

Proteção Desigual de Erros para Transmissão de Imagens de Sensoriamento Remoto em Função de um Critério de Qualidade

Marcello Gonçalves Costa¹

Christofer Schwartz²

Marcelo da Silva Pinho¹

¹ Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA
P. Marechal Eduardo Gomes 50 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil
marcello.costa.br, mpinho@ieee.org

² Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC
R. Paulo Malschitzki 200 – 89.219-710 – Joinville - SC, Brasil
christofer@ieee.org

Abstract. Remote sensing satellites have restrictions for data storage and transmission over band-limited channels. The advancement of sensor technologies with high resolutions, such as multispectral and hyperspectral sensors, had caused a demand of more bit rate for transmission in real-time. Therefore, the communication system for transmission must have the highest efficiency. For this purpose, in this paper was designed an UEP (Unequal Error Protection) scheme for joint source-channel coding applied to remote sensing progressive image transmission. The proposed scheme was created based in two CCSDS (The Consultative Committee for Space Data System) recommendations, taking into account the different error sensitivities of the bitstream to improve the system performance. In that sense, an optimized method to provide an effective rate allocation by choosing the appropriated channel coding rates for each bitstream part considering an acceptable distortion criteria will be shown, and a operation region formed by upper and lower bounds. Significant gains in terms of image distortion can be observed as well as an optimal operation region desirable for high data rate capabilities in near space applications.

Keywords: Satellite image transmission, Joint source-channel coding, Unequal error protection, Transmissão de imagens via satélite, Codificação conjunta fonte-canal, Proteção desigual de erro

1. Introdução

A utilização de satélites como ferramentas de sensoriamento remoto permitem a contínua captura de informações de vastas áreas da superfície terrestre, contribuindo para diversas aplicações. Nesse contexto, a comunidade de sensoriamento remoto tem experimentado a utilização de sensores multiespectrais e hiperespectrais para realizar a captura de imagens. Caracterizados por coletar informações de mais de uma banda espectral de alta resolução, tais sensores acabam por penalizar o sistema de comunicação dos satélites, exigindo altas taxas de transmissão frente ao número elevado de dados coletados. Além disso, os sistemas de comunicação via satélite apresentam restrições quanto a largura de banda disponível para transmissão e relativa quantidade de erros introduzidos à informação devido ao canal de comunicação ruidoso e variante no tempo (Prasad et al., 2011).

Tais observações tornam o projeto do sistema de comunicação vital para operacionalidade do sistema, justificando o emprego de técnicas de codificação do sinal. Considerando a aplicação alvo desse trabalho, técnicas de codificação de fonte e codificação de canal vêm sendo utilizadas ao longo do tempo. Para aplicações aeroespaciais, algumas dessas soluções têm sido recomendadas pelo CCSDS (*The Consultative Committee for Space Data System*), fundado em 1982 e composto por um fórum internacional.

A variedade de padrões definidos pelo CCSDS podem servir como base para o projeto de diferentes sistemas voltados para missões espaciais. Dentre os padrões recomendados, existe a recomendação de um algoritmo de compressão de imagens e mais de uma técnica de codificação de canal. De maneira geral, cada uma das técnicas de codificação de canal pode apresentar mais de uma taxa de codificação, que representa uma relação entre a quantidade de informação codificada e a redundância adicionada pelo código. No entanto, pode-se observar que ambas as recomendações (i.e., para a codificação de fonte e de canal) não são apresentadas de forma conjunta. Ou seja, a codificação do sinal para um sistema que segue essas recomendações é baseada na aplicação do código corretor de erros apropriado e de forma uniforme (*Equal Error Protection* – EEP) à sequência de bits (i.e., *bitstream*) gerada pelo compressor de forma progressiva. Estruturalmente, para um segmento da imagem, as partes iniciais do bitstream entregue pelo compressor são mais relevantes para a reconstrução da imagem do que as demais (Arslan et al., 2012) (decorrente da codificação realizada em plano de bits). Dessa forma, otimizações no esquema de codificação conjunta podem explorar essas diferenças visando ganhos em termos de distorção e alocação de taxa para a codificação de canal.

A estratégia que explora a alocação eficiente de taxas de codificação para promover maior proteção às partes mais sensíveis de um *bitstream* comprimido é conhecida como proteção desigual de erro (*Unequal Error Protection* – UEP). Essa técnica foi primeiramente aplicada por Masnick e Wolf (1967) considerando as propriedades das matrizes de checagem de paridade de códigos de blocos lineares. Ao longo do tempo, outros trabalhos foram surgindo empregando-a também a outras classes de códigos corretores de erros.

Em Schwartz et al. (2014) é proposto um esquema de proteção desigual de erros para aplicações aeroespaciais baseado em duas recomendações do CCSDS: (a) a recomendação 122.0-B-1, definida em CCSDS (2005), especifica um compressor de imagens em escala de cinzas para aplicações aeroespaciais e (b) a recomendação 131.0-B-1, definida em CCSDS (2011) que especifica alguns códigos corretores de erros. Os autores utilizaram para as análises o código convolucional, onde as diferentes taxas de codificação eram alcançadas por *puncturing*. Foram observados ganhos de PSNR de até 29 dB para alguns valores de relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio* – SNR), ao se adotar a estratégia de UEP. Contudo, a alocação de taxas apresentada pelos autores foi feita de forma arbitrária, onde duas configurações de taxas foram apresentadas para se obter uma taxa de codificação UEP média de aproximadamente 3/4 (visando comparar os resultados com a codificação EEP de mesma taxa). Dessa forma, não foi apresentada uma região de operação UEP baseada em um critério de qualidade de imagem admitido.

Uma propriedade para alocação ótima de taxa de codificação é apresentada por Costa e Pinho (2016). Nesse trabalho, os autores utilizaram o algoritmo de compressão de imagens recomendado pelo CCSDS e o código LDPC, que disponibiliza três valores de taxas de codificação ($1/2$, $2/3$ e $4/5$) que são alocados às diferentes partes do bitstream comprimido. Contudo, com esta combinação de taxas, a otimização em função da taxa de codificação pode se tornar mais limitada em comparação à faixa de taxas disponibilizadas pelo código convolucional da mesma recomendação ($1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ e $7/8$), que pode permitir uma parametrização mais adequada para alguns sistemas de baixa órbita. Além disso, considerando a restrição computacional presentes em alguns sistemas embarcados, bem como de consumo de energia, o código convolucional pode se tornar uma opção viável.

Considerando essas questões, nesse artigo será apresentada uma otimização criada a partir de Costa e Pinho (2016) e Schwartz et al. (2014), como uma extensão das metodologias adotadas pelos autores. Será adotado por esse trabalho o código convolucional recomendado em CCSDS (2011). Contudo, uma região de operação UEP será definida considerando diferentes taxas

de codificação de canal em função de um critério de distorção máxima aceitável, estabelecido sobre níveis de importância dos bits do sinal comprimido. Dentro desta região, a garantia de utilização de menor redundância para altos ganhos de distorção pode ser observado e escolhido conforme critério de projeto. Dessa forma, será verificado o desempenho entre os cenários de EEP e UEP otimizado, refletindo os ganhos na relação entre distorção e alocação de taxa.

Esse trabalho está dividido da seguinte forma. Nas Seções 2 e 3 são apresentadas, respectivamente, as recomendações do CCSDS para a codificação de fonte e canal adotadas nesse estudo. Na sequência, a Seção 4 formula os critérios de seleção de taxas criado para a estratégia UEP. Os resultados das análises são apresentados na Seção 5, seguidos por algumas conclusões descritas pela Seção 6.

2. O Algoritmo de Compressão de Imagens Recomendado pelo CCSDS

A recomendação do CCSDS 122.0-B-1 descreve um compressor de imagens em escala de cinzas recomendado para aplicações aeroespaciais. De forma simplificada, as etapas envolvidas no processo de compressão podem ser divididas em duas partes: (a) aplicação da transformada de wavelet discreta (DWT) de duas dimensões (2D) e três níveis de resolução; e (b) codificação em plano de bits (*Bit Plane Encoding* – BPE), fazendo uso de um código de entropia. O algoritmo recomendado prevê a compressão de imagens sem perdas (DWT com aritmética de valores inteiros) ou com perdas (DWT com aritmética de valores em ponto flutuante). Basicamente, a etapa referente à DWT se resume em aplicações sucessivas de filtros passa-baixas e passa-altas (com 9 e 7 *taps* respectivamente) para cada linha da imagem, e posteriormente para cada coluna. Esse processo é repetido mais duas vezes para os coeficientes resultantes da passagem exclusiva dos filtros passa-baixas, resultando em uma transformada em 3 níveis de resolução.

Contudo, a região de perdas é dada basicamente durante a etapa de BPE, por meio da escolha da quantidade de planos de bits codificados e descartados. Contudo, para cada plano de bits, são codificados primeiramente os coeficientes dos níveis de maior importância para os níveis de menor importância, resultantes da DWT. Dessa forma, para cada plano de bits, a codificação pode ser interrompida em diferentes estágios, permitindo um maior controle do comprimento do bitstream codificado.

A recomendação também permite a segmentação da codificação em plano de bits. A rigor, os coeficientes da DWT são agrupados em blocos de 64 coeficientes (1 coeficiente DC e 63 coeficientes AC), que serão distribuídos em S segmentos distintos. Com isso, caso a informação de um segmento seja comprometida, os danos serão observados em apenas uma região da imagem. Dessa forma, o bitstream entregue pelo codificador será composto por S segmentos ordenados, sendo que cada segmento composto por: (a) um cabeçalho, (b) os bits mais significativos (MSB) dos coeficientes DC, (c) profundidade dos coeficientes AC, (d) os N_{BP} codificados em ordem de importância; como ilustra a Figura 1.

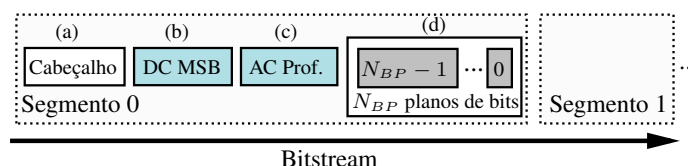


Figura 1: Estrutura de um segmento do bitstream entregue pelo compressor.

Importante destacar que as partes (a), (b) e (c), constituem informações vitais para a reconstrução da imagem, contudo, representam apenas uma pequena parcela do tamanho total do bitstream. Os dados da etapa (d) são responsáveis pela maior parte da informação do

bitstream, decaindo em grau de importância a medida que se aproxima do final da parcela do bitstream do segmento correspondente. Dessa forma, se a informação de (a), (b) e (c) for corrompida, a probabilidade do segmento se tornar não decodificável é alta. Da mesma forma, corromper a informação do início de (d) irá afetar os planos de bits mais significativos, causando maior impacto na qualidade da imagem reconstruída em comparação com a degradação da parte final de (d).

3. A Recomendação do CCSDS para Codificação de Canal

A codificação de canal busca proteger a informação transmitida das interferências causadas pelo canal de comunicação. Nesse contexto, a recomendação do CCSDS 131.0-B-1 constitui um documento técnico para auxiliar no desenvolvimento das etapas de sincronização e codificação de canal de sistemas aeroespaciais. Nela são recomendados três códigos corretores de erros pertencentes às seguintes classes de códigos: (a) códigos convolucionais, (b) códigos de Reed-Solomon, (c) códigos turbo e (d) códigos LDPC.

Tais códigos buscam codificar uma sequência de símbolos de comprimento k , entregando como saída uma sequência de comprimento n ; permitindo que seja calculada uma taxa de codificação R dada por $R = k/n$. Dessa forma, pode-se afirmar que para uma dada capacidade de correção de erros, quanto maior for o valor de R , mais eficiente será o código corretor adotado. Como descrito em CCSDS (2011), o código convolucional por si só deve apresentar desempenho satisfatório dependendo da performance exigida pelo sistema. No caso do sistema não permitir o acréscimo de largura de banda imposto pelo código convolucional operando com taxa fixa (EEP), pode-se optar pela utilização do código de Reed-Solomon recomendado. A recomendação também sugere a utilização desses dois códigos de forma concatenada, quando exigida uma maior capacidade de correção de erros por parte do sistema. Contudo, essa configuração exigirá um acréscimo ainda maior da largura de banda do sistema de comunicação. Se ganhos de codificação ainda maiores forem exigidos, pode-se optar pela utilização dos códigos turbo recomendados.

Vale comentar que o código convolucional recomendado pelo CCSDS foi projetado para $R = 1/2$. De fato, essa taxa de codificação justifica a afirmativa feita com relação ao acréscimo de largura de banda exigida pelo código. Contudo, outras taxas de codificação também podem ser alcançadas através de um esquema conhecido como *puncturing*, que consiste na retirada sistemática de bits codificados, o que irá reduzir a capacidade de correção do código, mas também a largura de banda necessária imposta pelo código. A recomendação prevê a estratégia de *puncturing* para a obtenção das seguintes taxas de codificação: $2/3$, $3/4$, $5/6$ e $7/8$.

No mais, o código convolucional recomendado apresenta um comprimento de restrição $K = 7$, onde $K - 1$ é a quantidade de registradores de deslocamento utilizados pelo código, quais são interligados conforme os seguintes vetores de conexão: $G1 = 1111001$ (171 octal) e $G2 = 1011011$ (133 octal). No fundo, qualquer codificador convolucional pode ser visto como uma máquina de estados finitos (*Finite State Machine* – FSM), onde a etapa de codificação é fácil de ser analisada e costuma apresentar um esforço computacional relativamente baixo (etapa embarcada no satélite). Por fim, como recomendado em CCSDS (2011) e utilizado por esse trabalho, a decodificação pode ser realizada utilizando o algoritmo de Viterbi operando com o método de decisão por máxima verossimilhança (i.e., *Maximum Likelihood Viterbi Decoding*).

4. Otimização de Codificação Conjunta com Proteção Desigual de Erro

O método UEP proposto tem como objetivo otimizar a transmissão progressiva do bitstream comprimido pelo algoritmo de compressão de imagens recomendado pelo CCSDS, em um canal de transmissão AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Isso será feito por meio de

uma alocação otimizada das diferentes taxas de codificação, considerando a contribuição de cada grupo de bits concatenado no bitstream comprimido para com a qualidade da imagem reconstruída. Para as partes consideradas vitais para a decodificação de um segmento da imagem, ilustradas pelos blocos (a), (b) e (c) da Figura 1, foi atribuída a maior taxa de codificação viabilizada pelo código convolucional (i.e., $R = 1/2$). Para as demais partes do bitstream, representadas pelo bloco (d) da Figura 1, as taxas podem ser alocadas de forma dinâmica para cada plano de bits codificado, tendo como limite de qualidade inferior $R = 7/8$.

Serão utilizados dois critérios para seleção de taxas para os diferentes planos de bits codificados. O primeiro critério refere-se a um nível máximo de distorção admissível, que será sempre garantido ao longo das curvas SNR, independentemente da taxa de proteção resultante que será gerada pelo esquema UEP. O segundo critério refere-se à distribuição das taxas ao longo de cada segmento do bitstream comprimido. Neste critério, é estabelecido os limites para a taxa de codificação ótima. O critério de nível máximo de distorção aceitável pode ser garantido considerando a seguinte definição:

Definição 1 *Seja a mínima PSNR aceitável denotada por $maPSNR$, condição em que as informações do bitstream consideradas vitais sejam preservadas (i.e., livres de erros) para que se garanta ao menos uma versão decodificável da imagem, então, uma versão aceitável do sinal será obtida, embora ocorram erros nas demais informações.*

Seguindo este critério, cada segmento contido em um bitstream codificado pelo compressor pode ser tratado de forma isolada e a distorção final da imagem decodificada depende dos planos de bits corretamente recebidos em cada segmento. Dessa forma, qualquer primeiro erro crítico que ocorra em um dos planos de bits de um dado segmento interromperá seu processo de decodificação¹.

Para o modelo UEP, seja um segmento composto por S_1, \dots, S_k partes, sendo S_1 os bits anteriormente considerados vitais e S_2, \dots, S_k os planos de bits de comprimentos variáveis e diferentes importâncias do ponto de vista de distorção da imagem reconstruída, pode-se construir uma classe de importância $\{C_1, \dots, C_\ell\}$ associada às partes do segmento, em que $\{1, \dots, \ell\}$ representa o nível decrescente de importância dentro desta classe.

O critério da $maPSNR$ atribui diferentes níveis de proteção às classes de importância do segmento, de tal forma que, a mais alta proteção seja alocada para a classe mais importante, denotada por C_1 , fazendo C_1 mais imune à ocorrência de um primeiro erro crítico, que corre com probabilidade ϵ nas demais classes. Considerando que C_1 representa o número de bits da primeira classe de importância, pode-se escrever que,

$$P[maPSNR] = (1 - \epsilon)^{C_1}. \quad (1)$$

Com essa atribuição, a ocorrência do primeiro erro irreversível de probabilidade ϵ é deslocada para as classes de menor importância C_{i+1} ($i = 1, \dots, \ell$) compostas pelos S_2, \dots, S_k planos de bits. Isto garante a recuperação mínima aceitável da imagem reconstruída que pode ser melhorada conforme o grau de proteção atribuído às C_{i+1} ($i = 1, \dots, \ell$) classes.

Uma condição suficiente para se obter analiticamente uma distorção média, dada a condição de $maPSNR$ satisfeita, pode ser calculada atribuindo dois diferentes níveis de proteção: o mais elevado para a classe de importância $\{C_1\}$, denotado por N_1 e com probabilidade de erro p_1 e o

¹Um erro não crítico pode ocorrer quando a alteração de um bit ainda permita que o processo de decodificação do segmento continue, como por exemplo, quando essa alteração resulta na substituição de uma palavra código do código de entropia por outra.

menos rigoroso para as classes $\{C_2, \dots, C_\ell\}$, denotado por N_2 e com probabilidade de erro p_2 . Dessa forma,

$$E[\text{PSNR}|\text{maPSNR}] = \sum_{k=1}^{N_2} (1-p_2)^{k-1} p_2 \text{PSNR}_{N_1+k-1} + \left[1 - \sum_{k=1}^{N_2} (1-p_2)^{k-1} p_2 \right] \text{PSNR}_N, \quad (2)$$

onde $P[\text{maPSNR}] = (1-p_1)^{N_1}$.

Para a estratégia UEP proposta, cada classe de importância está associada a uma taxa de codificação de canal ou à combinação delas. Neste caso, especificada pelas taxas disponibilizadas pelo código convolucional. Considerando-se a condição suficiente, o maior nível de proteção é associado à $R = 1/2$ e o menor nível de proteção poderia utilizar uma das taxas $2/3$, $3/4$, $5/6$ e $7/8$.

Uma forma de estabelecer os limites para distorções médias alcançáveis com a UEP é considerar como limitante superior que N_1 envolva as classes de importância $\{C_1, \dots, C_{\ell-1}\}$, associadas à taxa $1/2$ e N_2 envolva a última classe de importância $\{C_\ell\}$, associada à taxa $2/3$. De forma semelhante, como limitante inferior para a UEP, tem-se o nível de proteção N_1 envolvendo somente a classe de importância mais elevada $\{C_1\}$, associada à taxa $1/2$, e as demais $\{C_2, \dots, C_\ell\}$ classes de importância pertencentes ao nível N_2 , que está associado à taxa de proteção de $7/8$. Dessa forma, pode-se afirmar que para qualquer outra configuração possível a alocação de taxas resultaria em valores contidos dentro da região delimitada.

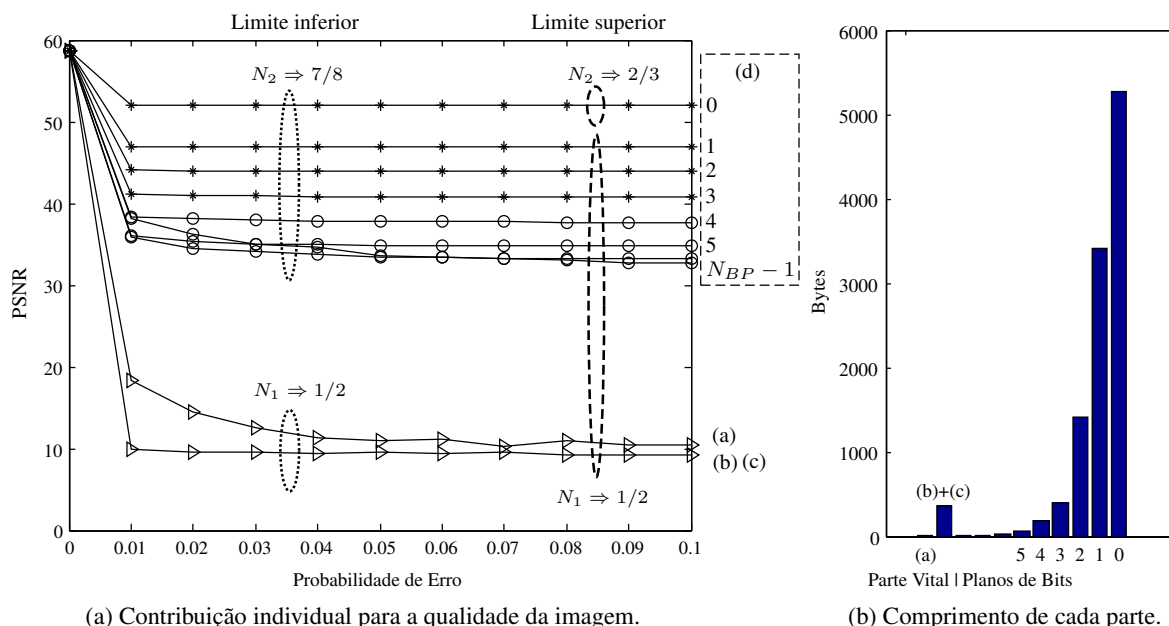


Figura 2: Detalhes de cada parte de um segmento codificado pelo compressor.

Os critérios de otimização UEP apresentados podem ser aplicados diretamente aos segmentos do bitstream codificado pelo compressor recomendado pelo CCSDS. A Figura 2 apresenta a contribuição isolada de cada parte de um segmento susceptível a erros, no que diz respeito à qualidade da imagem decodificada. Portanto, aplicando-se o modelo analítico descrito pela Equação 2, pode-se estabelecer o desempenho UEP em termos de taxa de codificação e distorção, através da escolha da taxa de codificação do código convolucional atribuída ao nível N_2 (limitados por $R = 2/3$ e $R = 7/8$).

Nesta análise de limitantes, toda a distorção considerada é introduzida pelos efeitos do canal de comunicação, uma vez que o algoritmo de compressão está parametrizado para realizar a

compressão até o último estágio do último plano de bits. Dessa forma, a otimização busca estabelecer uma relação de compromisso para se alcançar a melhor média de distorção em função do melhor balanceamento de taxas para o uso eficiente da banda de transmissão.

5. Resultados

Os resultados das análises foram feitos através de simulações de Monte Carlo, utilizando como fonte de informação imagens de dimensões 512×512 pixels capturadas pelo satélite CBERS-2B (*China-Brazil Earth Resources Satellite*). O bitstream entregue pelo compressor foi codificado considerando as informações das classes de importância para cada segmento, conforme os critérios de otimização descritos na Seção 4, resultando na caracterização dos limites de desempenho com a UEP. Por fim, através de uma modulação binária (BPSK) o sinal foi submetido a um canal AWGN; e o desempenho do sistema pode ser observado ao se analisar a Figura 3.

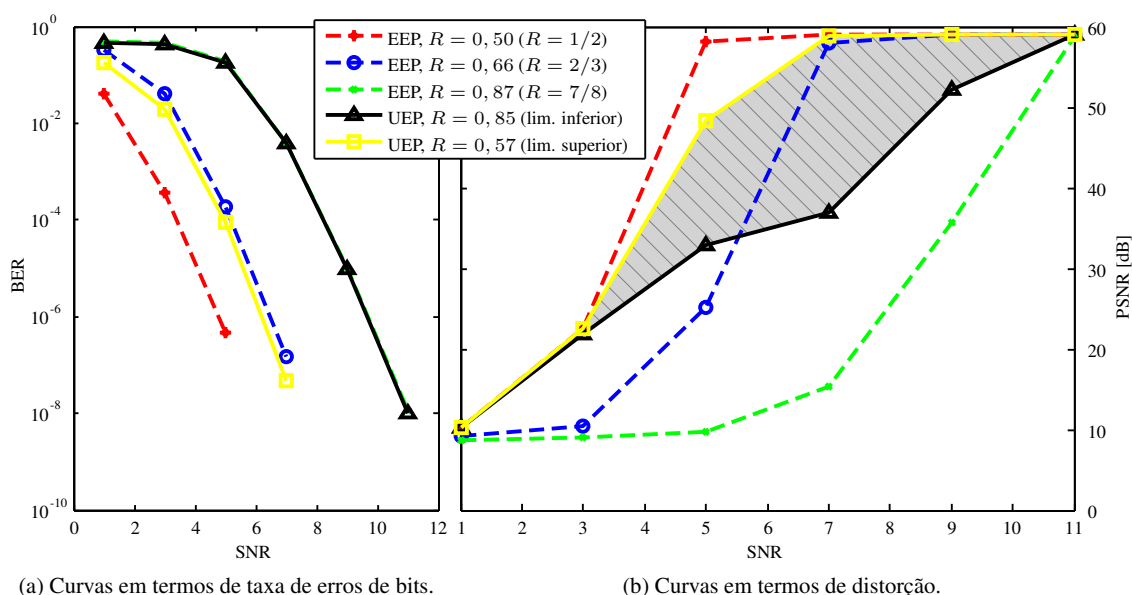


Figura 3: Curvas de desempenho.

A Figura 3(a) apresenta de forma comparativa o efeito da UEP em termos de taxa de erro de bits, para diferentes valores de SNR. Como esperado, quanto maior a taxa de codificação, pior será o desempenho do codificador de canal e um número maior de bits serão corrompidos. Para a curva de limite inferior, como apenas as informações da imagem consideradas vitais são codificadas com uma taxa de codificação mais robusta (i.e., $N_1 \ll N_2$), o desempenho do sistema em termos de taxa de erros de bits será muito próximo ao da curva EEP para $R = 7/8$.

Contudo, ao se analisar a Figura 3(b), que traz o desempenho do sistema em termos de distorção da imagem, nota-se ganhos significativos para essa configuração. De fato, pode-se afirmar que o decréscimo mínimo de R (i.e., de $R = 0,87$ para $R = 0,85$) resultou em ganhos na qualidade da imagem de mais de $30dB$ de PSNR para alguns valores de SNR (e.g., $SNR = 5$), podendo ser este um critério mínimo de qualidade admitido. Em suma, a ocorrência dos erros nos esquemas UEP são deslocados para N_2 que possuem menor impacto na distorção da imagem.

Quanto ao limite superior, a estratégia UEP teve um desempenho semelhante à EEP para $R = 1/2$, penalizando a imagem de forma mais acentuada para valores de SNR entre 5 e 7. Contudo, ambas apresentaram desempenho semelhantes para valores de SNR maiores que

7, garantindo para essa região imagens de qualidade semelhante para um valor razoavelmente maior de taxa de codificação (i.e., de $R = 0,5$ para $R = 0,57$). Garantindo um uso mais eficiente da banda de comunicação para essa região. Com isso, pode-se traçar uma região UEP (representada pela área hachurada da Figura 3(b)). Esta região estabelece a condição de recuperação do sinal que parte da condição mínima aceitável até a condição próxima da estabelecida pelo melhor desempenho das curvas EEP.

6. Conclusões

O presente trabalho apresentou um esquema de proteção desigual de erros com alocação de taxas baseada em um critério de qualidade, voltado para aplicações aeroespaciais. Nesse esquema, a estratégia UEP criada fez uso do algoritmo de compressão de imagens recomendado pelo CCSDS e do código convolucional com *puncturing* também recomendado pelo comitê, tendo seu desempenho avaliado através de um modelo de canal AWGN. Foi perseguida uma otimização a partir da distribuição de classes de importância às partes do bitstream comprimido. Dessa forma, uma região UEP para operação otimizada foi traçada, delimitada inferiormente pelo nível máximo de distorção aceitável que pode ser melhorado com a combinação crescente das taxas disponibilizadas. Além disso, o desempenho de distorção máximo aceitável foi obtido para a maior taxa de codificação de canal disponibilizada pela recomendação (i.e., $R = 7/8$), valor que pode ser gradualmente reduzido visando garantir que a imagem recuperada de forma satisfatória frente às variações do canal de comunicação. A região traçada para a operação em UEP garante a recuperação de uma versão da imagem em condições severas de SNR (bem como em suas possíveis variações rápidas), otimizando o uso da banda de transmissão na faixa desejável para aplicações de baixa órbita.

Agradecimentos

Ao suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), proc. no. 154044/2015-6; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa PNPd 1590598.

Referências

- Arslan, S. S.; Cosman, P. C.; Milstein, L. B. Generalized unequal error protection LT codes for progressive data transmission. **IEEE Trans. on Image Processing**, v. 21, n. 8, p. 3586–3597, 2012.
- Costa, M. G.; Pinho, M. S. An UEP scheme for optimal rate allocation of CCSDS LDPC codes. In: International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA), 2016, Monterey, USA. **Proceedings...** Monterey: ISITA, 2016. Articles, p. 403–407.
- Masnick, B.; Wolf, J. On linear unequal error protection codes. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 13, n. 4, p. 600–607, 1967.
- Prasad, S.; Bruce, L.; Chanussot, J. **Optical remote sensing: advances in signal processing and exploitation techniques**. New York, USA: Springer, 2011. 351 p.
- Schwartz, C.; Marques, F. da S.; Pinho, M. da S. An unequal coding scheme for remote sensing systems based on ccstds recommendations. In: International Telecommunications Symposium (ITS), 2014, Sao Paulo, Brazil. **Proceedings...** Sao Paulo: ITS, 2014. Articles, p. 1–5.
- [CCSDS] The Consultative Committee for Space Data System. **CCSDS 122.0-B-1: Image Data Compression**. Blue Book. Issue 1. Washington, D.C.: CCSDS, November 2005.
- [CCSDS] The Consultative Committee for Space Data System. **CCSDS 131.0-B-2: TM Synchronization and Channel Coding**. Blue Book. Issue 2, Washington, D.C.: CCSDS, August 2011.