

Desempenho da Técnica de Modulação Adaptativa sob o Enfoque da Geração de Surtos de Erros

E. Marques¹, N. Maciel¹, J. Galdino^{1,2} e E. Pinto²

Resumo—O desempenho de sistemas e redes de comunicações em canais com desvanecimento variante no tempo é significativamente afetado não apenas pela taxa de erro de bits média, mas também pela ocorrência de erros em surtos, que podem degradar bastante a operação de protocolos de comunicações de níveis superiores. Diversos trabalhos recentes têm mostrado que a técnica de modulação adaptativa é uma ferramenta eficaz para maximizar a eficiência espectral neste tipo de canal, atendendo a requisitos de desempenho de taxa de erro. No entanto, até onde vai o conhecimento dos autores o impacto desta técnica na geração de surtos de erros não tem sido investigado. Neste trabalho é feita uma comparação de desempenho entre a técnica de modulação adaptativa e técnicas convencionais de modulação fixa em canais com desvanecimento plano variante no tempo, sob o enfoque da geração de erros em surtos. Várias estatísticas usualmente empregadas na análise deste tipo de erro são levantadas por simulação, sob diferentes condições de transmissão. Os resultados obtidos mostram que o emprego de modulação adaptativa reduz sobremaneira a geração de erros em surtos, podendo fornecer para protocolos de níveis superiores um processo de erros de bit com vários parâmetros estatísticos próximos dos de um canal sem memória.

Palavras-Chave—Modulação Adaptativa, Erros em Surtos, Canais Rayleigh

Abstract—The performance of communications systems and networks over time-varying fading channels is significantly affected not only by the average bit error rate (BER), but also by the occurrence of burst errors that may seriously degrade the operation of upper-layer communication protocols. Several recent works have shown that the adaptive modulation technique is an effective tool to maximize the spectral efficiency subjected to BER constraints in this kind of channel. However, the impact of this technique in the generation of burst errors has not been addressed so far, to the best of our knowledge. A performance comparison between the adaptive modulation technique and conventional fixed modulations in time-varying flat-fading channels is presented in this work, with focus on the burst-error generation. Several statistics usually applied in the analysis of burst-error discrete channels are obtained by simulation, under different transmission conditions. The obtained results show that the adaptive modulation technique significantly reduce the occurrence of burst errors and can provide to the upper-layer protocols an error process that has several statistical parameters close to that of a memoryless channel.

Keywords—Adaptive Modulation, Burst Errors, Rayleigh Channels

I. INTRODUÇÃO

A demanda por altas velocidades de transmissão e baixas taxas de erro (BER) em canais sem fio limitados em banda e sujeitos ao efeito de desvanecimento variante no tempo tem motivado o desenvolvimento de técnicas de transmissão que apresentem bom compromisso entre taxa de erro e eficiência espectral [1], [2].

A camada física de sistemas de comunicações deve atender requisitos de desempenho (Qualidade de Serviço) que são geralmente expressos em termos de valores máximos de BER. Quando nessa camada são utilizadas estratégias de modulação clássicas (fixas), o dimensionamento dos parâmetros de transmissão é influenciado pelas piores condições de propagação do canal, acarretando a utilização ineficiente da potência de transmissão e, principalmente, da largura de banda que é um recurso cada vez mais escasso em sistemas de comunicação sem fio. Outra desvantagem da utilização das modulações convencionais em canais com desvanecimento é a variação da taxa de erro de bits com o tempo, em função da flutuação da relação sinal ruído (SNR) instantânea na entrada no receptor.

A modulação adaptativa, por seu turno, permite manter uma BER constante, além de produzir eficiência espectral média do que as técnicas de modulação fixa [3], sendo, portanto, muito mais atrativa do que as modulações convencionais, particularmente nas aplicações que admitem tráfego de taxa variável (VBR). Porém uma desvantagem da modulação adaptativa é que o transmissor deve conhecer as condições do canal para escolher a modulação a ser utilizada, isso requer o envio de informação de controle do receptor para o transmissor, através de um canal de retorno. Além disso, o receptor deve estimar ou ser informado da modulação empregada.

Apesar de aparentemente não ser muito enfatizada na literatura corrente, uma questão importante na avaliação de desempenho da camada física de sistemas de transmissão em canais com memória, como os canais caracterizados pelo efeito de desvanecimento, é a ocorrência de erros em surtos. Receptores que produzem comprimentos de surtos muito grandes, requerem estruturas de correção de erro mais complexas, as quais incluem, indubitavelmente, *interleavers* com grande profundidade, impactando negativamente no atraso de transmissão e nos requisitos de memória dos transceptores. Assim sendo, é importante não apenas conhecer as estatísticas de surtos, mas também desenvolver estratégias de transmissão que produzam erros pouco correlacionados, aspecto que facilitaria o projeto de códigos corretores de erro. Por outro lado, erros correlacionados podem degradar significativamente o desempenho de protocolos de comunicações originalmente desenvolvidos para lidar com erros independentes e identicamente distribuídos [4].

Fazendo-se a escolha adequada do tipo de modulação de acordo com as características instantâneas do canal, conforme procedimento adotado nas técnicas de modulação adaptativa, é razoável esperar reflexos positivos nas características de surtos, além da redução da probabilidade de erro média. Por exemplo, a mudança para uma modulação com menor quantidade de pontos na constelação durante um intervalo de tempo em que o canal apresenta uma SNR instantânea baixa pode ocasionar uma menor concentração de erros do que a obtida com uma

E. Marques, N. Maciel, J. Galdino e E. Pinto, ¹ Centro Tecnológico do Exército, ² Instituto Militar de Engenharia Emails: {melaine,nmaciel,jgaldino}@ctex.eb.br, ernesto@ime.eb.br

constelação de maior eficiência espectral. Apesar dessa conjectura ser razoável, até onde concerne nosso conhecimento, não existem trabalhos que avaliam estatísticas de surtos de erros de técnicas de modulação adaptativa e realizam comparação com as obtidas com modulações convencionais (fixas).

Neste artigo procura-se avaliar em maior profundidade a pertinência desta conjectura. Para tanto, é feita uma comparação e análise das estatísticas de erros em surtos obtidas através da simulação em computador de sistemas com modulação adaptativa e modulações QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) fixas.

O restante deste artigo está organizado como se segue: a Seção II apresenta alguns conceitos básicos sobre modulação adaptativa; a Seção III apresenta algumas estatísticas dos erros em surtos; a comparação das características dos erros obtidos usando-se a modulação adaptativa e as modulações fixas é feita na Seção IV e na Seção V são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. MODULAÇÃO ADAPTATIVA

A Figura 1 apresenta um esquema geral de um sistema de comunicação que emprega modulação adaptativa.

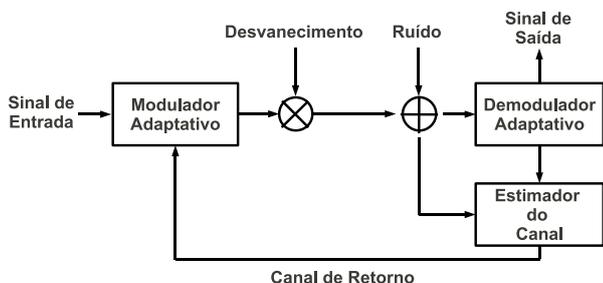


Fig. 1. Esquema geral de um sistema de comunicação com modulação adaptativa.

No modulador, os símbolos são gerados de acordo com a modulação escolhida com base nas condições atuais do canal. Essas condições são obtidas através de estimativas da SNR instantânea (SNR_i) no lado da recepção. Para isso são geralmente empregadas sequências de treinamento que antecedem os dados a serem transmitidos em cada slot de tempo de uma estrutura TDM (*Time Division Multiplexing*), por exemplo.

Neste trabalho o esquema de modulação adaptativa emprega, além da possibilidade de não realizar transmissão diante de severas condições do canal, 4 (quatro) estratégias de modulação QAM, a saber: QAM-4, QAM-16, QAM-64 e QAM-256. Todas as constelações possuem energia média de símbolo iguais a E_s . Para a escolha do modo de transmissão são estabelecidos limiares (S_n) de acordo com a BER que se deseja alcançar, como apresentado abaixo:

$$\text{Modo} = \begin{cases} \text{Não transmite} & \text{se } S_1 > SNR_i \\ QAM - 4 & \text{se } S_1 \leq SNR_i < S_2 \\ QAM - 16 & \text{se } S_2 \leq SNR_i < S_3 \\ QAM - 64 & \text{se } S_3 \leq SNR_i < S_4 \\ QAM - 256 & \text{se } SNR_i \geq S_4 \end{cases} \quad (1)$$

Os limiares S_n são calculados de modo a maximizar a eficiência espectral, atendendo à condição de se obter uma BER menor ou igual à BER desejada. Este é portanto um problema de otimização não linear com restrição [5].

Após a modulação, o sinal é transmitido através de um canal com desvanecimento plano e é corrompido por ruído aditivo gaussiano branco. O sinal assim gerado é empregado no lado de recepção para recuperar a informação transmitida, bem como para obter uma estimativa da SNR_i. Essa estimativa é utilizada para definir o estado do canal, informação esta que é enviada ao transmissor via canal de retorno.

Como o sistema de modulação adaptativa altera a modulação de acordo com as condições de propagação do canal, é possível atingir baixos valores de BER usando-se modulações com elevada eficiência espectral quando o canal apresenta altos valores de SNR instantâneos, e modulações com eficiências espectrais menores quando o canal apresenta condições severas de propagação (SNR instantâneas baixas). Obtém-se assim uma pequena flutuação da BER ao longo do tempo, bem como uma BER média constante independente da SNR média do enlace. Isso pode ser atingido com a criteriosa escolha dos limiares de adaptação para cada valor de SNR média.

III. ERROS EM SURTOS

Nesta seção são introduzidas algumas definições sobre erros em surtos. Uma sequência de erros é representada por uma sequência binária onde o “1” denota um bit errado e o “0” um bit recebido corretamente. Como pode ser visto na Figura 2, um *cluster* (C) é uma sequência de erros consecutivos cujo comprimento é dado pelo número de “1” [6] e *gap* (G) é definido como uma sequência de “0” entre dois “1”, tendo comprimento igual ao número de “0” [7].

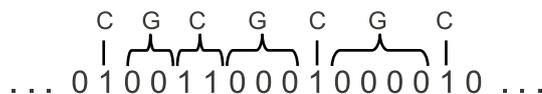


Fig. 2. Sequência de erros.

As estatísticas utilizadas neste trabalho para análise dos erros em surtos são apresentadas a seguir:

- $G(m_g)$: Probabilidade de *gaps* de tamanho m_g [7];
- $C(m_c)$: Probabilidade de *cluster* de tamanho m_c [7];
- $P(0^m|1)$: Probabilidade de um erro ser seguido de pelo menos m bits sem erros. É uma função decrescente com $P(0^0|1) = 1$ e $P(0^m|1) \rightarrow 0$ quando $m \rightarrow \infty$ [6];
- $P(1^m|0)$: Probabilidade de um bit correto ser seguido por ao menos m bits errados [6];
- $\rho(m)$: Função autocorrelação do processo de erros. $\rho(m)$ equivale à probabilidade de ocorrência de dois erros (dois “1”) em decisões separadas por um intervalo correspondente a $m - 1$ índices de tempo, ou seja, $\rho(m) = P(10^{m-1}1)$.

IV. RESULTADOS

Esta seção apresenta uma comparação das estatísticas dos erros em surtos obtidos através de simulações em computador da modulação adaptativa e das modulações QAM fixas. Foram simulados canais Rayleigh com espectro Doppler de Jackes onde foram considerados duas situações de espalhamento Doppler normalizado $f_D T = 10^{-4}$ (caso 1) e $f_D T = 10^{-3}$ (caso 2).

A Tabela I apresenta os valores de E_s/N_0 necessários para se obter $BER = 10^{-2}$ para cada modulação QAM fixa de acordo com a relação teórica entre os valores de BER e SNR para canais Rayleigh [8].

TABELA I

 VALORES DE E_s/N_0 PARA OBTER $BER = 10^{-2}$ EM CANAIS RAYLEIGH

Modulação	QAM-4	QAM-16	QAM-64	QAM-256
E_s/N_0	16,858 dB	22,828 dB	28,055 dB	33,194 dB

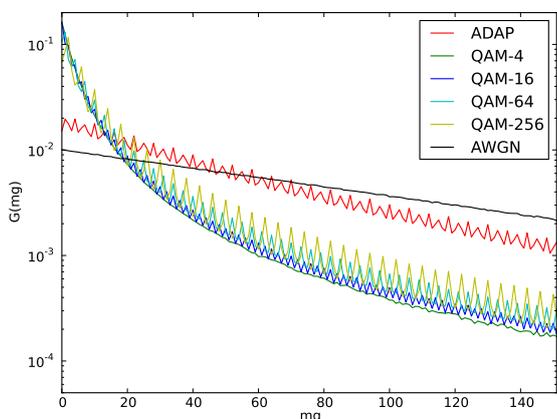
Para as transmissões com modulação adaptativa de $BER = 10^{-2}$, adotou-se $E_s/N_0 = 16,85dB$, pois corresponde ao menor valor que seria necessário para se obter a BER desejada nas modulações QAM fixas utilizadas (Tabela I). Para cada valor de $f_D T$ foram sorteadas 1000 realizações do canal, com cada uma delas se simulou a transmissão de 15000 pacotes de símbolos de comprimento 10. O canal de retorno foi considerado ideal, ou seja livre de erros de transmissão e sem atrasos.

Em seguida, transmitiu-se a mesma quantidade de informação utilizando cada modulação QAM fixa separadamente, respeitando os valores de E_s/N_0 apresentados na Tabela I. Para cada tipo de modulação também foram sorteadas 1000 realizações do canal. Os valores de BER média obtidos em cada modulação são apresentados na Tabela II. Como pode ser observado, os valores de BER estimados foram próximos do valor alvo de 10^{-2} .

TABELA II

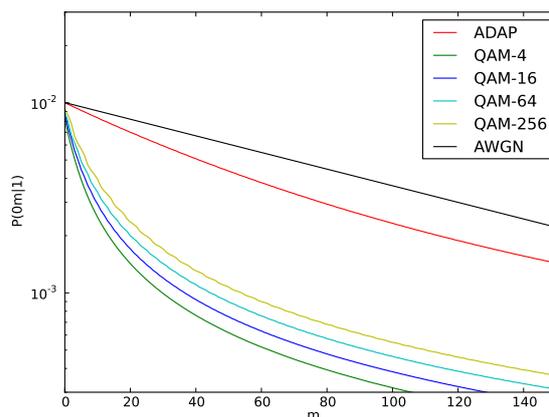
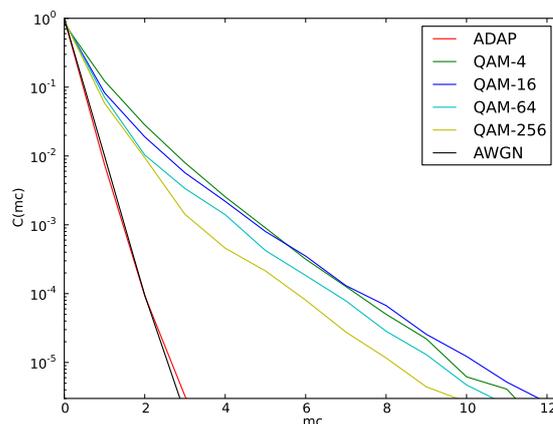
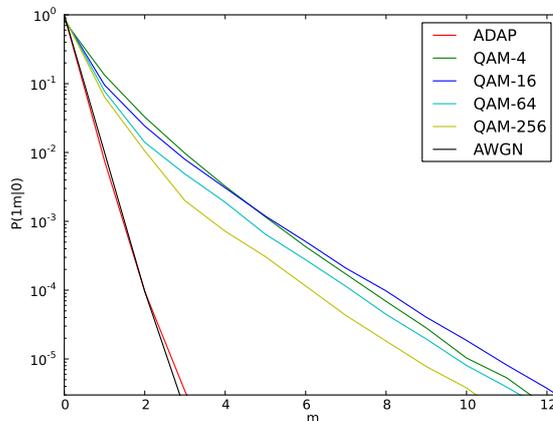
VALORES MÉDIOS DE BER ALCANÇADOS NAS SIMULAÇÕES.

	ADAP	QAM-4	QAM-16	QAM-64	QAM-256
Caso 1	0,009949	0,009773	0,009911	0,009789	0,009831
Caso 2	0,009975	0,009740	0,009761	0,009769	0,009797


 Fig. 3. Distribuição de probabilidade de gaps para $f_D T = 10^{-4}$.

Para apoiar a análise, foram também simuladas 1000 realizações de um canal AEGN com modulação BPSK para a transmissão da mesma quantidade de informação usada nos casos anteriores, mantendo-se a BER em 10^{-2} . Os erros neste caso são independentes pois não sofrem nenhum processo com memória como é o caso do desvanecimento no canal Rayleigh para as outras modulações usadas.

Da Figura 3 à Figura 6 são apresentadas em escala logarítmica, respectivamente, as estimativas obtidas para a distribuição de probabilidade de gaps, as probabilidades $P(0^m|1)$, distribuição de probabilidade de clusters e as probabilidades $P(1^m|0)$ para as sequências de erros geradas considerando $f_D T = 10^{-4}$ e para o caso com canais AWGN. Já as Figuras 7 e 8 apresentam, em escala logarítmica, a estimativa da função autocorrelação para valores do argumento inferiores a 100.


 Fig. 4. Probabilidades $P(0^m|1)$ para $f_D T = 10^{-4}$.

 Fig. 5. Distribuição de probabilidade de clusters para $f_D T = 10^{-4}$.

 Fig. 6. Probabilidades $P(1^m|0)$ para $f_D T = 10^{-4}$.

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 3 e 4 nota-se que com a modulação adaptativa foram obtidas probabilidades maiores do que as obtidas com modulações fixas para tamanhos de gaps grandes. Foram também obtidas menores probabilidades em relação às outras modulações para gaps pequenos. Estes fatos sugerem que ocorrem maiores afastamentos entre os erros e também maiores comprimentos de blocos de bits corretos consecutivos quando se usa modulação adaptativa. O mesmo pode ser visto através da distribuição de probabilidades $P(0^m|1)$, que apresenta valores maiores quando se usa modulação adaptativa. É interessante observar que a modulação adaptativa apresenta comportamento mais próximo do caso com canais AWGN do que as modulações QAM fixas.

Já nas Figuras 5 e 6 percebe-se outra característica vantajosa da modulação adaptativa que é a diminuição do tamanho dos clusters. Nota-se nestas figuras o tamanho máximo de cluster alcançado é menor que nos casos das modulações QAM fixas. Além disso, para todos os tamanhos de clusters e valores de m , a probabilidade de ocorrência é menor quando se usa modulação adaptativa.

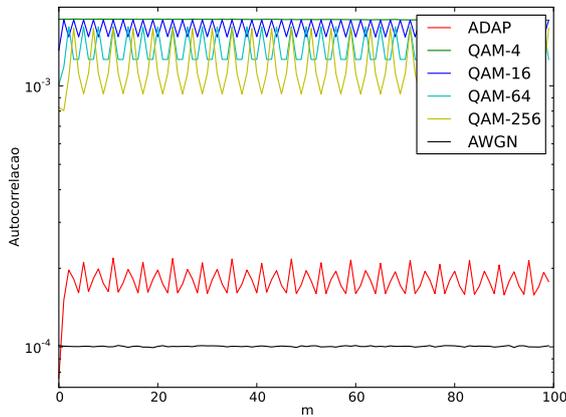


Fig. 7. Autocorrelação para $f_D T = 10^{-4}$ e argumento inferior a 100.

As estimativas das funções autocorrelação dos processos de erros para valores do argumento inferiores a 100 são mostradas na Figura 7. As modulações QAM convencionais apresentam correlação que varia consideravelmente com m seguindo uma estrutura associada à metade da quantidade de bits por símbolo da modulação.

Já a Figura 8 apresenta estimativas de autocorrelação obtidas nas mesmas condições, porém agora para tamanhos de *lags* maiores e com incrementos múltiplos da metade da quantidade de bits por símbolo da modulação, quando se trata de modulação fixa. Para a modulação adaptativa escolheu-se incremento múltiplo de 12 por ser um múltiplo comum dos incrementos das modulações QAM fixas que são usadas como opções na modulação adaptativa.

Observa-se na Figura 8 maior decorrelação dos erros na modulação adaptativa em relação aos erros produzidos pelas técnicas de modulação QAM fixas.

A estratégia adaptativa gera padrão de erro que pode ser aproximado pelo modelo de erros independentes tipicamente gerado por canais AWGN, que pode facilitar a análise de desempenho de estratégias de transmissão adaptativa, bem como pode simplificar bastante o projeto de estratégias de correção de erro.

Com o intuito de verificar se este tipo de comportamento se

mantém para outros canais Rayleigh, são apresentadas em seguida estatísticas obtidas para $f_D T = 10^{-3}$. Com o aumento do valor de $f_D T$ espera-se que os erros fiquem mais decorrelacionados, pois o canal varia mais rapidamente, reduzindo portanto o efeito da memória do canal sobre os erros.

As Figuras 9 até 13 ilustram, em escala logarítmica, as estimativas obtidas neste caso para as mesmas estatísticas de erros em surtos discutidas anteriormente para $f_D T = 10^{-3}$. Verifica-se também nestas figuras que a modulação adaptativa continua sendo a que tem estatísticas mais próximas do caso com erros independentes.

Constata-se portanto, que a modulação adaptativa tem melhor desempenho em termos de estatísticas de erros em surtos do que as modulações QAM fixas. Vale ressaltar que os resultados da modulação adaptativa foram alcançados com valor de E_s/N_0 inferior aos adotados para as modulações QAM-16, QAM-64 e QAM-256.

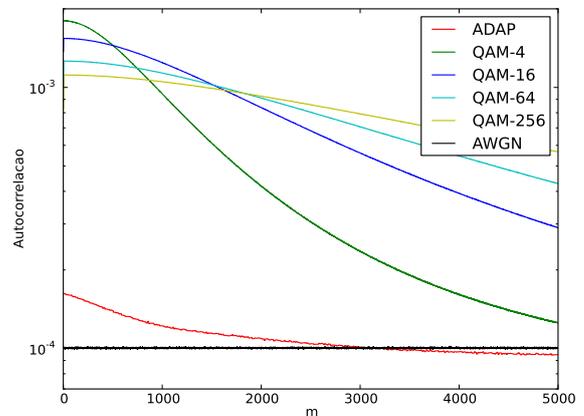


Fig. 8. Autocorrelação para $f_D T = 10^{-4}$ e argumento variando até 5000.

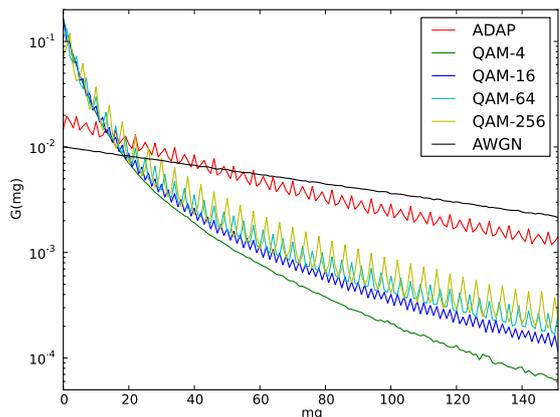
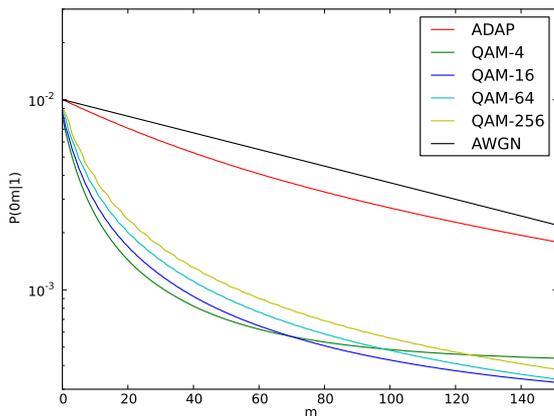
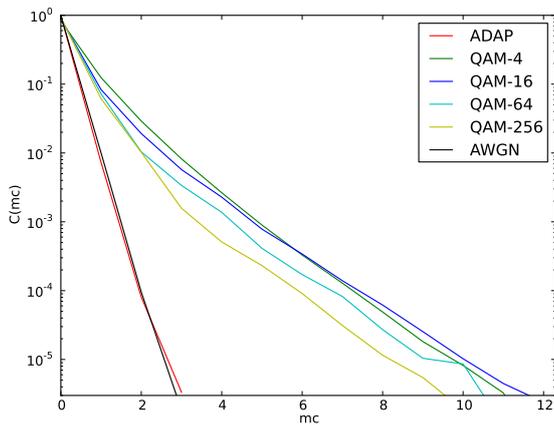
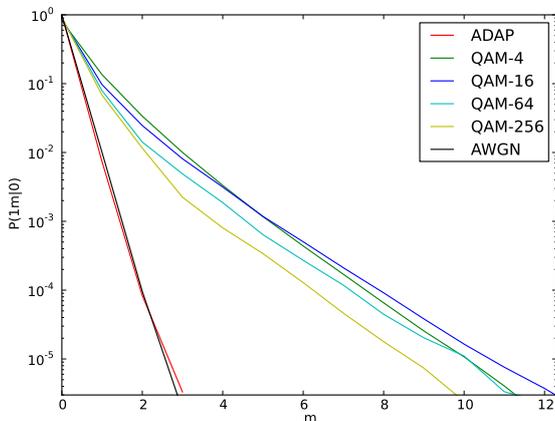
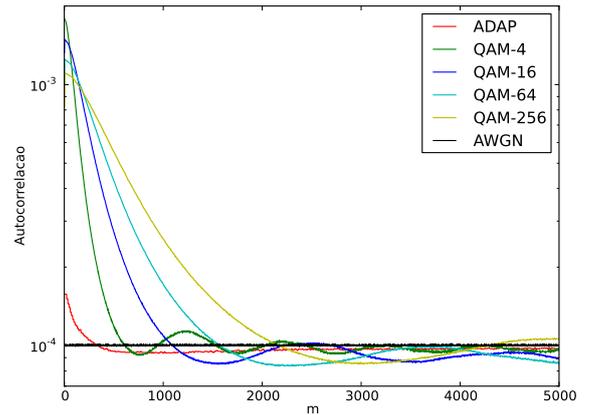


Fig. 9. Distribuição de probabilidade de gaps para $f_D T = 10^{-3}$.

V. CONCLUSÃO

A utilização da modulação adaptativa no lugar das modulações QAM fixas em canais sem fio com desvanecimento apresenta diversas vantagens já ressaltadas em outros trabalhos. Dentre elas, podemos destacar a utilização de forma eficiente da largura de banda e da potência de transmissão.

Neste artigo, constatou-se que além das vantagens já conhecidas, a modulação adaptativa reduz drasticamente a correlação


 Fig. 10. Probabilidades $P(0^m|1)$ para $f_D T = 10^{-3}$.

 Fig. 11. Distribuição de probabilidade de clusters para $f_D T = 10^{-3}$.

 Fig. 12. Probabilidades $P(1^m|0)$ para $f_D T = 10^{-3}$.

 Fig. 13. Autocorrelação para $f_D T = 10^{-3}$ e argumento variando até 5000.

entre erros, podendo até ser considerado o modelo de erros independentes para descrever os erros produzidos por esta estratégia de modulação. Esta característica pode levar a uma grande simplificação no projeto de codificadores e decodificadores de canal bem como contribuir para melhoria no desempenho de protocolos de comunicação de níveis superiores.

Como trabalho futuro pretende-se desenvolver modelos para processos de erros gerados com modulação adaptativa em canais com desvanecimento e avaliar os impactos do emprego desta técnica sobre o desempenho de protocolos de enlace.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio que prestaram à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Dongya Shen, Anxian Lu, Yanni Cui, Fuqiang Kuang, Xiupu Zhang, Ke Wu, and Jianping Yao. On the Channel Capacity of MIMO Rayleigh-Lognormal Fading Channel. In *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2010*, pages 156–159, may 2010.
- [2] M.Z. Alam, C.C. Patra, C. Patra, and M.A. Sobhan. Bit Error Rate (BER) Performance Enhancement Technique of a Wireless Fading Channel. In *International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, 2009*, volume 4, pages 647–650, aug. 2009.
- [3] J. F. Galdino. Modulação Adaptativa: Princípios e Características de Desempenho. In *Revista Militar de Ciencia e Tecnologia*, pages 17–28, 2 Quadrimestre 2008.
- [4] C. X. Wang and Wen Xu. A New Class of Generative Models for Burst-Error Characterization in Digital Wireless Channels. *IEEE Transactions on Communications*, 55:453–462, March 2007.
- [5] J. F. Galdino and E. C. Gurjao. Otimização de Limiares para Adaptação de Modulação Diante de Erros no Canal de Retorno. In *XXVI Simposio Brasileiro De Telecomunicacoes*, 2008.
- [6] B. D. Fritchman. A Binary Channel Characterization Using Partitioned Markov Chains. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 13(2):221–227, April 1967.
- [7] S. Tsai. Markov Characterization of the HF Channel. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 17(1):24–32, 1969.
- [8] W.T.A. Lopes, W.J.L. Queiroz, F. Madeiro, and M.S. Alencar. Exact Bit Error Probability of M-QAM Modulation over Flat Rayleigh Fading Channels. In *Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International*, pages 804–806, 29 2007-nov. 1 2007.