

Simulador de Comunicação com Modulação *Spread Spectrum*

Valdemar Monteiro, João Nuno Matos

Resumo- Neste artigo descreve-se a construção de um simulador de comunicações com modulação *Spread Spectrum* com objectivo de analisar o desempenho destes sistemas. O sistema *Spread Spectrum* que se vai simular é do tipo CDMA - DS/SS BPSK. O desempenho é avaliado mediante a probabilidade de erro obtida na simulação da comunicação.

Abstract- In this paper we present the description of the design of a spread spectrum communication simulator to analyse the system performance. The Spread Spectrum system that will be simulated is the CDMA - DS/SS BPSK. The performance will be evaluated by the probability of bit error in the communication simulation.

I. INTRODUÇÃO

O espectro de rádio-frequência é um recurso vital e limitado. As técnicas *Spread Spectrum* (SS) fazem seu uso de forma bastante eficiente, permitindo vários utilizadores partilharem ao mesmo tempo a mesma banda de frequência, e mesmo utilizar bandas já ocupadas por outros sistemas. Para além desta vantagem, a comunicação por espalhamento de espectro possui outras que a torna mais atractiva: permite uma redução dos efeitos devidos à propagação multi-trajecto e apresenta um certo grau de privacidade.

O objectivo do simulador é estudar as condições de uma área onde existam 5 a 8 utilizadores de um sistema SS.

Dentro dos factores que afectam o desempenho de um sistema SS CDMA (*Code Division Multiple Access*), consideramos os seguintes na implementação do simulador:

- Interferência entre vários emissores;
- Ruído no canal;
- Códigos usados no espalhamento de espectro;
- Mobilidade dos emissores.

II. MODULAÇÃO DS/SS BPSK

A figura 1 representa o esquema básico de um sistema emissor/receptor DS/SS BPSK. No emissor, a informação é espalhada pelo código PN^[1] (*pseudo noise*—pseudo aleatório), modulado por uma portadora com modulação BPSK e amplificado antes de ser transmitido. No canal, este sinal, é influenciado por ruído aditivo e por outros sinais interferentes, do mesmo tipo. No receptor, depois de amplificado, o sinal é tratado de forma inversa ao

emissor, ou seja, é desmodulado, *de-spreaded* ao mesmo tempo que o código é sincronizado e é extraída a informação.

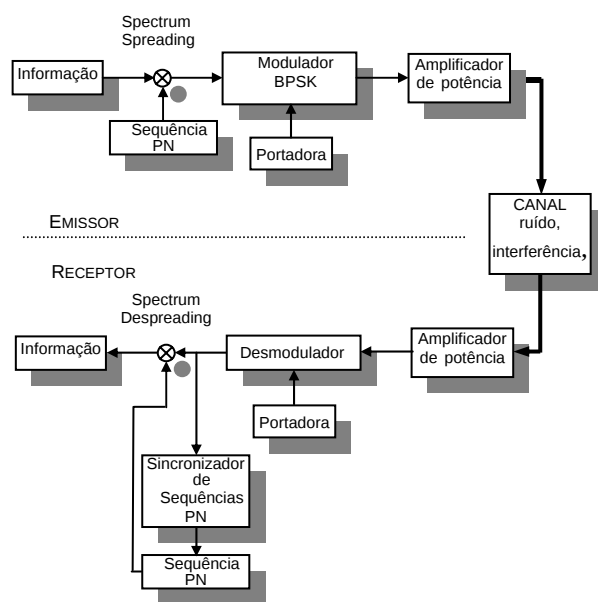


Fig. 1 - Esquema de um sistema DS/SS BPSK

O sucesso de um sistema SS depende essencialmente de dois factores: a escolha de códigos com que se espalha a informação e da capacidade do receptor gerar esse código perfeitamente localizado no tempo de modo a poder extrair a informação. Isto significa que o sincronismo do sinal PN local com o do sinal recebido é condição essencial para a recuperação de informação.

Descrevemos a seguir as características dos códigos de espalhamento e o funcionamento do receptor para uma melhor compreensão do sistema que se pretende simular.

A. Códigos

Os códigos usados em sistemas SS devem apresentar as seguintes características:

- ⇒ Baixa autocorrelação fora de fase, facilitando a sincronização;
- ⇒ Baixa correlação cruzada - quase ortogonais - fazendo com que mensagens de outros utilizadores sejam ignoradas;

Duas famílias de códigos, Gold^[1] e Kasami^[1], apresentam as características mencionadas acima. As figuras 2a e 2b apresentam os gráficos de autocorrelação de um sinal PN e da correlação cruzada entre dois sinais PN respectivamente, ambos obtidos de códigos de Gold de comprimento $N=63$.

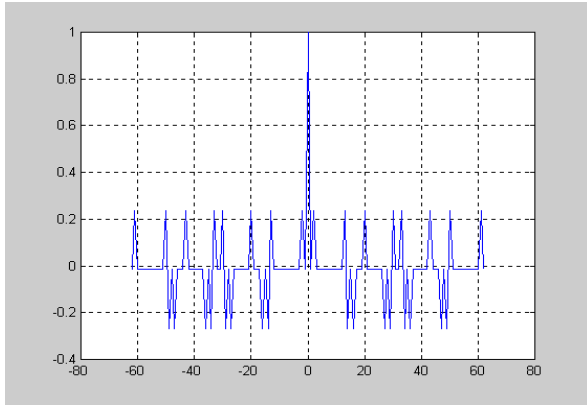


Fig. 2a – Autocorrelação de um sinal correspondente a uma sequência de Gold $N=63$

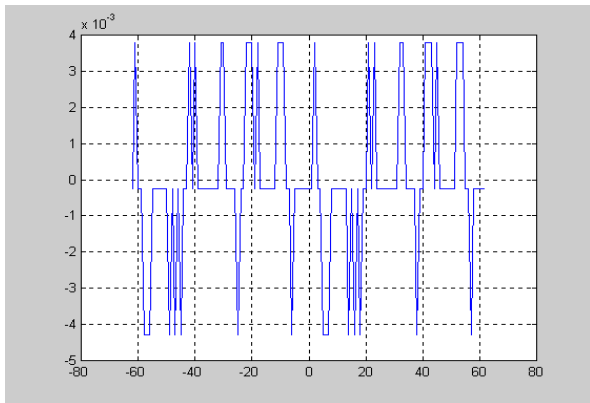


Fig. 2b – Correlação cruzada de entre 2 sinais correspondentes a 2 sequências de Gold $N=63$

B. Receptor

O receptor DS/SS BPSK é apresentado com mais pormenor na figura 3. O sincronismo do sinal pseudo-aleatório é a parte mais delicada do sistema. A recuperação da portadora é normalmente feita por uma PLL.

A sincronização de código engloba duas fases: *Aquisição* e *Tracking* (Seguimento). A aquisição é a fase inicial da sincronização. Consiste em alinhar a fase dentro de uma gama pretendida, da ordem de T_c^* . *Tracking* é posterior à aquisição, e consiste em fazer os ajustes precisos.

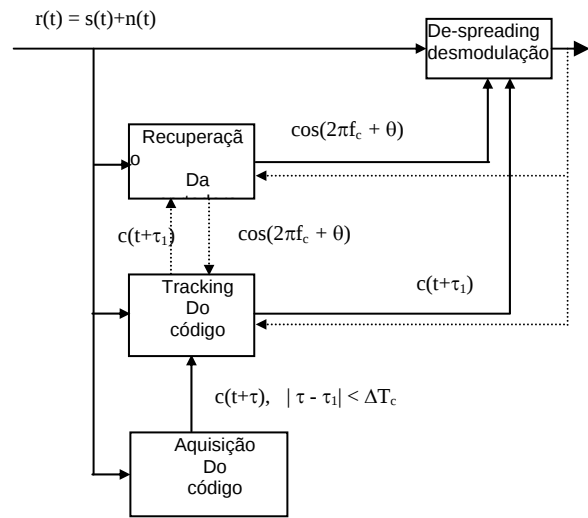


Fig. 3 – Receptor DS-BPSK

Durante a comunicação, o seguimento faz ajustes às pequenas variações de fase. A figura 4 apresenta o diagrama de circuito de aquisição, com processos de inspeção série. Neste processo, o teste de valores de correlação é feita em série. A figura 5 apresenta o diagrama do circuito de tracking Delay-Lock Loop (DLL)^[1]. Foram estes os circuitos implementados no simulador para se efectuar e manter o sincronismo.

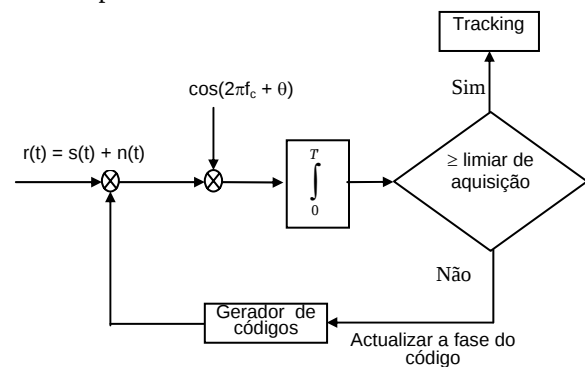


Fig. 4 – Esquema de aquisição série

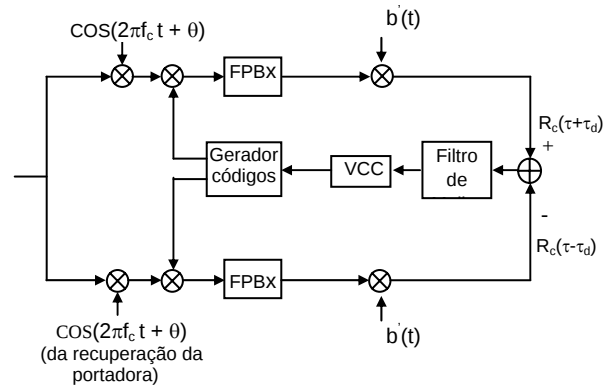


Fig. 5 – Circuito de seguimento Delay-Lock Loop

* T_c : Time Chip. Período correspondente a um sinal de código.

III. AS CONDIÇÕES DO SISTEMA QUE SE SIMULA

São assumidas as seguintes condições no sistema que se pretende simular:

- Procede-se ao estabelecimento da comunicação mono-utilizador, isto é, com um único emissor, onde é obtido o sincronismo necessário para início da comunicação;
- Em seguida adicionam-se sinais de vários emissores produzindo um canal com *jamming*.

A simulação engloba então duas fases: estabelecimento de comunicação e envio de informação.

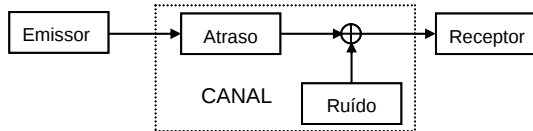


Fig. 6 – O sistema na fase de estabelecimento da comunicação

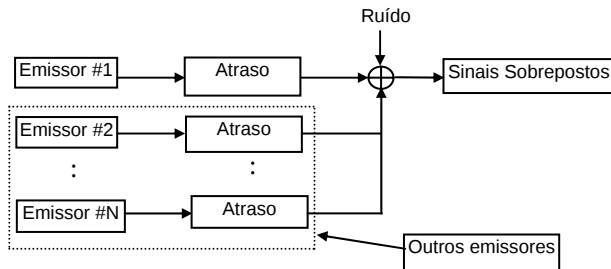


Fig. 7 – O sistema na fase de envio de informação

Nas implementações práticas também é vulgar utilizar-se um canal independente sem interferência de outros utilizadores, para obtenção do sincronismo.

V. O SIMULADOR

O programa base utilizado para construir o simulador foi o MATLAB 5.1 por oferecer cálculos científicos nomeadamente operações matemáticas e de processamento de sinal. Para além das funções principais, foi construída uma pequena *toolbox* para suporte de cálculos em sistemas SS.

A. Simulação e determinação da Probabilidade de Erro

A simulação da comunicação é feita pelo envio e recepção de cada bit de informação. Um dos métodos usados para determinar a Probabilidade de Erro na simulação de sistemas de comunicações é o Método de Monte Carlo^[7]. A mensagem enviada pelo emissor é comparada bit a bit com a mensagem recuperada pelo receptor. A probabilidade de erro na comunicação é estimada pela razão entre o número de bits de erro no receptor e o número total de bits enviados. A figura 8 apresenta o esquema do método Monte Carlo.

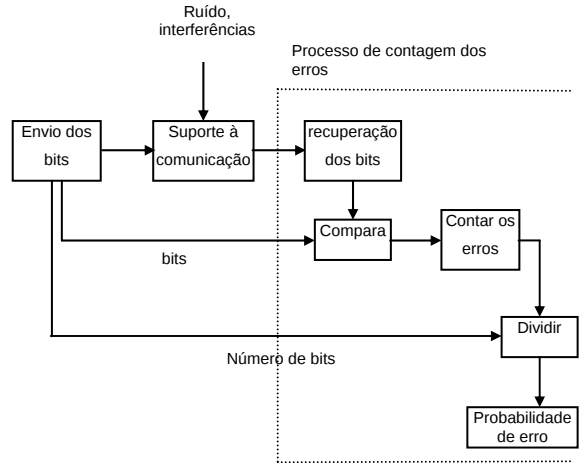


Fig. 8 – Contagem de erros - Método de Monte Carlo

B. Estrutura do Simulador

À semelhança do sistema que se pretende simular, o simulador é constituído por 3 módulos: emissor, canal e receptor, tratados de forma independente, com códigos de processamento também independentes. Isto significa que a simulação de envio de cada bit de informação implica o seu processamento por parte de cada um dos módulos, passando os dados processados ao módulo subsequente, conforme o seguinte esquema:

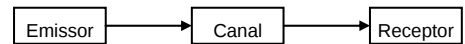


Fig. 9 – Esquema generalizado do simulador

C. Os sinais no Emissor e Receptor

Descrevemos a seguir, de forma simplificada, como se encontra implementado o processamento de sinais no simulador, respeitantes ao emissor e receptor.

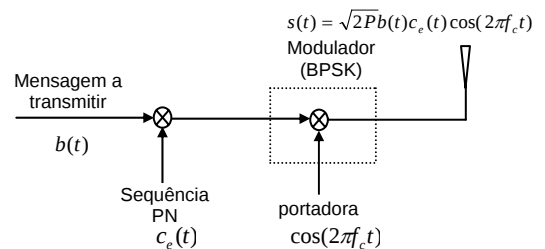


Fig. 10 - Emissor DS-BPSK

O sinal à saída do emissor, figura 10, é dado por:

$$s_e(t) = \sqrt{2P}b(t)c_e(t)\cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

Para simplificar a análise de sinal, apresentamos o tratamento no caso de chegar ao receptor somente o sinal de um único emissor. Na realidade, no canal há sobreposição de sinais dos vários emissores com o ruído do canal.

Com um único emissor e na ausência do ruído, o sinal à saída do integrador é:

$$z_i(t) = \int_0^T \sqrt{2P} b(t-\tau) c_e(t-\tau) c_r(t) \cos(2\pi f_c t + \phi) \cos(2\pi f_c t) dt \quad (2)$$

$$= \int_0^T \sqrt{\frac{P}{2}} b(t-\tau) c_e(t-\tau) c_r(t) \{\cos(4\pi f_c t + \phi) + \cos(\phi)\} dt \quad (3)$$

eliminando a componente de alta frequência pelo integrador, teremos:

$$z_i(t) = \sqrt{\frac{P}{2}} \cos(\phi) \int_0^T b(t-\tau) c_e(t-\tau) c_r(t) dt \quad (4)$$

em que $b(t-\tau)$ é o bit de informação, $c_e(t-\tau)$ o código do emissor, ambos atrasados de τ segundos, $c_r(t)$ código do receptor e ϕ o desfasamento entre a portadora do emissor e a gerada localmente. Com múltiplos emissores, o sinal à saída do integrador é uma soma de sinais representados pela equação (4).

Para o emissor desejado os códigos são os mesmos e estão em fase ($c_e(t-\tau) = c_r(t)$), e as portadoras estão também em fase ($\phi=0$). Esta opção baseia-se no facto de se usar nestes sistemas uma PLL, permitindo uma desmodulação coerente. Teremos então no receptor à saída do integrador:

$$z_i = \sqrt{\frac{P}{2}} \int_0^T b(t) dt \quad (5)$$

Para outro emissor que não o desejado, os códigos são diferentes, e o desfasamento entre as portadoras são variáveis aleatórias, dependendo das distâncias consideradas entre o emissor e o receptor. Teremos para este caso à saída do integrador:

$$z_i = \sqrt{\frac{P}{2}} \cos(\phi) \int_0^T b(t-\tau) c_e(t-\tau) c_r(t) dt \quad (6)$$

valor este que é baixo devido à baixa correlação entre os diferentes códigos c_e e c_r (ver figura 2b). O desfasamento entre as portadoras, não sendo controlado, é um factor que pode contribuir para diminuir ainda mais o valor desta expressão.

D. Frequência de Amostragem e Equivalente Banda Base

A simulação computacional de sistemas de comunicação

obriga à digitalização dos sinais. O teorema de amostragem estabelece que um sinal analógico cuja largura de banda seja W , deve ser amostrado a uma frequência $f_s \geq 2W$. De forma a combater o *aliasing*, usa-se f_s maior possível. Visto que isso também tem seus custos na carga computacional, a escolha de f_s passa a ser um compromisso. Normalmente em simulações usa-se um número de amostras por símbolo entre 4 e 16^[3], valor utilizado no simulador desenvolvido. No nosso sistema 1 símbolo = $1T_c$.

Para reduzir a carga computacional, a modulação não é aplicada ao sinal. Trabalha-se antes com o equivalente banda-base dos sinais^[3].

O efeito da modulação é simulado com base na equação (4), isto é, a partir de valores do desfasamento ϕ . Assumimos que, para o emissor desejado existe sempre desmodulação coerente, isto é, $\phi=0$. Para outros emissores, é uma variável aleatória dependente da distância entre o emissor e o receptor. Esse valor ϕ , durante toda a simulação é fixo para emissores imóveis, e variável, dependente da velocidade, para emissores móveis.

Os sinais de cada emissor no simulador são obtidos segundo as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} s_e(t) &= b_e(t) c_e(t) && \text{para o emissor desejado} \\ s_{ei}(t) &= b_{ei}(t) c_{ei}(t) \cos(\phi) && \text{para o emissor interferidor} \end{aligned}$$

Faz-se a sobreposição de todos os sinais no canal e a recuperação da informação é feita no receptor sem recorrer à portadora.

E. Mobilidade dos emissores

Assume-se no simulador que os emissores podem ser fixos ou móveis. Os efeitos resultantes da mobilidade dos emissores que se pretende estudar são:

- Desfasamento do código do receptor em relação ao código do emissor desejado.
- Variação da potência dos sinais interferidores na correlação do sinal do receptor devido à variação da diferença de fase ϕ_K .

Foram assumidos os seguintes parâmetros para simular a mobilidade dos emissores:

- Velocidade de cada emissor (v_e) é aleatória e distribuída uniformemente no intervalo $[-100\text{Km/h}, +100\text{Km/h}]$
- Frequência da portadora $f_c = 870\text{MHz} \Rightarrow \lambda = 0.344\text{m}$
- Chip Rate = 1.2288MCPS
- Período de análise do sistema = 0.1 seg.

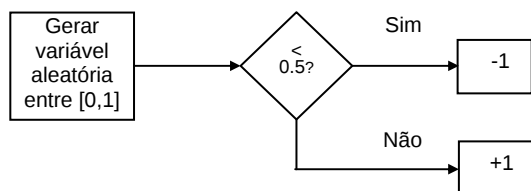
A escolha dos valores da velocidade não tem implicitamente a ver com nenhuma estatística analisada. Tem a ver com nossa intenção de simular sistemas com móveis reais. A frequência da portadora corresponde a um canal na banda normalmente atribuída a comunicações

móveis. O *Chip Rate* também corresponde a um valor aplicável a CDMA^[1].

F. As variáveis aleatórias do sistema

Em seguida são descritas as mais importantes variáveis aleatórias do sistema e como foram geradas.

- Bits de informação para todos emissores: +/-1 com igual probabilidade;
- Código de espalhamento de cada emissor = [1, n.º total de códigos do grupo], com igual probabilidade;
- Atraso é causado pela distância entre o emissor e o receptor. Esse valor é fixo para emissores fixos. Para emissores móveis tem o valor inicial e é aumentado ou decrementado de um valor dependendo da velocidade do emissor. Atraso na propagação de cada emissor = [1, NT_c], a partir daí



repete-se.

Bits de informação:

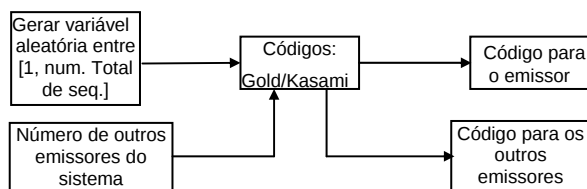


Fig. 11 – Geração de Bits

Códigos de espalhamento

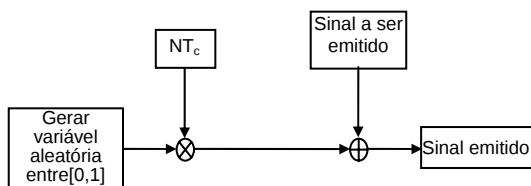


Fig. 12 – Atribuição de códigos de espalhamento

Atraso na propagação

Fig. 13 – Geração de atraso de propagação (atraso entre 1 e NT_c)

G. Ruído do Canal

O ruído considerado no sistema é o ruído branco aditivo com média nula, baseado na distribuição Gaussiana:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

sendo $-\infty < x < +\infty$ e σ^2 variância de x .

Por causa de dificuldade de obtenção da função de distribuição a partir da expressão anterior, é usada em alternativa a distribuição de Rayleigh^[7]. A função densidade de Rayleigh está relacionada com um par de variáveis aleatórias (C, D), através da seguinte relação:

$$\begin{cases} C = R \cos \theta \\ D = R \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

onde θ é uniformemente distribuída no intervalo $[0, 2\pi]$.

A função distribuição é dada por:

$$F(R) = \begin{cases} 0 & R < 0 \\ 1 - e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}} & R \geq 0 \end{cases} \quad (F(R) = A) \quad (9)$$

σ^2 é a variância das variáveis C e D .

Considerando apenas $R \geq 0$, gera-se R a partir da seguinte expressão:

$$R = \sqrt{2\sigma^2 \ln \left[\frac{1}{1-A} \right]} \quad (10)$$

O problema que se põe, é que a quantidade de ruído no sistema é quantificada em termos da razão sinal-ruído (SNR). A obtenção de σ^2 a partir (SNR) é dada por^[7]:

$$\sigma^2 = \frac{M_s}{2 \text{ SNR}} P_L \quad (11)$$

em que M_s é o número de amostras por símbolo e P_L é a potência total dada por:

$$P_L = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (12)$$

Em termos de simulação o seguinte diagrama descreve o processo de geração de ruído:

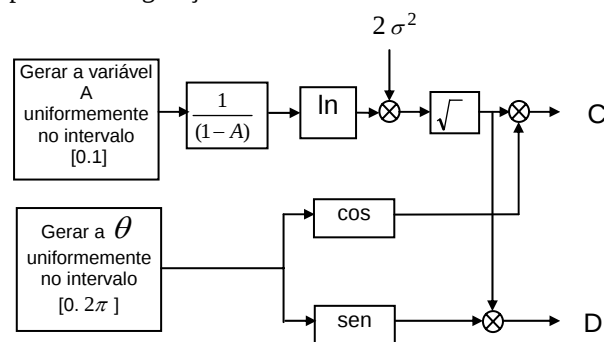


Fig. 14 – Geração do ruído no simulador

H. Resultados de Simulações

Apresentam-se em seguida alguns resultados de simulações variando os seguintes parâmetros do sistema: mobilidade dos emissores, nível de ruído e número de emissores. Os resultados referem-se ao uso de códigos de Gold com comprimento $N=63$.

Na figura 15 apresenta-se a probabilidade de erro estimada com 5 a 8 emissores fixos. Com uma razão sinal/ruído de -10 dB os erros na comunicação são, de facto, essencialmente devidos ao ruído no canal sendo praticamente independentes do número de utilizadores. Para $SNR = -5dB$ o número de utilizadores do canal já condiciona a taxa de erros. Note-se que com este sistema não se poderá permitir mais que 6 utilizadores se se pretender $Pe \leq 10^{-4}$.

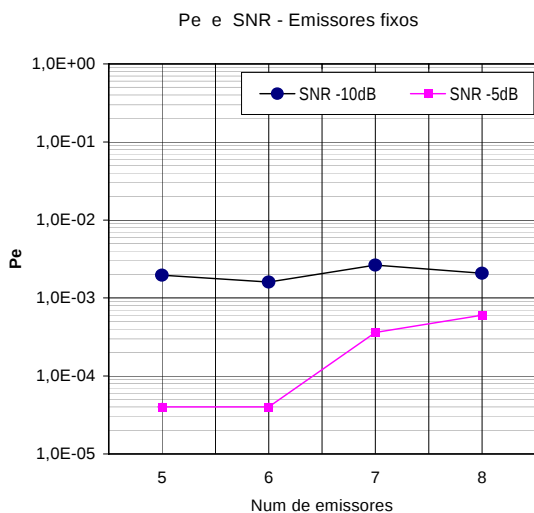


Fig. 15 - Probabilidade de erro estimado com emissores fixos

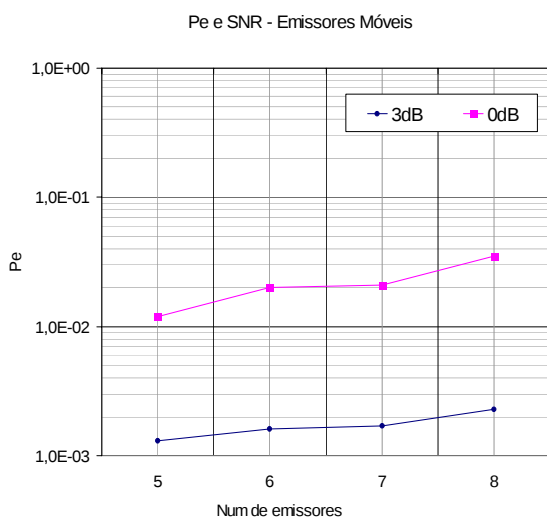


Fig. 16 - Probabilidade de erro estimado com emissores móveis.

Com emissores móveis, figura 16, a probabilidade de erro é maior, para os mesmos níveis de ruído. Isto deve-se ao facto de a perda de sincronismo devido ao movimento

ser mais frequente. Melhores desempenhos podem ser obtidos com um aumento da relação sinal/ruído.

Embora o número máximo de emissores que se espera neste sistema, como foi mencionado, seja de 5 a 8, números superiores poderão ser empregues, utilizando códigos de Gold ou Kasami com comprimentos maiores. No que respeita ao tempo de simulação, o método de Monte Carlo mostrou poder não ser a melhor escolha para estimação de erros devido ao prolongado processo de envio e recepção de bits de informação. O método *semi-analítico*^[7] pode ser uma alternativa.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo descreveu-se a construção de um simulador de comunicações especificamente para sistemas com modulação *spread spectrum*. Simuladores de sistemas baseados em outras técnicas, poder-se-ão construir baseando-se nos princípios aqui descritos.

Este artigo deriva do projecto do 5º ano de do curso de Engenharia Electrónica e Telecomunicações ano lectivo 1998/99 realizado por Valdemar Monteiro e Mário Andrade sob a orientação do prof. Doutor João Nuno Matos.

REFERÊNCIAS

- [1] Dr. Alex W. Lam,, Dr. Sawsad Tantaratana, "Theory and Application of Spread Spectrum Systems", IEEE, Maio 1994.
- [2] Schwartz Mischa, "Information Transmission Modulation and Noise", McGraw-Hill International Edition, 1990
- [3] M. Jueruchim, P. Balaban, K. Shanmugan, "Simulation of Communication Systems", Plenum Press, New York, 1992
- [4] George R. Cooper, Clare D. McGillem, "Modern Communication and Spread Spectrum", McGraw-Hill International Edition, 1996
- [5] José Pedro Cabral Diogo Pinto, "Modulação de Fase Contínua Multi-*h* com Espalhamento de Espectro por Sequência Directa em Comunicações Móveis Via Satélite", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Eng. Electrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico, Março 1998
- [6] Jhong Sam Lee, Leonard Miller, "CDMA Systems Engineering Handbook", J. S. Lee Associates, Inc. 1998
- [7] Floyd M. Gardner, John D. Baker, "Simulation Techniques- Models of Communication Signals and Processes", Wiley-Interscience Publication, 1997
- [8] John G. Proakis, Masoud Salehi, "Contemporary Communication Systems Using MATLAB ", PWS Publishing Company, 1998