

Avaliação de Códigos Corretores de Erro para a Comunicação de Dados na Rede Elétrica

Michelle Foltran Miranda, Eduardo Parente Ribeiro e Walter Godoy Jr

Resumo— A principal contribuição deste artigo é verificar o desempenho de códigos corretores de erro em sistemas de multiplexação por divisão em frequência (OFDM) para a comunicação de dados na rede elétrica. Os códigos turbo, convolucional e de Reed-Solomon foram avaliados em simulações envolvendo ruído branco, ruído colorido e um caso de ruído medido da rede elétrica.

Palavras-Chave— Sistema OFDM, códigos corretores de erro, códigos turbo, rede elétrica.

Abstract— The main contribution of this work is to verify the performance of error correction codes in Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems for data communication on a power line channel. Turbo code, convolutional code and Reed-Solomon code were evaluated in simulations with white noise, colored noise e noise samples measured from a power outlet.

Index Terms— OFDM system, error correction code, turbo code, power line communication.

I. INTRODUÇÃO

A rede elétrica está presente em praticamente todas as construções e residências e está sendo considerada um meio conveniente e barato para a comunicação de dados. Em áreas onde as soluções de telefonia ou via cabo não podem ser encontradas, a comunicação através da rede elétrica torna-se uma solução vantajosa e comparável às soluções sem fio.

A tecnologia PLC (Power Line Communication) pode então ser utilizada para a transmissão de dados, oferecendo um barramento para formar uma grande rede de dados. Embora a rede elétrica seja um meio muito atrativo, existem algumas dificuldades na implementação de um sistema para a transmissão de dados. Originalmente designada para o fornecimento de energia, a rede elétrica possui características hostis como meio de comunicação. Ao contrário de muitos outros canais de comunicação, o ruído presente na rede

elétrica não pode ser descrito como simplesmente um ruído gaussiano branco aditivo (AWGN).

Um outro problema encontrado pela tecnologia PLC é a quantidade excessiva de interferência eletromagnética radiada para outros sistemas. Isso poderia ser contornado reduzindo-se a potência do sinal transmitido mas causando uma diminuição da relação sinal-ruído (SNR), o que leva a um aumento da taxa de erro de bit (BER). Faz-se necessária a escolha de bons códigos corretores de erro, cujos desempenhos são bem conhecidos para canais com ruído AWGN, mas não para a rede elétrica. Devido às características variantes no tempo desse canal hostil, um modelo preciso para a rede elétrica ainda foi estabelecido [1,2]. Dessa forma, a implementação de um sistema para transmissão de dados pela rede elétrica torna-se um problema desafiador.

Este artigo compara os desempenhos de alguns códigos corretores de erro em um ambiente de simulação utilizando ruídos sintéticos bem como amostras de ruído medido da rede elétrica. A técnica de multiplexação por divisão em frequência (OFDM) [3] é considerada e o método de Monte Carlo é usado para estimar a curva BER versus SNR de um determinado código corretor de erro para o canal PLC. Os códigos convolucionais, de Reed-Solomon e turbo [4-9] são investigados. As curvas de desempenho também são traçadas para canais com ruído colorido e ruído branco para comparação.

Estes códigos corretores de erro podem ser utilizados em várias aplicações. Para a modulação DMT (Discrete Multitone) [10,11] utilizada no padrão ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Lines) [12] é adotada a codificação de Reed-Solomon e os códigos convolucionais podem ser opcionalmente aplicados. Os códigos turbo são uma nova classe de códigos convolucionais cujo desempenho em termos da taxa de erro de bit está próximo ao limite de Shannon. O codificador é construído utilizando uma concatenação em paralelo de dois códigos convolucionais sistemáticos recursivos e um método iterativo é adotado para a decodificação associada.

Neste artigo, o sistema de transmissão OFDM sem codificação e com codificação convolucional, de Reed-Solomon e turbo são descritos na seção II, a qual também apresenta a metodologia de simulação. A seção III mostra os resultados para os ruídos sintéticos e para o ruído medido da rede elétrica. As conclusões são exibidas na seção IV.

II. METODOLOGIA

A. Sistema de Transmissão OFDM sem Codificação

Em um sistema de transmissão OFDM, como mostrado na Fig.1, os bits a serem transmitidos são alocados a N subcanais e são mapeados em símbolos complexos QAM. Estes valores complexos junto ao seu conjugado simétrico são então enviados para a operação de IFFT, formando $2N$ valores. O vetor resultante é convertido em um sinal contínuo no tempo através de um conversor digital para analógico (D/A) para ser transmitido pelo canal. Durante a transmissão, este sinal estará sujeito a ruído, o qual causará erros no sistema.

Nas simulações, 256 subcanais são considerados e 4 bits de entrada (b_i , onde i indica o número do subcanal) são alocados a cada subcanal. Um mapeador 16-QAM e um operador IFFT de comprimento 512 são adotados.

A Fig. 2 mostra o diagrama em blocos da recepção. Após a conversão analógico-digital (A/D), o sinal recebido atinge o operador FFT, fornecendo Y_i valores complexos. Em seguida, o sinal resultante é convertido em bits pelos re-mapeadores QAM que são as entradas para um conversor paralelo-serial.

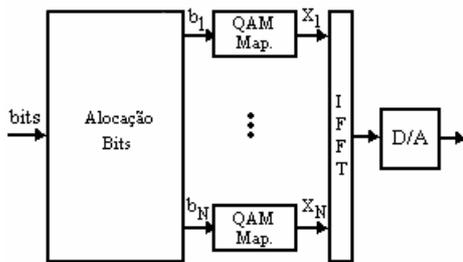


Fig. 1: Sistema de transmissão OFDM sem codificação

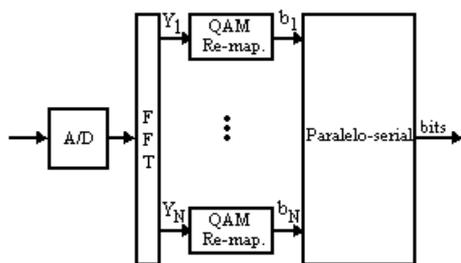


Fig.2: Sistema de recepção OFDM sem codificação

B. Códigos de Reed-Solomon em Sistemas OFDM

Os códigos de Reed-Solomon (RS) são códigos BCH não-binários utilizados em diversas aplicações. No padrão ADSL [12], os códigos RS em GF(256) são recomendados, ou seja, cada símbolo do código é um byte. Um código RS de comprimento de bloco n e de k símbolos de informação é denotado por RS(n,k). Ele possui redundância $r = n - k$ e tem capacidade de correção de até t símbolos errados, onde $r = 2t$.

Nas simulações apresentadas neste artigo, é adotado o código RS(255,216) em GF(256) como em [13] e é realizada uma decodificação em decisão abrupta.

O sistema de transmissão está ilustrado na Fig. 3. Os bits de informação atravessam o codificador RS e são alocados em 256 subcanais (N). No caso da modulação 16-QAM, 4 bits (b_i , $i=1\dots N$) são inseridos em cada subcanal. Em seguida, um mapeamento natural QAM é aplicado ao longo desses subcanais, formando X_i símbolos complexos. O resultado é a entrada para um operador IFFT com 512 pontos.

A Fig.4 mostra o esquema para a decodificação de Reed-Solomon. Na recepção, a operação de FFT é realizada e os Y_i símbolos QAM são re-mapeados. Os bits em cada subcanal (b_i) passam por um conversor paralelo-serial e atingem o decodificador RS.

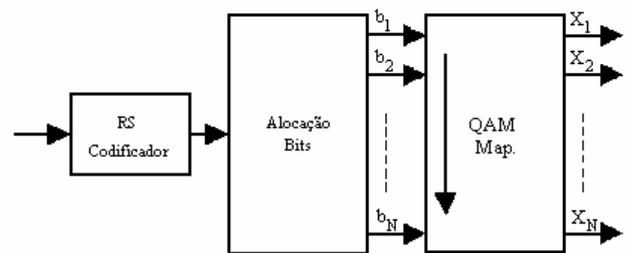


Fig.3: Codificador RS no sistema OFDM

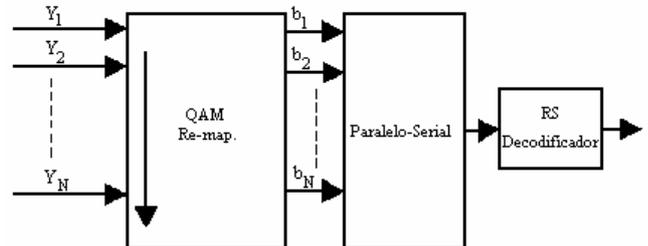


Fig. 4: Decodificador RS no sistema OFDM

C. Códigos Convolucionais em Sistemas OFDM

Uma alternativa para a codificação em treliça é a utilização de um código convolucional binário junto a um esquema de modulação não-binária, como o QAM [3,14]. Os dados binários de entrada são convertidos em símbolos QAM de acordo com um mapeamento Gray. Para o caso de 16-QAM, as componentes em fase e quadratura são tratadas separadamente como sinais PAM (Pulse Amplitude Modulation) de 4 níveis, determinadas por dois bits b_0 e b_1 , como mostrado na Fig. 5. Como exemplo, se os bits 1011 são alocados em um determinado subcanal, o mapeador Gray deverá traduzir os dois primeiros bits (10) para +3 e os dois últimos (11) para +1, formando o símbolo complexo $3+j$.

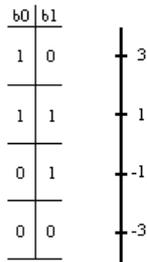


Fig. 5: Mapeamento Gray de dois bits em PAM de 4 níveis

Na recepção, os símbolos QAM devem ser transformados em valores unidimensionais, os quais caracterizam as métricas que serão quantizadas em 8 níveis para o decodificador de Viterbi. No caso do 16-QAM, os valores em fase e quadratura são tratados independentemente como sinais PAM de 4 níveis, que são re-mapeados em duas métricas, como mostrado na Fig. 6. Supondo que o símbolo complexo $3+j$ é recebido, a parte real deverá produzir duas métricas de acordo com as retas da Fig. 6. Neste caso, ela é traduzida em dois valores: $+3$ e -1 . A componente imaginária também fornecerá dois valores: $+1$ e $+1$. São essas métricas ($+3 -1 +1 +1$) que, após quantizadas, são enviadas para a decodificação.

Nessa análise, foi empregado um código convolucional de taxa $1/2$, constraint length 7 e vetor gerador $g=[133,171]$. Este código é um dos mais utilizados, como citado em [3].

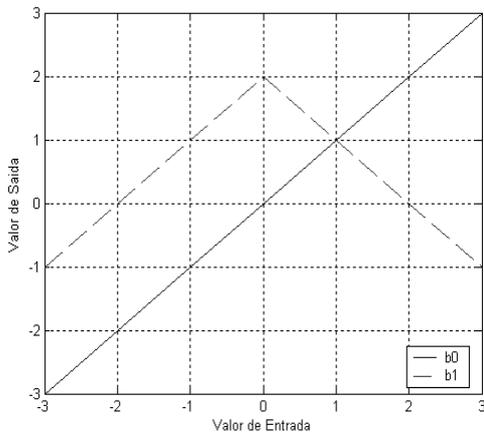


Fig. 6: Re-mapeamento de 4 níveis PAM em 2 métricas

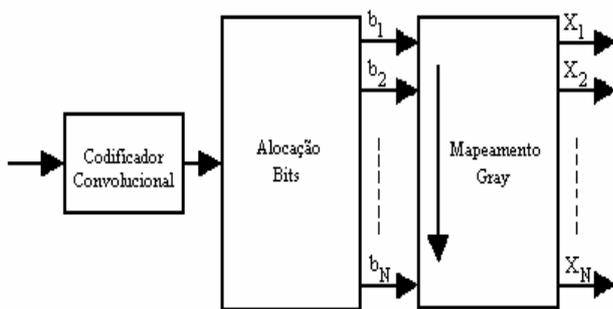


Fig. 7: Codificador convolucional no sistema OFDM

A Fig. 7 mostra o esquema para transmissão. Os bits de informação atravessam o codificador convolucional e são alocados em 256 subcanais, formando 4 bits (b_i) em cada subcanal. Estes bits servem de entrada para um mapeador Gray, resultando em símbolos complexos (X_i) que são enviados a um bloco de IFFT com 512 pontos.

Na recepção, como mostrado na Fig. 8, o sinal recebido é a entrada para o operador de FFT. Em seguida, os símbolos complexos (Y_i) são separados em componentes em fase e quadratura que são tratadas independentemente para fornecer as métricas binárias para o decodificador de Viterbi. No caso da modulação 16-QAM, quatro métricas são obtidas. Essas métricas são então quantizadas em níveis de 3 bits e são as entradas para o decodificador binário de Viterbi, que realizará uma decisão suave estimando os bits enviados.

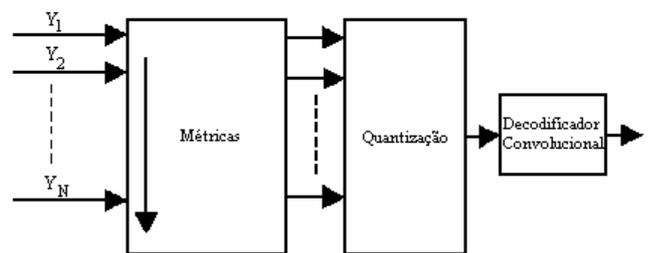


Fig. 8: Decodificador convolucional no sistema OFDM

Códigos Turbo em Sistemas OFDM

O desempenho dos códigos turbo tem se mostrado próximo ao limite de Shannon para canais AWGN. Um codificador binário padrão é formado por dois códigos convolucionais sistemáticos recursivos (RSC_1 e RSC_2) separados por um entrelaçador. Um algoritmo de decodificação MAP (*maximum a posteriori*) é utilizado em um processo iterativo para fornecer o melhor desempenho do sistema. Neste trabalho, um código turbo binário de taxa $1/2$ e vetor gerador $g=[11111; 10001]$ é utilizado para codificar os bits de informação. Foram realizadas 3 iterações durante a decodificação, o que representa um compromisso entre qualidade (menos erros) e velocidade.

Vários esquemas de modulação codificada em treliça (TCM) para os códigos turbo foram investigados [6, 7]. Nessas referências, os códigos turbo são associados à modulação QAM e a sua performance também se aproxima do limite de Shannon. Os códigos turbo podem ser aplicados ao sistema DMT [8, 9]. A Fig. 9 mostra o esquema para a codificação.

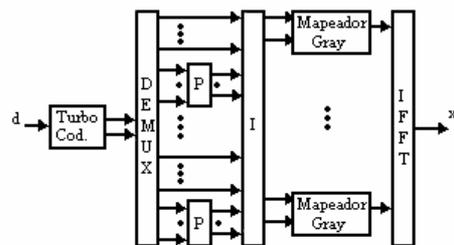


Fig. 9: Codificador turbo no sistema OFDM

As saídas do codificador turbo são demultiplexadas e separadas em componentes sistemáticas e de paridade. Uma função de puncturing (P) é inserida para possibilitar a obtenção de uma família maior de códigos, com diferentes taxas R. Nas simulações, o puncturing foi utilizado a fim de se obter uma taxa de codificação igual a $\frac{1}{2}$, transmitindo-se a informação sistemática e o bit ímpar de paridade do RSC₁ e então a próxima informação sistemática e o bit par de paridade do RSC₂. A fim de obter símbolos afetados por ruídos não-correlacionados na entrada do decodificador turbo, os bits passam por um entrelaçador (I). Neste trabalho, um entrelaçador pseudo-randômico de tamanho 512 é adotado para embaralhar os bits codificados. Estes bits são então alocados em 256 subcanais, cada um contendo 4 bits e são as entradas para os mapeadores QAM Gray. As saídas dos mapeadores são convertidas em sinal de transmissão através da operação de IFFT com 512 pontos.

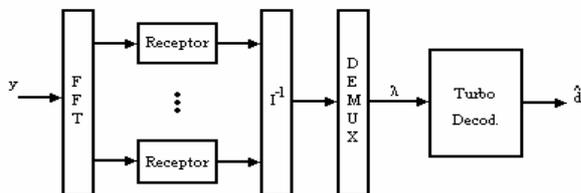


Fig. 10: Decodificador turbo no sistema OFDM

No receptor, como na Fig. 10, obtém-se a FFT do sinal e o bloco receptor obtém a log-verossimilhança *a posteriori* (LLR) dos símbolos recebidos [6], de maneira análoga à obtenção das métricas usadas na decodificação convolucional. Em seguida, os LLRs (?) atravessam um de-entrelaçador (I^{-1}), são demultiplexados e usados como entrada para o decodificador turbo padrão.

D. Simulações

A simulação do sistema de comunicação foi realizada através do programa Matlab. Três canais de comunicação foram considerados nas simulações realizadas neste trabalho: um canal com ruído branco, um canal com ruído colorido e um canal com ruído medido da rede elétrica.

A fim de verificar a influência do ruído colorido, dois tipos diferentes de ruído foram considerados. O primeiro foi obtido filtrando-se o ruído AWGN através de um filtro passa-faixa digital butterworth de ordem 5 com frequências de corte em 12kHz e 16kHz. O segundo também foi obtido através da filtragem do ruído AWGN utilizando-se o mesmo filtro com largura de banda menor (15kHz a 16kHz).

Um modelamento para o canal da rede elétrica ainda não está bem estabelecido, embora existam alguns trabalhos a respeito do tema [1, 2]. Há vários fatores que contribuem para essa dificuldade de modelagem: variações em frequência e atenuações variantes no tempo que ocorrem no meio, dependência do modelo do canal com a localização, topologia de rede e cargas conectadas, alta interferência devido a cargas ruidosas, elevado ruído colorido e ruído impulsivo. Neste trabalho, somente o ruído de interferência foi considerado e a

função de transferência do sistema foi suposta como um passa-tudo em série com um passa-altas para reproduzir o acoplamento do transceptor com a rede. Dessa forma, embora se tenha um cenário menos realista, o efeito do ruído em diferentes códigos corretores de erro pode ser mais bem isolado, permitindo uma comparação controlada. Optou-se por realizar medições para a obtenção do ruído da rede elétrica para se avaliar como um caso específico com ruído real se afasta de uma modelagem genérica com ruído sintético branco gaussiano. Foi utilizado um conversor analógico-digital de 12 bits com frequência de amostragem em 40kHz para obter 60.000 amostras de ruído da rede elétrica. Um filtro passa-altas com frequência de corte em 200 Hz e um filtro anti-aliasing (passa-baixas) em 20 kHz foram utilizados. Além da medição direta da rede elétrica, foram feitas mais duas medições adicionando como interferência um sinal senoidal na frequência de 19kHz, com amplitudes arbitrárias de 1V e 6V injetados por um gerador de sinais acoplado através de um transformador, com o intuito de simular a interferência de uma onda contínua em uma frequência fixa.

Os sistemas sem codificação e com diferentes tipos de codificação (convolucional, Reed-Solomon e turbo) foram implementados e os desempenhos foram analisados para o caso de um canal com AWGN para a modulação OFDM com 16-QAM. A fim de verificar a influência do ruído colorido, o qual também está presente na rede elétrica, simularam-se os mesmos sistemas codificados para este tipo de canal. Em uma segunda etapa, estes mesmos sistemas foram submetidos ao ruído típico medido da rede elétrica com e sem a interferência de 19kHz. A banda de transmissão considerada em todos os casos foi de 10kHz a 20kHz. Foi adotado um filtro digital butterworth passa-altas de ordem 5 e com frequência de corte em 6 kHz na entrada do receptor a fim de eliminar resquícios da frequência de 60 Hz e suas harmônicas. Os gráficos da taxa de erro de bit (BER) em função da relação sinal-ruído (SNR) foram obtidos utilizando-se o método de Monte Carlo através da simulação do enlace completo dos sistemas. Para tanto, o dado de entrada é a relação sinal-ruído obtida pela razão de potências do sinal de transmissão e do sinal do ruído. Como resultado, obteve-se a BER para transmissões até a ocorrência de 500 bits errados.

III. RESULTADOS

A Fig. 11 mostra as curvas da taxa de erro de bit em função da relação sinal-ruído E_b/N_0 dos sistemas OFDM com modulação 16-QAM em um canal AWGN. Essas curvas obtidas estão de acordo com as curvas apresentadas na literatura [3]. Observa-se a superioridade dos códigos turbo em canais com ruído AWGN. Para 16-QAM, o sistema com codificação turbo apresenta-se superior quando comparado com os demais. Em uma BER de 10^{-6} , o ganho de codificação turbo em relação ao código RS é de 7 dB. Quando comparado com o código convolucional, o ganho é de 2 dB.

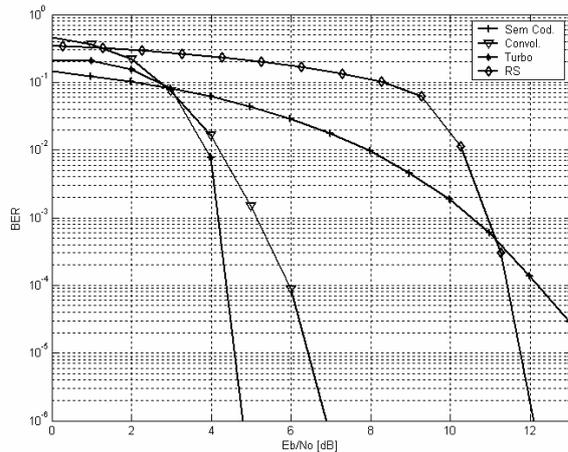


Fig. 11: Desempenho dos sistemas para o canal com ruído AWGN

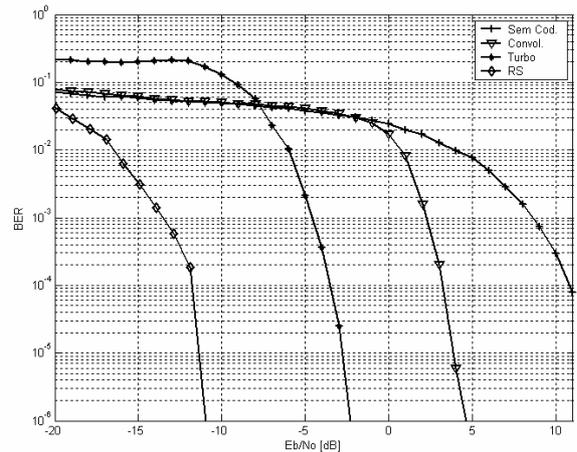


Fig. 13: Desempenho dos sistemas com ruído colorido (15-16kHz)

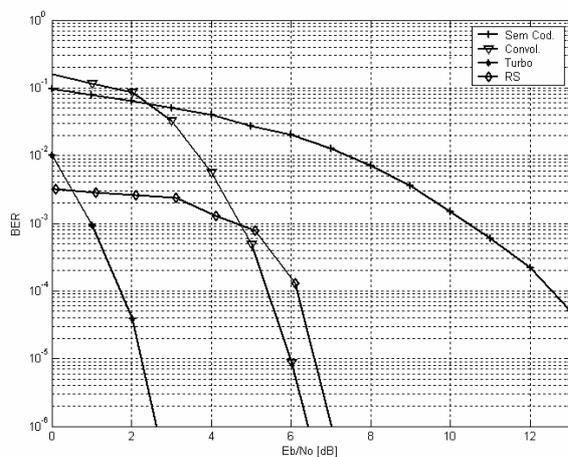


Fig. 12: Desempenho dos sistemas com ruído colorido (12-16kHz)

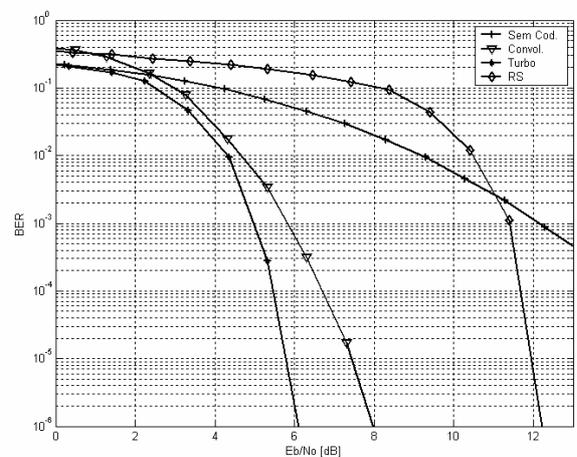


Fig. 14: Desempenho dos sistemas com ruído medido da rede elétrica

A fim de verificar o efeito do ruído colorido, os mesmos sistemas foram simulados em canais AWGN filtrados. Os desempenhos dos sistemas codificados para o canal com ruído colorido, na faixa 12 kHz a 16 kHz, estão mostrados na Fig. 12. Como uma quantidade menor de subportadoras é afetada pelo ruído colorido, nota-se melhora de desempenho para todos os códigos. Percebe-se ainda que em uma BER de 10^{-6} , o código convolucional apresenta um ganho menor que 0,5 dB quando comparado com o ganho de codificação do sistema convolucional para o canal AWGN (Fig. 11). No caso do código turbo, superior aos demais, este ganho é igual a 3 dB e para o código RS, atinge 5 dB.

Essa diferença em termos de ganho ocorre devido às distintas propriedades dos códigos corretores de erro. Como o código RS é um código não-binário (cada símbolo corresponde a 8 bits neste estudo), quando o ruído atinge uma quantidade menor de subcanais, apenas alguns símbolos serão afetados, o que aumenta o desempenho do sistema. A Fig. 13 mostra os desempenhos para um ruído colorido de menor largura de banda, filtrado com passa-faixas em 15 kHz a 16 kHz, que atinge uma faixa muito pequena de subcanais. Neste caso, o código RS mostra-se superior aos demais, pois poucos símbolos são afetados pelo ruído.

Em uma segunda etapa, os mesmos sistemas sem codificação e com codificação foram submetidos a um ruído medido da rede elétrica. A Fig. 14 exibe o desempenho desses sistemas. Verifica-se que o código turbo mantém-se superior quando comparado com o sistema sem codificação e apresenta-se melhor que o código convolucional e RS. Neste caso, em uma BER de 10^{-6} , o ganho de codificação turbo é de 6 dB em relação ao código RS e de 2 dB em relação ao código convolucional. Nota-se que o ganho de codificação para o canal da rede elétrica é inferior ao ganho quando o sistema é submetido ao canal AWGN.

A Fig. 15 mostra uma comparação entre o desempenho do código convolucional para o canal AWGN e para a rede elétrica sem sinal de interferência aplicado e com sinal de amplitudes arbitrárias em 1V e 6V. À medida que o sinal de tensão aumenta, o desempenho do sistema com ruído da rede elétrica torna-se inferior. Nota-se que a diferença de relação sinal-ruído por bit para o canal AWGN em 10^{-5} é de 1 dB em relação ao canal da rede elétrica, o que afasta o AWGN de um bom modelo para este caso.

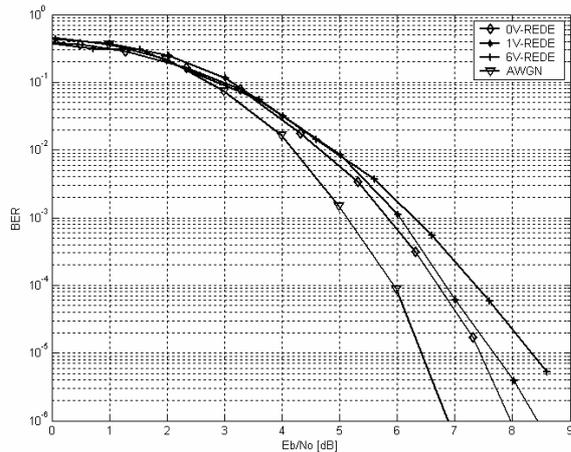


Fig. 15: Comparação do desempenho dos sistemas com convolucional

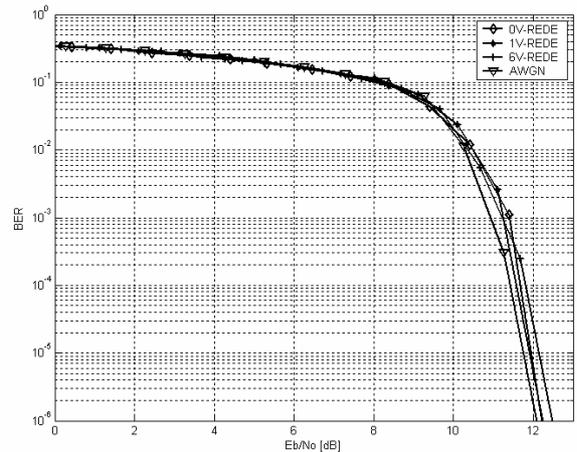


Fig. 17: Comparação do desempenho dos sistemas com código RS

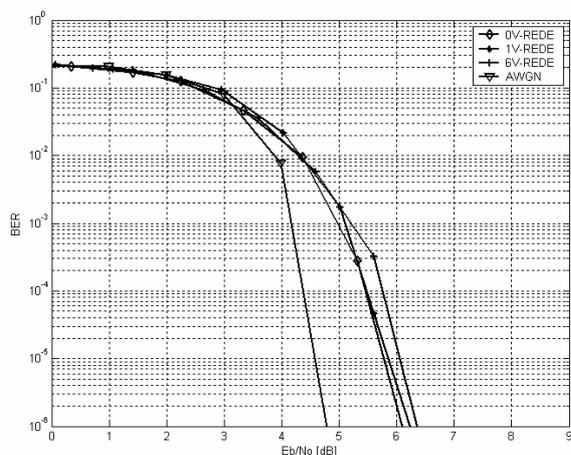


Fig. 16: Comparação do desempenho dos sistemas com código turbo

A Fig. 16 mostra um comparativo entre o canal AWGN e a rede elétrica para um sistema codificado com código turbo. Os desempenhos dos sistemas são praticamente os mesmos acima para uma relação sinal-ruído E_b/N_0 igual a 3 dB, todavia para maiores valores de E_b/N_0 , o canal AWGN apresenta menos erros.

A Fig. 17 mostra a comparação do sistema com AWGN e com ruído da rede elétrica para o código de Reed-Solomon. Neste caso, as curvas de erro dos sistemas resultaram muito próximas. O desempenho com o canal AWGN continua superior quando comparado com os demais sistemas com ruído medido. O aumento do sinal de tensão aplicada na rede elétrica causa uma pequena variação na curva de desempenho.

IV. CONCLUSÕES

Um cenário para simulação dos sistemas de transmissão em OFDM em canais ruidosos foi implementado e testado. Os resultados obtidos através da simulação para o canal AWGN estão de acordo com as formulações teóricas. Os desempenhos dos códigos RS, convolucional e turbo aplicados a um sistema OFDM foram verificados para a

transmissão de dados em um canal AWGN, em um canal com ruído colorido e em um canal com ruído medido da rede elétrica.

Os resultados mostraram que os códigos produziram ganhos de codificação quando submetidos ao ruído real da rede elétrica que não foram iguais aos ganhos produzidos no canal AWGN. Tal diferença pode ser explicada pelas interferências presentes no canal da rede elétrica. Isso confirma que uma escolha cuidadosa do código é muito importante para melhores desempenhos e que a análise em cenários mais reais é necessária.

Para os códigos convolucional e turbo, os desempenhos para o canal da rede elétrica considerado mostrou uma diferença de 1 a 1,5 dB para uma BER de 10^{-6} quando comparado ao canal AWGN. Para o código de Reed-Solomon, tal diferença mostrou-se menor e inferior a 0,2 dB. Constatou-se também a superioridade dos códigos turbo em relação aos demais sistemas com e sem codificação, tanto para o canal com AWGN como para o canal da rede elétrica em questão, apresentando um ganho de codificação de cerca de 2 dB em relação ao código convolucional de mesma taxa de codificação. A exceção seria um ruído colorido com largura de banda muito estreita, como é o caso do ruído filtrado por um passa-faixa em 15kHz e 16kHz, o qual afeta poucas portadoras. Neste caso, o código de Reed-Solomon comportou-se melhor devido a suas propriedades, pois é um código não-binário que trabalha com símbolos (conjuntos de bits), assim quando o ruído atinge poucos subcanais, apenas alguns símbolos são afetados, o que aumenta o desempenho do sistema.

É interessante observar que os desempenhos dos códigos turbo, convolucional e de Reed-Solomon foram sempre superiores para o canal AWGN, afastando-se do desempenho para o caso do ruído medido da rede elétrica em até 2 dB.

Essa metodologia pode ser facilmente estendida a maiores ordens de frequências (MHz), permitindo a avaliação dos mesmos esquemas de correção de erro onde o ruído pode possuir características diferentes.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Dr. Weiler Finamore por nos trazer o tópico dos códigos turbo e por seus comentários relevantes.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Biglieri, "Coding and Modulation for a Horrible Channel", *IEEE Communication Magazine*, 2003.
- [2] G. Marubayashi and S. Tachikawa, "Spread Spectrum Transmission on Residential Power Line", *IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings*, 1996.
- [3] R. van Nee and R. Prasad, "OFDM for Wireless Multimedia Communications", Artech House, 2000.
- [4] C. Heegard, S. B. Wicker, "Turbo Coding", Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] C. Berrou, A. Glavieux and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-correcting Coding and Decoding: Turbo Codes", *IEEE International Conference on Communications*, 1993.
- [6] S. Le Goff, A. Glavieux and C. Berrou, "Turbo Codes and High Spectral Efficiency Modulation", *IEEE Transactions Communications*, 1994.
- [7] P. Robertson and T. Wörz, "A Novel Bandwidth Efficient Coding Scheme Employing Turbo Codes", *IEEE Transactions Communications*, 1996.
- [8] J. P. Lauer and J. M. Cioffi, "Turbo Coding for Discrete Multitone Transmission Systems", *IEEE Transactions Communications*, 1998.
- [9] L. Zhang and A. Yongacoglu, "Turbo Coding in ADSL DMT Systems", *IEEE Transactions Communications*, 2001.
- [10] P. S. Chow, J. M. Cioffi and J. A. C. Bingham, "DMT-Based ADSL: Concept, Architecture and Performance", *IEE Colloquium on High speed Access Technology and Services*, 1994.
- [11] I. Kallel, "The Multitone Channel", *IEEE Transactions Communications*, 1989.
- [12] ANSI T1.413: *Network and Customer Installation Interfaces - Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface*.
- [13] L. Zhang and A. Yongacoglu, "Bandwidth Efficient RS Coding in Asymmetric Digital Subscriber Lines".
- [14] Q. Wang and L. Y. Onetera, "Coded QAM Using a Binary Convolutional Code", *IEEE Transactions on Communications*, 1995.