adotou-se blocos contendo 160 símbolos, dos quais 30 são utilizados como seqüência de treinamento. Desta forma 18,75% da capacidade de transmissão é comprometida com a transmissão de seqüências de treinamento.

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção diversos resultados de simulação são apresentados. Foram obtidos resultados em função do retardo na decisão do símbolo, do máximo desvio Doppler (f_D), da quantidade de estados do codificador e da razão sinal ruído (SNR) na entrada do receptor, a qual é expressa em termos de E_b/N_0 .

Os resultados de simulações que serão discutidos foram obtidos para uma taxa de transmissão de 24.300 símbolos por segundo e f_D igual a 10, 50 e 100 Hz. Além disso, o passo do LMS foi ajustado para cada valor de máximo desvio Doppler utilizado na simulação do canal.

O ajuste do passo foi realizado considerando curvas de probabilidade de erro do sistema, as quais foram obtidas

em função deste parâmetro e para alguns valores de SNR. Como para um determinado valor de f_D o passo ótimo muda de acordo com o SNR, adotou-se uma solução de compromisso, escolhendo um único valor de passo para cada valor de f_D .

Inicialmente avaliou-se o desempenho do sistema em função do retardo na decisão, que é um parâmetro importante no projeto do receptor. Um retardo elevado pode comprometer o acompanhamento da resposta impulsional do canal e, por conseguinte, a exatidão no cálculo das métricas de extensão e seleção de percursos sobreviventes realizado pelo algoritmo de decodificação. Por outro lado, um pequeno retardo pode comprometer a confiabilidade na decisão do símbolo devido ao truncamento da memória do codificador. Isto é especialmente severo em canais seletivos e rapidamente variantes no tempo ou quando se utiliza codificadores com uma quantidade elevada de estados. Diante destes efeitos conflitantes é importante estabelecer uma solução de compromisso.

Para estimar um valor conveniente de retardo de decisão avaliou-se o desempenho do esquema de recepção em função desse parâmetro. Em particular, nas Figs 1 e 2 são apresentadas curvas de probabilidade de erro para f_D de 10 e 100 Hz, respectivamente. Em ambos os casos são incluídas curvas para SNR de 8, 18 e 28 dB e admitiu-se código com 4 estados.

Considerando-se $f_D = 10$ Hz (Fig. 1) verifica-se que o melhor retardo de decisão é de seis símbolos, no entanto, observa-se uma pequena sensibilidade com respeito a esse parâmetro, o que é razoável, tendo em vista que para a f_D considerada o canal é bem correlacionado em toda a extensão do bloco. Consequentemente, sua CIR deve se alterar pouco dentro do bloco.

Por outro lado, para $f_D=100$ Hz (Fig. 2), o desempenho do receptor é severamente degradado à medida que se aumenta o retardo na decisão, especialmente para elevados valores de relação sinal ruído, situação na qual o desempenho fica limitado pelos erros de estimação de canal. Para este caso em particular, verifica-se que o melhor retardo é de apenas dois símbolos. No caso de $f_D=50$ Hz (curvas não apresentadas) o melhor retardo é de 4 símbolos.

Na Fig. 3 são apresentadas curvas de desempenho dos esquemas de recepção em função da SNR. Nessa figura são incluídas curvas considerando-se os três valores de máximo desvio Doppler aqui investigados e os retardos otimizados. As curvas foram obtidas para codificador com 4 estados,

além disso, para fins de comparação, foi incluída a curva de probabilidade de erro considerando modulação 4-PSK sem codificação.

Os resultados de simulação levam a importantes conclusões. Em primeiro lugar verifica-se que o código proporcionou uma melhoria no desempenho. Isto é uma constatação importante, tendo em vista que eles foram otimizados admitindo-se modelo de canal invariante dentro do quadro e perfeitamente conhecido. Uma segunda conclusão importante é que, apesar da melhoria de desempenho proporcionada pelo código, verifica-se o efeito de probabilidade de erro irreduzível, que se acentua à medida que aumenta-se o máximo desvio Doppler. Isto, como será mostrado nos próximos resultados de simulações, deve-se a perda de acompanhamento de canal. Como consequência, é inconveniente empregar quadros longos, o que seria importante para aumentar a vazão do sistema.

Para melhor caracterizar o desempenho do esquema de recepção e avaliar o comportamento do processo de decodificação da informação, a seguir são apresentadas curvas de erro médio quadrático (EMQ) de estimação da CIR e histogramas de erros ocorridos ao longo do bloco de informação. Os resultados de simulações são apresentados nas Figs 4 e 5.

As curvas apresentadas nas Figs 4 e 5 respaldam a discussão apresentada anteriormente. Os erros de decisão vão gradativamente se acumulando no final do bloco de informação. As decisões erradas se realimentam no processo de decodificação através do estimador de canal, que as utiliza como sinal de referência, desencadeando um processo desfavorável para o decodificador, contribuindo para o surgimento de erros em rajada.

Estas curvas mostram que os erros de decisão e de acompanhamento conjuntamente podem degradar significativamente o desempenho ao longo do bloco, principalmente a medida que aumenta-se f_D e/ou reduz-se a SNR na entrada do receptor. Isto impõe a necessidade de se utilizar pequenos blocos de informação, sob pena de degradar severamente o desempenho do enlace, implicando numa redução sensível na vazão do sistema.

É importante ressaltar que o efeito de perda de acompanhamento da CIR pode ser amenizado utilizando-se esquemas de filtragem robustos, como por exemplo o filtro de Kalman [3], os quais incorporam em seu processo de estimação o modelo e regressão do canal, alternativa que será investigada na continuação deste trabalho.

Na Fig. 4 são mostradas curvas de erro médio quadrático para SNR de 20 dB e f_D igual a 10, 50 e 100 Hz. Devido a utilização de seqüências de treinamento, as curvas apresentam uma alta taxa de aprendizagem no início do quadro. É importante observar que a velocidade de convergência é maior para f_D igual a 50 e 100 Hz do que para f_D igual a 10 Hz. Isto se justifica pela adoção de valores maiores para o passo do LMS para $f_D = 50$ e 100 Hz (0,38 e 0,4, respectivamente) em relação ao valor utilizado quando $f_D = 10$ Hz (0,16). No entanto, como se sabe, a velocidade de convergência e o ruído de gradiente crescem com o aumento do passo do LMS [3], determinando uma rápida convergência porém para níveis de EMQ maiores.

Conforme pode ser observado no histograma apresentado na Fig. 5, a perda de acompanhamento do canal induz uma concentração de erros no final do quadro. Nesta situação é necessário adotar quadros pequenos intercalados por seqüências de treinamento, principalmente para canais rapidamente desvanecidos, sob pena de degradar sensivelmente o desempenho do esquema de recepção.

A seguir são apresentados resultados de simulações para codificadores com 16 e 32 estados. Seguindo o mesmo procedimento, avalia-se inicialmente o desempenho em função do retardo na decisão do símbolo, obtendo-se o melhor retardo a ser adotado em cada valor de f_D .

Nas Figs. 6 e 7 são mostradas curvas de desempenho do sistema para código de 16 estados em função do retardo de decisão para f_D igual a 10 e 100 Hz, respectivamente. Nessas figuras também são incluídas curvas de probabilidade de erro obtidas para o sistema sem codificação.

Considerando-se $f_D = 10$ Hz o melhor desempenho é obtido para um retardo de 8 símbolos (Fig. 6). Para $f_D = 100$ Hz (Fig. 7) o desempenho do receptor é severamente degradado pelo aumento do retardo na decisão. Neste caso o melhor retardo é de apenas dois símbolos. Para $f_D = 50$ Hz o melhor retardo é igual a 4 símbolos.

Admitindo código de 32 estados, os melhores resultados de desempenho foram obtidos para retardos de 8, 4 e 4 com $f_D = 10, 50$ e 100 Hz, respectivamente. As curvas para este caso são qualitativamente similares as obtidas considerando-se códigos com 16 estados e, por isso, não foram apresentadas.

Quando se utiliza codificadores com maior número de estados, há uma tendência de que o melhor retardo aumente, em decorrência do aumento da memória do codificador. Entretanto, admitindo-se o uso de estimadores

de canal, os erros na estimação e acompanhamento da RIC têm um peso significativo na composição da probabilidade de erro do sistema, podendo, principalmente para canais rapidamente variantes no tempo, modificar esta tendência. Desta forma, torna-se necessário uma análise caso a caso para determinar o melhor valor de retardo.

O desempenho dos esquemas de transmissão utilizando codificadores de 16 e 32 estados em função da relação sinal ruído são apresentados nas Figs 8 e 9, respectivamente. Os resultados foram obtidos considerando os três valores de máximo desvio *Doppler*. Em todos os casos foram utilizados retardos otimizados para a decisão dos símbolos.

De forma similar ao comportamento do código de 4 estados, os resultados apresentados nas Figs. 8 e 9 mostram que os códigos proporcionam uma melhoria no desempenho. Apesar disso, verifica-se o efeito de probabilidade de erro irreduzível, com patamar que se eleva com o aumento do máximo desvio Doppler.

Nas Figs. 11 e 12 são comparados os desempenhos dos três codificadores considerando canal com $f_D = 10$ e 100 Hz, respectivamente. Para o caso de $f_D = 10$ Hz as curvas de probabilidade de erro são bem parecidas, sendo que, o codificador de 4 estados apresentou desempenho ligeiramente superior.

Este resultado é bastante interessante pois codificadores de maior número de estados apresentam melhores resultados de desempenho em canais com desvanecimento plano e invariante, como apresentado em [2]. Considerando canais variantes, o resultado de desempenho se inverteu.

Este efeito pode ser justificado pelo uso de pequenas seqüências no algoritmo de decodificação imposto pelo retardo de decisão. Pequenas seqüências favoreceram os codificadores que naturalmente necessitam de menos memória. Este efeito se verificou de forma mais acentuada no canal com $f_D = 100$ Hz. Neste caso o codificador de 32 estados teve o pior desempenho, apresentando um patamar de erro irreduzível em um nível mais elevado que os demais.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se, mediante simulação computacional utilizando a técnica de Monte-Carlo, o desempenho de esquemas de recepção que empregam códigos espaço-temporais em sistemas de comunicações móveis que envolvem canais modelados pelos efeitos de desvanecimento rápido e lento. Aqui a resposta impulsional

do canal foi estimada e acompanhada usando o algoritmo de filtragem adaptativa LMS, cujo passo foi ajustado para cada valor de máximo desvio Doppler.

Os resultados de simulação aqui discutidos levaram a importantes conclusões. Em primeiro lugar, embora os códigos espaço-temporais tenham sido projetados para canais invariantes, eles apresentaram bons desempenhos em canais com desvanecimento rápido.

Em segundo lugar, apesar da melhoria de desempenho propiciado pelo uso dos códigos, observou-se o problema de probabilidade de erro irreduzível, o que ocorreu em função dos erros de acompanhamento da resposta impulsional do canal. A expectativa é que tais erros possam ser eliminados combinando o uso dos códigos com técnicas de filtragem adaptativa mais robustos. Pretende-se abordar este assunto em um trabalho subsequente.

Os erros de acompanhamento de canal além de induzirem o efeito de probabilidade de erro irreduzível, impõem a restrição de se utilizar blocos pequenos, comprometendo sobretudo a vazão do sistema.

Por fim, verificou-se que códigos com uma quantidade maior de estados, por induzem mais memória no sistema, são mais sensíveis aos erros de estimação, especialmente para canais caracterizados pelo efeito de desvanecimento rápido.

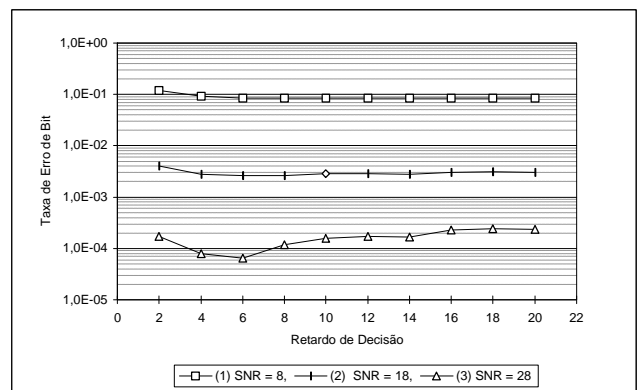


Fig. 1: Desempenho como função do retardo de decisão para codificador de 4 estados. Deslocamento Doppler Máximo igual a 10 Hz e SNR 8, 18 e 28 dB.

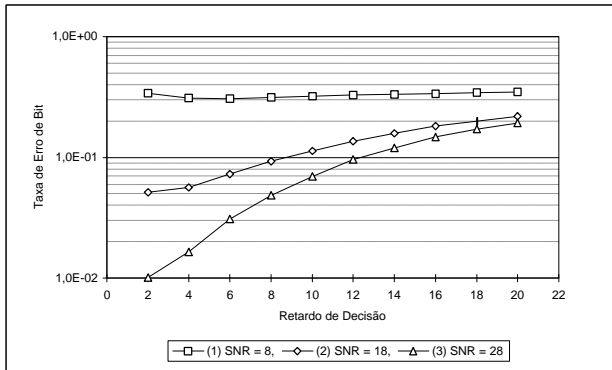


Fig. 2: Desempenho como função do retardo de decisão para codificador de 4 estados. Deslocamento Doppler Máximo igual a 100 Hz e SNR igual a 8, 18 e 28 dB.

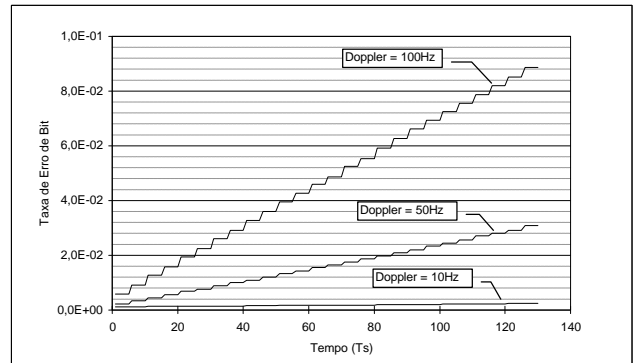


Fig. 5: Taxa de Erro como função do tempo para SNR igual a 20 dB e Deslocamento Doppler Máximo igual a 10, 50 e 100 Hz.

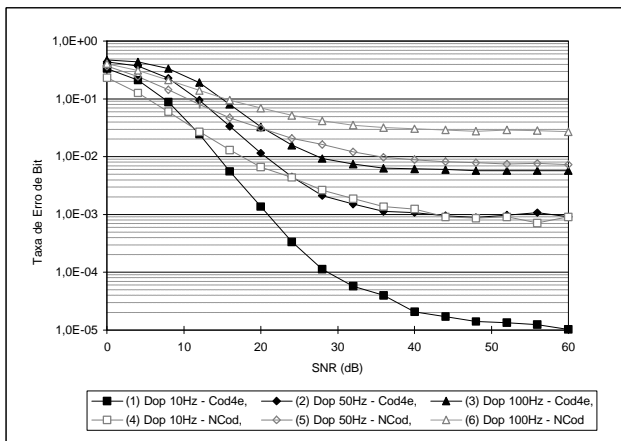


Fig. 3: Desempenho como função da SNR para sistemas não codificados e com codificador de 4 estados. Deslocamento Doppler Máximo iguais a 10, 50 e 100 Hz.

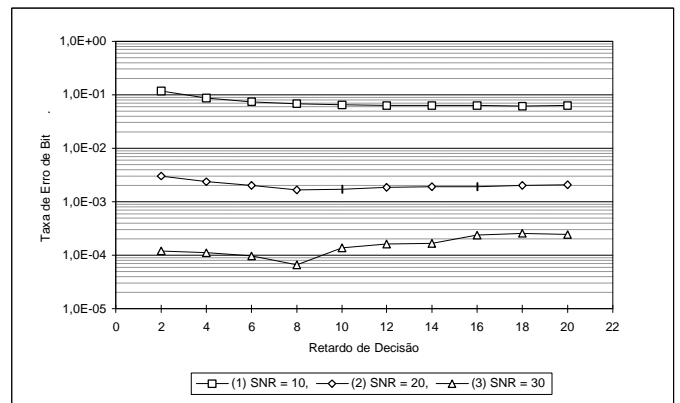


Fig. 6: Desempenho como função do retardo de decisão para codificador de 16 estados. Deslocamento Doppler Máximo igual a 10 Hz e SNR igual a 10, 20 e 30 dB.

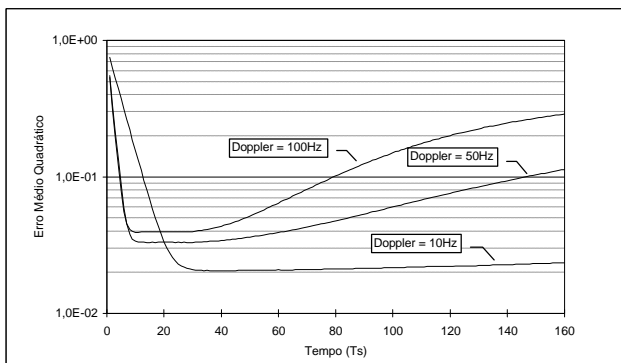


Fig. 4: Erro médio quadrático como função do tempo para SNR igual a 20 dB e Deslocamento Doppler Máximo igual a 10, 50 e 100 Hz.

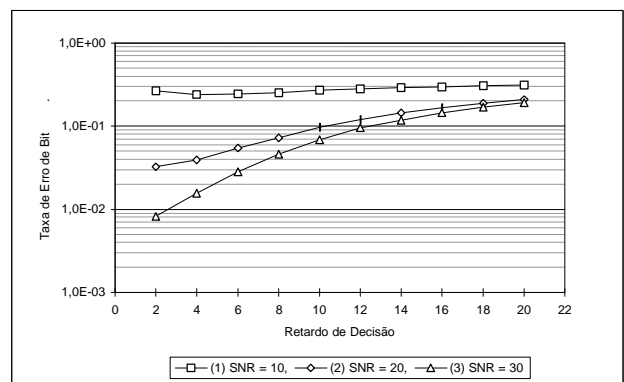


Fig. 7: Desempenho como função do retardo de decisão para codificador de 16 estados. Deslocamento Doppler Máximo igual a 100 Hz e SNR igual a 10, 20 e 30 dB.

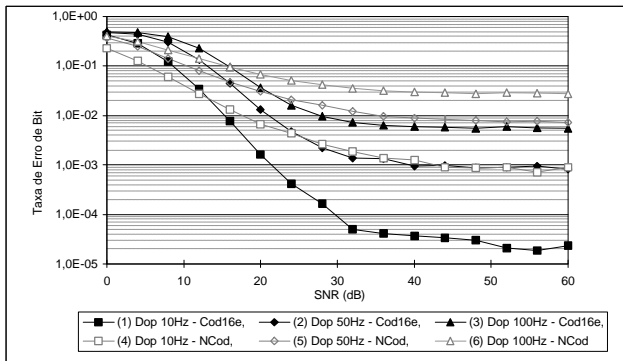


Fig. 8: Desempenho como função da SNR para sistemas não codificados e com codificador de 16 estados. Deslocamento Doppler Máximo iguais a 10, 50 e 100 Hz.

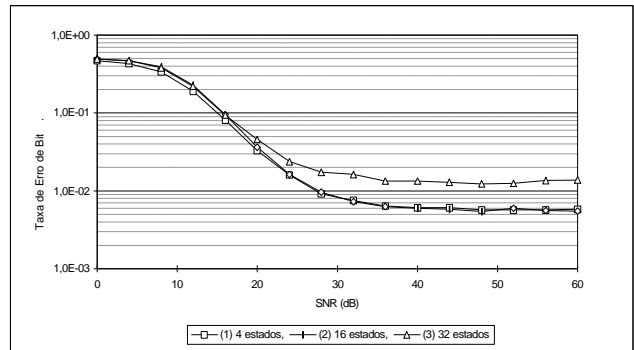


Fig. 11: Desempenho como função da SNR para codificadores de 4, 16 e 32 estados. Deslocamento Doppler Máximo igual a 100 Hz.

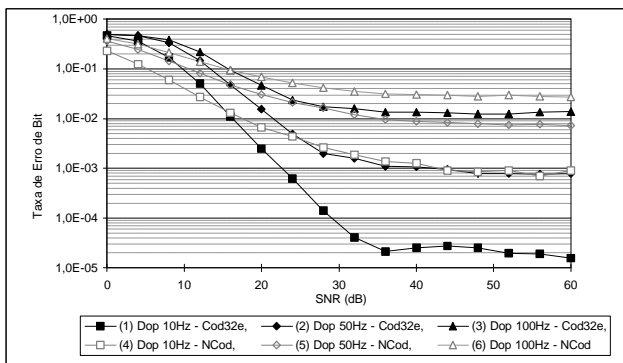


Fig. 9: Desempenho como função da SNR para sistemas não codificados e com codificador de 32 estados. Deslocamento Doppler Máximo iguais a 10, 50 e 100 Hz.

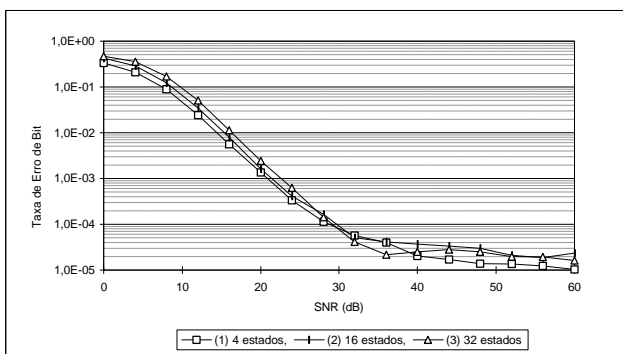


Fig. 10: Desempenho como função da SNR para codificadores de 4, 16 e 32 estados. Deslocamento Doppler Máximo igual a 10 Hz.

REFERÊNCIAS

- [1] Dariush Divsalar and Marvin K. Simon, "The Design of Trellis Coded MPSK for Fading Channels: Performance Criteria," IEEE Trans. on Communications, Vol. 36, No. 9, September, 1988, pp. 1004-1012.
- [2] Vahid Tarokh, Nambi Seshadri and A. R. Calderbank, "Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction," IEEE Transaction on Information Theory, Vol. 44, No. 2, March, 1998.
- [3] Simon Haykin, "Adaptative Filter Theory," Prentice-Hall, Third Edition, 1997.