

# Análise de códigos corretores de erros aplicados a canais ópticos

Claudio F. Dias, Veruska R. Moreira, Fábio Lumertz, Gustavo Fraidenraich e Dalton S. Arantes

**Resumo**—Este trabalho apresenta um estudo comparativo sobre os códigos *Forward Error Correction* (FEC) de segunda e de terceira gerações aplicados a sistemas de comunicações ópticas. A análise dos códigos FEC aqui apresentada para sistemas ópticos levará em consideração os efeitos não-lineares presentes na fibra. A taxa de código utilizada neste estudo será de aproximadamente  $R = 0.8$  para atender à recomendação da *Optical Internetworking Forum* (OIF) que estabelece um *overhead* em torno de 20%.

**Palavras-Chave**—Comunicações Ópticas, Reed Solomon, Códigos Convolucionais, Códigos LDPC.

**Abstract**—This work presents a comparative study on *Forward Error Correction Codes* (FEC) of second and third generation for optical communication systems. The present analysis of FEC codes for optical systems takes into account the non-linear effects in the optical fiber. The code rate used in this study is close to  $R = 0.8$  to comply with the recommendation of the *Optical Internetworking Forum* (OIF) which recommends an overhead of about 20 %

**Keywords**—Optical Communication, Reed Solomon, Convolutional Codes, LDPC Codes.

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente, a *Ethernet* de 100 Gb/s já está padronizada (IEEE 802.3ba/2010) e a *Ethernet* de 1 Tb/s deverá ser padronizada até 2013 [1]. Neste curto espaço de tempo, alcançar o desempenho prometido é um desafio devido a existência de fatores de degradação no canal de comunicação óptica que ainda não foram eficientemente solucionados. Estes obstáculos incluem a dispersão cromática (CD), dispersão por modo de polarização (PMD) e o ruído de fase não-linear [2]. Estes problemas são normalmente combatidos utilizando-se alguma forma de equalização [3] e/ou códigos corretores de erro (FEC) aplicados a canais com modelo de ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) [4]. Existem várias soluções que competem entre si no sentido de apresentar a melhor solução. Normalmente, estes métodos se diferenciam pela aplicação de redundância, complexidade de implementação, ganho de codificação, desempenho de *Bit Error Rate* (BER), capacidade de correção de erros em rajada, concatenação de códigos FEC e equalização [5].

O estudo de códigos corretores de erro em comunicações ópticas tem despertado, recentemente, o interesse de diversos autores nesta área. Em [6], os autores apresentam um esquema FEC utilizando dois códigos RS (*Reed Solomon*) serialmente

concatenados. No código testado foram utilizados parâmetros que caracterizam as propriedades de *shortening*, *puncturing* e decodificação *hard-decision* para um sistema de transmissão coerente, com taxa variável, utilizando a modulação QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*).

Em [7], os autores empregam uma codificação *Low Density Parity Check* (LDPC) e propõem códigos concatenados numa configuração LDPC(9252,7967)+RS(992,956) que podem ir além de 40Gb/s, levando em conta a implementação prática. Os autores mostram que a concatenação suprime efetivamente o patamar de erros (*error-floor*) indesejado.

Em [2], é apresentado um decodificador LPDC adequado para aplicações em redes acima de 100 Gb/s desenvolvidas para execução em plataformas de *hardware* com tecnologia LSI (*Large Scale Integration*). Os autores destacam o problema de *error floor* que ocorre com o código trabalhando isoladamente. O *error floor* se manifesta quando uma pequena nuvem de palavras-código se encontra indesejavelmente próxima da palavra transmitida. Devido a essa singular proximidade das palavras códigos, algumas vezes o ruído do canal faz com que a palavra-código transmitida seja confundida com a palavra-código vizinha. Geralmente, o *error floor* acontece em torno de uma taxa de erro de bit entre  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$  [8]. Uma abordagem para eliminar o *error floor* é utilizar um código RS externo concatenado com um código LDPC interno, conforme apresentado também em [7].

Em [9], há uma proposta de códigos concatenados utilizando LDPC. Esse trabalho enfatiza um ponto de vista interessante com relação a utilização de conversores analógico/digital (ADC) e *Field Programmable Gate Array* (FPGAs) para implementação dos processos de codificação e decodificação. Com o surgimento de ADCs mais sofisticados [10] e com o emprego de FPGAs, viabilizaram-se implementações de soluções por *soft-decision* [11], até então evitadas devido à sua alta complexidade, mesmo considerando o desempenho sensivelmente superior comparado às soluções por *hard-decision*.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo sobre códigos FEC aplicados a sistemas de comunicações ópticas e baseado no modelo de ruído ASE. Para atingir este objetivo, fez-se uso de ferramentas de simulação capazes de implementar códigos corretores de erro, bem como de elementos ópticos empregados em um sistema de comunicação óptica, tais como *laser*, modulador, fibra óptica, fotodiodo. A análise dos códigos FEC aqui realizada para sistemas ópticos leva em consideração os efeitos baseados no modelo de ruído ASE. A taxa de código utilizada será de aproximadamente  $R = 0.8$ , atendendo à recomendação da *Optical Internetworking Forum* (OIF) que estabelece um *overhead* em torno de 20% [12]. Essa recomendação pode ser atribuída ao aumento da

Claudio F. Dias, Veruska R. Moreira, Fábio Lumertz, Gustavo Fraidenraich e Dalton S. Arantes, Departamento de Comunicações da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas-SP, Brasil, E-mails: {claudio, veruska, gf, dalton, lumertz}@decom.fee.unicamp.br. Este trabalho foi financiado pela FAPESP e Padtec S.A., no âmbito do Programa PITE/FAPESP - Processo 07/56018-4, e pelo CNPq.

capacidade de processamento dos processadores DSPs (*Digital Signal Processors*) que torna possível a realização de decodificação *soft-decision* ao invés da decodificação *hard-decision*. Observando-se a curva da capacidade teórica de Shannon com decodificação *hard-decision* e *soft-decision* [13], nota-se que o ganho da decodificação *soft-decision* em relação à decodificação *hard-decision* aumenta com o aumento do *overhead*. Dito isso, fica claro que passar da utilização de um *overhead* de 7% (sistemas anteriores em 10Gbps [12]) para 20% resultará em um maior ganho para os novos sistemas a 100Gbps.

Não obstante, na análise do desempenho dos códigos corretores de erro, supõe-se que haja somente os efeitos do ruído ASE. O método escolhido a ser estudado para o códigos corretores de erro é a concatenação de códigos nas seguintes configurações: RS(255,239) concatenado com RS(255,239) (taxa efetiva de  $R = 0.878$ ), RS(255,239) + *interleaving* + convolucional com *puncturing* com taxa resultante de  $R = 0.8571$  e RS(255,239) concatenado com um código LDPC(64152,58320) de taxa  $R = 0.9$ . O ambiente de simulação óptico utilizado levou em conta o efeito do ruído ASE.

## II. CONSIDERAÇÕES INICIAIS E OBJETIVOS

Os códigos corretores de erro são amplamente conhecidos e tem um lugar bem definido em sistemas de comunicação. Além disso, os esquemas de codificação com complexidade razoável foram concebidos para se aproximar dos limites de muitos canais clássicos, como o canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) e foram implementados com sucesso em uma variedade de sistemas de comunicação *wireless* e cabeado. No entanto, a situação em comunicações ópticas está bem menos desenvolvida. Limites fundamentais rigorosos não são conhecidos e ainda não está claro que os esquemas desenvolvidos para canais clássicos produzem necessariamente um desempenho ótimo quando aplicados sem modificação em canais de fibra óptica [14].

Inicialmente, é necessário buscar uma maneira de se avaliar a qualidade da transmissão. Para isso, dispõe-se de algumas figuras de mérito como SNR (*signal-to-noise ratio*) ou, para o caso óptico, OSNR (*optical signal-to-noise ratio*). Para fins práticos, restringe-se a abordagem pela métrica  $Q$  que é mais simples por lidar com as estatísticas relativa às correntes do sinal [1].

Sob esta perspectiva, o interesse deste trabalho é explorar qualitativamente qual o ganho que se pode obter com a utilização dos códigos clássicos aplicados em um sistema de comunicações ópticas. Com base no aumento da capacidade de processamento e amostragem do sistema, espera-se constatar que os ganhos obtidos por meio das presentes técnicas de codificação ainda tornem os sistemas não coerentes e com modulação *On-Off Keying* (OOK) bastante competitivos.

## III. CONFIGURAÇÕES SISTÊMICAS

A primeira configuração de códigos concatenados foi definida com o objetivo de avaliar a forma de concatenação mais simples e, também, servir como uma outra referência

de comparação à situação em que não há codificação. A configuração proposta visa utilizar um código RS(255,239) concatenado com outro código RS(255,239) que apresenta uma taxa final de  $R = 0.8784$ . A junção entre os códigos concatenados é por *product code*, ou seja, neste caso não há o embaralhamento entre um código e outro.

A segunda proposta de configuração de código concatenado foi RS(255,239) concatenado com um código convolucional, utilizando *puncturing*. O código convolucional base é de taxa  $R = 0.5$  e a taxa resultante, devido ao *puncturing*, é de  $R = 0.8571$ . Utilizou-se, para fazer uma boa junção entre os códigos, a técnica de *interleaving* visando evitar que os erros em rajada prejudiquem o desempenho da concatenação. A taxa total do código concatenado é de  $R = 0.8034$

A última proposta de configuração de código concatenado foi RS(255,239) com LDPC e taxa resultante  $R = 0.8435$ . A taxa do LDPC(64152,58320) foi definida com um valor de  $R = 0.9$  e um tamanho de bloco de 58320 símbolos. Apesar do número de símbolos no bloco ser elevado, este valor foi escolhido para se aproximar das demais taxas de códigos analisadas. Diante disso, houve um grande esforço em [2], [15] e [9] para encontrar uma solução eficiente de implementação de codecs LDPC com blocos de elevado número de símbolos. Devido a estes esforços, existe uma perspectiva para o uso de blocos grandes apesar de sua maior complexidade.

## IV. ASPECTOS DA SIMULAÇÃO

Em pesquisas que abordam a aplicação de códigos FEC em sistemas ópticos, como exemplos [2], [15] e [9], observa-se que existe um foco exclusivo sobre o comportamento dos códigos baseado em um modelo de canal AWGN. A busca por códigos corretores de erro aplicados em canais ópticos ainda é recente e os limites da capacidade de transmissão de um canal óptico ainda são pouco conhecidos [14]. Isso motivou a utilização de um ambiente de simulação capaz de emular os elementos ópticos de um sistema de comunicação e permitir a avaliação do comportamento dos códigos concatenados de uma forma bem próxima da real. A seguir, apresentam-se as partes que integram o conjunto do simulador.

### A. Estrutura da simulação

As simulações foram baseadas em cenário que especifica a degradação do sinal ocorrendo devido ao ruído ASE. O cenário, mostrado na Figura 1, consiste num sistema *back-to-back* (BTB) onde há o transmissor, o amplificador e o receptor, sem existência de fibra como canal. É importante notar que a fonte de ruído da simulação está no interior do bloco amplificador OSNR que simula um modelo de ruído do tipo ASE. Neste cenário, as saídas dos sinais no receptor óptico são mapeadas para futuras manipulações e análises em MatLab.

A estrutura de simulação que engloba estes cenários pode ser dividida em duas partes. A primeira é formada por um conjunto de programas que são responsáveis por fazer a codificação e decodificação de uma fonte de dados. A segunda parte é formada por um modelo que simula as estruturas físicas de um sistema óptico, tais como laser, diodo detector e canal.

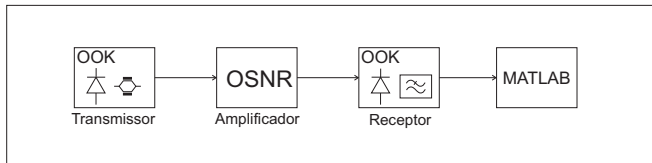


Fig. 1. Diagrama de blocos do cenário

Os programas foram desenvolvidos em um ambiente de computação numérica, MatLab, que possui ferramentas eficientes para o desenvolvimento e testes dos códigos abordados neste trabalho. Com relação ao modelo óptico, este foi desenvolvido utilizando o software VPIphotonics que consiste em um avançado ambiente de simulação de sistemas ópticos.

O bloco OSNR na Figura 1 representa o amplificador baseado na tecnologia *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA). As características relativas ao transmissor e receptor estão descritas nas Tabelas I e II, respectivamente.

TABELA I  
CARACTERÍSTICAS DO TRANSMISSOR.

Frequência de Emissão	$193.1 \times 10^{12}$ Hz
Potência	$1 \times 10^{-3}$ W
Modulação	NRZ

TABELA II  
CARACTERÍSTICAS DO RECEPTOR.

Responsividade	1 A/W
Tipo	PIN
Corrente de Escuro	0 A
Ruído Térmico	$10.0 \times 10^{-12} \frac{A}{\sqrt{Hz}}$
Ruído Shot	Presente

### B. Sinais resultantes da simulação

Um aspecto importante a ser tratado é a forma com que os sinais são processados pelos *scripts* em MatLab. Os sinais são extraídos do simulador óptico e as estatísticas correspondentes determinam a figura de mérito, isto é, o fator  $Q$ . Na literatura, podemos encontrar o “fator  $Q$ ” e o “fator  $Q$  efetivo” ( $Q_{\text{eff}}$ ) e geralmente são utilizados sem muita distinção, porém esta diferença deve ficar bem clara. O fator  $Q$  pode ser definido como

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (1)$$

onde  $\mu_1$ ,  $\mu_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  são os valores médios e desvios padrões dos sinais elétricos “um” e “zero”, respectivamente, sobre uma faixa de amostras dentro de cada bit, medidas exatamente antes do circuito de decisão do receptor [1].

O fator  $Q$  efetivo ( $Q_{\text{eff}}$ ) é uma maneira alternativa de expressar a medida ou estimativa de BER. O  $Q_{\text{eff}}$  pode ser encontrado pela solução numérica da seguinte equação para um limiar ótimo  $D_{\text{opt}}$  [1]:

$$P_{\text{bit}}(D_{\text{opt}}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q_{\text{eff}}}{\sqrt{2}} \right), \quad (2)$$

onde a função  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  é a função de erro Gaussiana.

As métricas  $Q$  e  $Q_{\text{eff}}$  são necessárias para validar o sistema uma vez que devem gerar um resultado comum a partir de fontes diferentes de dados de mesma natureza.

### C. Detalhes sobre os Códigos Corretores

Nesta seção descrevemos alguns detalhes importantes sobre os códigos corretores de erros. Desta forma, o primeiro código a ser discutido é o RS que representa uma classe especial de códigos não binários. Pode ser considerado um código de correção de erros em rajada. O código RS é adequado para transmissão óptica de 40 Gb/s ou superior, uma vez que o canal óptico é propenso a erros em rajada devido à não linearidade do canal. Para esta simulação utilizou-se um código RS(255,239).

No código convolucional  $(n, K, M)$  a operação de codificação pode ser considerada como a convolução da sequência de entrada com a resposta ao impulso do codificador. Portanto, a redundância  $n - k$  não é dada somente por  $k$  símbolos de informação, mas também por funções de  $m$   $k$ -uplas anteriores, sendo  $m + 1$  o comprimento da resposta ao impulso do codificador. O parâmetro conhecido como comprimento da restrição do código convolucional é uma janela de tamanho  $n(m + 1)$ . O código convolucional utilizado neste trabalho possui um polinômio [561 753] e *constraint length* igual a 9. Quando este código funciona concatenado com o código RS, aumenta-se a taxa utilizando a matriz de perfuração [ 1 1 0 1 1 0 ; 1 0 1 0 0 1 ].

Um código LDPC  $(n, k)$  é um código de bloco linear cuja matriz de verificação de paridade  $H$  possui baixa densidade de 1s. O código LDPC regular é um código de bloco cuja matriz  $H$  contém em cada coluna e em cada linha, exatamente a mesma quantidade de 1s. Se a matriz  $H$  é de baixa densidade, mas o número de 1s em cada linha ou coluna não é constante, o mesmo é chamado de código LDPC irregular [13]. Nesta simulação utilizou-se a matriz de codificação do padrão DVB-S2 para se conseguir uma alta taxa de  $R=0.9$ . O tipo de decisão escolhido foi o *Hard Decision*, com verificações de paridade e 50 iterações.

## V. RESULTADOS

Nesta seção, os resultados obtidos nas simulações dos cenários propostos são apresentados. A Figura 2 apresenta o resultado da simulação para o cenário com ruído ASE utilizando apenas códigos não concatenados. Um fenômeno bastante evidente na Figura 2 ocorre com o código convolucional, para um fator  $Q$  menor que 6.5dB. O código convolucional manifestou um desempenho pior do que o do sistema não codificado. Este comportamento decorre da sensibilidade do código a erros de rajada.

Para ilustrar o ganho de cada código, em relação ao desempenho do sistema não codificado, a Tabela III mostra os ganhos sem concatenação para uma  $P_b = 10^{-4}$  juntamente com o equivalente do limite do Shannon como referência [13].

A Figura 3 apresenta os resultados da simulação utilizando códigos com concatenação na presença do ruído ASE. Os ganhos dos códigos concatenados são apresentados na Tabela

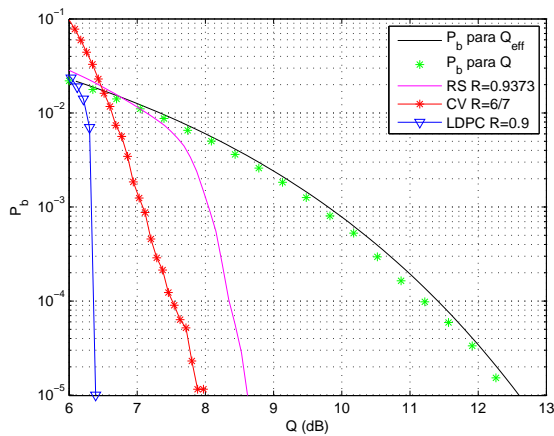


Fig. 2. Desempenho dos códigos sem concatenação.

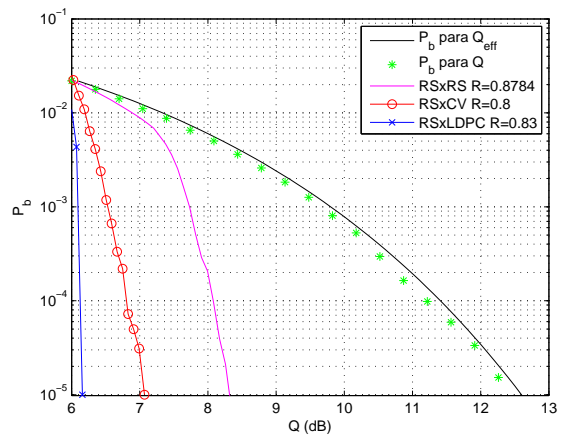


Fig. 3. Desempenho dos códigos com concatenação.

TABELA III  
GANHO DOS CÓDIGOS PARA  $P_b = 10^{-4}$ .

Código	Ganho (dB)	Q (dB) Lim. Shannon
RS (R=0.9373)	3.0 dB	6.9 dB
Convolutcional (R=0.8571)	3.9 dB	5.6 dB
LDPC (R=0.9)	4.8 dB	6.2 dB

IV, que foram obtidos para  $P_b = 10^{-4}$ , juntamente com o fator  $Q$  equivalente do limite de Shannon como referência. Vale ressaltar que cada simulação computacional no software VPIphotonics exige um tempo de processamento relativamente alto. Por conta disso, o menor patamar de probabilidade de erro que pôde ser alcançado foi de  $P_b = 10^{-5}$ . Apesar de alta, esta taxa de erro é suficiente para avaliar comparativamente os diversos códigos considerados no artigo.

TABELA IV  
GANHO DOS CÓDIGOS CONCATENADOS PARA  $P_b = 10^{-4}$ .

Código	Ganho (dB)	Q (dB) Lim. Shannon
RSxRS (R=0.8784)	3.3 dB	5.8 dB
RS x Convolutcional (R=0.8)	4.5 dB	5 dB
RS x LDPC (R=0.8435)	5.2 dB	5.4 dB

### VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo comparativo sobre vários códigos corretores de erro para comunicações ópticas não-coerente usando modulação OOK. Observou-se que, mesmo com o ótimo desempenho do código LDPC, ainda é possível conseguir algum ganho concatenando-o com o código Reed Solomon. Verificou-se igualmente que, para o melhor código RS concatenado com LDPC, a distância medida foi de apenas 0.2 dB do limite equivalente de Shannon. Desta forma, observamos que os resultados apresentados para comunicações ópticas confirmam o que já existe na literatura com relação a códigos corretores de erro desenvolvidos para o canal AWGN.

### REFERÊNCIAS

- [1] I. Djordjevic, W. Ryan, and B. Vasic. *Coding for Optical Channels*. Springer, New York - NY, USA, 2010.
- [2] I. Djordjevic, L. Xu, and T. Wang. *Optical LDPC decoders for beyond 100 Gbits/s optical transmission*, volume 34. Optics Letters, May 2009.
- [3] M. Secondini. *Optical Equalization: System Modeling and Performance Evaluation*, volume 24. Journal of Lightwave Technology, 2006.
- [4] Yi Cai, J.M. Morris, T. Adali, and C. R. Menyuk. *On turbo code decoder performance in optical-fiber communication systems with dominating ASE noise*, volume 21. Journal of Lightwave Technology, 2003.
- [5] A. Tychopoulos, O. Koufopoulou, and I. Tomkos. *FEC in optical communications - A tutorial overview on the evolution of architectures and the future prospects of outband and inband FEC for optical communications*, volume 22. IEEE Circuits and Devices Magazine, 2006.
- [6] G. Gho, L. Klak, and J. Kahn. *Rate-Adaptive Coding for Optical Fiber Transmission Systems*, volume 29. Journal of Lightwave Technology, January 2011.
- [7] Y. Miyata, W. Matsumoto, H. Yoshida, and T. Mizuochi. *Efficient FEC for Optical Communications using Concatenated Codes to Combat Error-floor*. Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 2008.
- [8] S. Haykin. *Sistemas de Comunicação - Analógicos e digitais*. Bookman, 4ª edition, 2007.
- [9] N. Kamiya and S. Shioiri. *Concatenated QC-LDPC and SPC codes for 100 Gbps ultra long-haul optical transmission systems*. Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010.
- [10] Chun-Cheng Huang, Chung-Yi Wang, and Jieh-Tsong Wu. *A CMOS 6-Bit 16-GS/s Time-Interleaved ADC Using Digital Background Calibration Techniques*, volume 46. IEEE Journal of Solid-State Circuits, April 2011.
- [11] P. Adde, C. Jago, R. Le Bidan, and J.E. Perez Chamorro.

*Design and implementation of a soft-decision decoder for Cortex codes.* 17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 2010.

- [12] OIF-FEC-100G-01.0. *100G Forward Error Correction White Paper.* Optical Internetworking Forum, May 2010.
- [13] Shu Lin and Daniel J. Costello. *Error Control Coding: Fundamentals and Applications.* Pearson-Prentice Hall, 2004.
- [14] B. P. Smith and F. R. Kschischang. *Future Prospects for FEC in Fiber-Optic Communications*, volume 16. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010.
- [15] T. Mizuochi and Y. Miyata. *LDPC-based advanced FEC for 100 Gbps transmission.* Digest of the IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, 2008.