

# Decodificação de Canal em Sistemas com Transmissão Progressiva

Marcelo da Silva Pinho e Weiler Alves Finamore

**Resumo**— O teorema da separação fonte-canal afirma que, em um sistema de comunicação, não existe perda de desempenho se os códigos de fonte e canal são projetados de forma independente. Na verdade, os protocolos de comunicação posicionam estas funções de codificação em camadas diferentes. E, além disso, nos sistemas de comunicações destituídos de retransmissão a decodificação de canal completa é, em geral, utilizada. O uso da decodificação incompleta, no entanto, pode evitar a introdução de erros em segmentos relacionados a refinamentos sucessivos. Este trabalho propõe o uso de decodificação de canal diferenciada para segmentos distintos do sinal comprimido. No esquema proposto o código de canal permanece imutável, nas premissas do transmissor, mas às variadas combinações de estratégias de decodificação incompleta, restritas ao receptor, correspondem esquemas com desempenhos distintos, superando a estratégia que utiliza apenas a decodificação completa. Resultados preliminares, para um sistema de comunicação simples, mostram que esta solução inovadora, é vantajosa e produz melhorias em torno de 0,2 dB na energia de bit.

**Palavras-Chave**— Codificação de fonte com refinamento sucessivo, transmissão progressiva, codificação fonte-canal

**Abstract**— The source-channel separation theorem states that in a communication system there is no performance loss if the source and channel code are designed independently. Actually, network protocols locate these codes in different layers. Furthermore, in communication systems with no retransmission capability, typically a complete channel decoder is used. However, in a system with progressive transmission, the use of an incomplete decoding can suppress errors in segments related to successive refinements. This work proposes a scheme that replaces the use of a single complete decoding strategy by a combination which uses different channel decoding strategies, one for each distinct segments of the compressed signal. The proposed scheme uses a fixed encoder, at the transmitter, but the many combinations of incomplete decoding modes, restricted to the receiver premisses, leads to system performances which surpasses that of a system with complete decoding only. Preliminary results revealed that the use of this novel scheme brings promising improvements. For a simple communication system, improvements on the order of 0.2 dB in bit energy were observed.

**Keywords**— Source coding with successive refinements, progressive transmission, source-channel coding

## I. INTRODUÇÃO

Os códigos de fonte e de canal têm como objetivo melhorar a eficiência e a confiabilidade de sistemas de comunicações digitais. Em geral, estes códigos operam de forma independente dentro dos sistemas. Em modelos de referência de protocolos de comunicações, tipicamente, as codificações de fonte

e canal são realizadas até mesmo em camadas diferentes [1]. Na verdade, a estratégia de projetar soluções independentes se baseia no resultado do teorema da separação fonte-canal. Este teorema estabelece que, sob certas condições, a informação gerada por uma fonte e transmitida por um canal pode ser recuperada, a menos de uma distorção  $D$ , desde que a capacidade do canal seja maior que a função taxa-distorção da fonte. Além disso, o teorema afirma também que se a capacidade do canal for menor que a função taxa-distorção, qualquer reconstrução da informação terá uma distorção superior a  $D$  [2].

Um fato importante sobre o teorema da separação fonte-canal é que seu resultado é assintótico. Na verdade, a recuperação da informação, a menos de uma distorção  $D$ , é atingida no limite, quando o número de símbolos cresce indefinidamente. Um resultado importante da teoria da informação mostra que o uso de uma codificação conjunta fonte-canal pode produzir ganhos na velocidade de convergência [3]. Por esta razão, é possível encontrar na literatura trabalhos propondo o uso de técnicas de codificação conjunta. Por exemplo, a técnica de proteção desigual de erro [4] associada a codificadores de fonte que permitem transmissão progressiva pode ser vista como uma solução em que os codificadores operam de forma dependente. Este tipo de solução tem sido estudada por diferentes grupos de pesquisa [5], [6], [7], [8].

Na transmissão progressiva, a reconstrução do sinal gerado pela fonte é feita de forma incremental. Nesta técnica, a recepção de um segmento inicial do sinal codificado permite a reconstrução de uma versão de qualidade reduzida. A medida que segmentos subsequentes vão sendo recebidos, é possível reconstruir versões mais refinadas. Esta técnica é utilizada na codificação de vídeo escalável [9] e em algoritmos de compressão de imagens [10], dando origem ao conceito de codificação de fonte com refinamento sucessivo. Do ponto de vista teórico, o melhor desempenho possível para estes códigos pode ser obtido a partir de uma generalização da função taxa-distorção [11]. A literatura estabelece ainda que uma fonte de informação pode ser refinada com sucesso se não existe perda de desempenho quando se restringe a soluções com refinamento sucessivo [12]

Os sistemas de comunicações que utilizam codificação de fonte com refinamento sucessivo, em grande parte, operam com a solução tradicional, i.e., com codificadores de fonte e de canal independentes. É fato que a utilização de técnicas de codificação conjunta pode melhorar o desempenho na prática, conforme mostram os resultados de diversos trabalhos que utilizam códigos com proteção desigual [5], [6], [7], [8]. No entanto, a utilização deste tipo de solução envolve modificações significativas com um aumento de complexidade do transmissor e do receptor. Sendo assim, diversos sistemas

utilizam a solução tradicional. Nestes sistemas, a codificação de canal pode ser realizada com o uso de um ou mais códigos de controle de erro, operando com decodificação completa ou incompleta. Na literatura de codificação de canal, uma decodificação completa é aquela que, a partir dos dados recebidos, estima a palavra-código mais provável e a decodifica. Por outro lado, no método incompleto, dependendo da diferença entre o que foi recebido e a palavra-código mais provável, o decodificador pode optar pela indicação de falha na transmissão ao invés da decodificação [13]. Normalmente, a decodificação incompleta é utilizada quando existe a possibilidade de retransmissão.

É interessante observar que o uso de decodificação incompleta pode ser vantajoso em sistemas que operam com códigos de fonte com refinamento sucessivo, mesmo que não haja a possibilidade de retransmissão. De fato, um erro provocado por uma decodificação completa, em um segmento do sinal responsável por um determinado grau de refinamento, pode aumentar a distorção obtida sem este segmento. Sendo assim, neste caso, seria mais adequado a indicação de falha de transmissão. A principal contribuição deste trabalho é mostrar que a variação da estratégia de decodificação de canal pode produzir ganhos em sistemas de comunicação com transmissão progressiva. É importante destacar que esta variação cria uma dependência entre o decodificador de canal e o codificador de fonte, produzindo uma solução diferente da tradicional. No entanto, considerando que a variação ocorre apenas na estratégia do decodificador, esta solução não é efetivamente uma codificação conjunta e pode ser implementada de forma simples, alterando apenas o processo de decodificação do receptor. Nesta proposta, não há qualquer necessidade de alteração do transmissor e ela pode ser implementada com certa facilidade em sistemas que estão em operação.

Este trabalho está organizado conforme descrito a seguir. A Seção II introduz o problema da codificação de fonte com refinamento sucessivo. A Seção III apresenta alguns conceitos sobre codificação de canal. A proposta deste trabalho é o assunto da Seção IV. Os resultados e as conclusões são apresentados nas Seções V e VI, respectivamente.

## II. CODIFICAÇÃO DE FONTE COM REFINAMENTO SUCESSIVO

O problema da codificação de fonte segundo um critério de fidelidade é o assunto estudado pela teoria da taxa-distorção [14]. Esta teoria investiga o desempenho de diferentes classes de códigos para modelos de fontes distintas, introduzindo conceitos diversos. Por exemplo, o conceito de função taxa-distorção de uma fonte de informação, representada por  $R(D)$ , estabelece o melhor desempenho possível para compressores que operam com distorção menor ou igual a  $D$ . Para o caso em que a saída da fonte de informação é uma sequência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), o Teorema 10.2.1 de [14] mostra que a função taxa-distorção é igual ao mínimo da informação mútua. Utilizando este resultado, é possível encontrar a função taxa-distorção de uma fonte gaussiana, considerando a medida de distorção quadrática. Para este caso, se a fonte gaussiana emite

variáveis aleatórias i.i.d. com variância igual a  $\sigma^2$ ,

$$R(D) = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma^2}{D}, & \text{se } D < \sigma^2, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

Em [11], uma generalização da função taxa-distorção é apresentada para a classe de códigos de fonte com refinamento sucessivo. A partir desta generalização, dado um vetor distorção  $(D_1, D_2, \dots, D_L)$ , sendo  $D_1 > D_2 > \dots > D_L$ , é possível definir funções do tipo taxa-distorção que estabelecem o melhor desempenho possível para códigos com refinamento sucessivo. De fato, a generalização permite definir  $L$  funções tais que:

1.  $R_1(D_1)$  estabelece a menor taxa sobre todos os códigos que operam com distorção menor ou igual a  $D_1$ ,
2. para  $\ell = 2, \dots, L$ , os valores  $R_\ell(D_1, \dots, D_\ell)$  são os incrementos das taxas  $R_{\ell-1}(D_1, \dots, D_{\ell-1})$ , que permitem o refinamento até atingir uma distorção  $D_\ell$ .

Da descrição acima, observa-se que  $R_1(D_1) = R(D_1)$ , para qualquer fonte. Além disso, como a estratégia com refinamento sucessivo corresponde a um código capaz de atingir distorção  $D_L$ , é possível afirmar que, para qualquer fonte,

$$R(D_L) \leq R_1(D_1) + \dots + R_L(D_1, \dots, D_L). \quad (2)$$

Na teoria da informação, uma fonte que pode ser refinada com sucesso é definida como sendo aquela em que a desigualdade em (2) se transforma em uma igualdade. Em [12], é introduzida uma condição necessária e suficiente para que a fonte possa ser refinada com sucesso e alguns exemplos são apresentados. A fonte gaussiana com medida de distorção quadrática é um dos exemplos, ou seja, para este caso  $R_1(D_1) + \dots + R_\ell(D_1, \dots, D_\ell) = R(D_\ell)$ ,  $\ell = 1, \dots, L$ .

É fato que existem também fontes que não podem ser refinadas com sucesso. No entanto, a vantagem de se utilizar códigos com refinamento sucessivo pode compensar a perda de desempenho. Na verdade, existem casos em que a perda é até mesmo muito pouco relevante, conforme ilustra o Exemplo 1 de [11]. Sendo assim, em diferentes aplicações, códigos com refinamento sucessivo são utilizados [9], [10]. Considerando o objetivo deste trabalho e por questões de simplicidade, os testes descritos na Seção IV utilizam como referência a fonte gaussiana.

## III. CÓDIGOS DE CONTROLE DE ERRO

Com o objetivo de controlar os erros, os códigos de canal introduzem redundâncias no sistema. Por exemplo, tipicamente um código binário mapeia  $k$  bits da saída do compressor em  $n$  bits para serem transmitidos pelo canal, sendo  $n > k$ . A ideia básica é que com a introdução de  $n - k$  bits redundantes, o decodificador seja capaz de recuperar adequadamente os  $k$  bits da saída do compressor. Definindo a taxa do codificador de canal como sendo  $\frac{k}{n}$ , a capacidade do canal é um limitante superior para as taxas de todos os códigos que operam com probabilidade de erro arbitrariamente baixa. Para diversos modelos de canais, a capacidade pode ser calculada a partir da informação mútua entre entrada e saída do canal [14].

Para atingir uma probabilidade de erro baixa, a decodificação eficiente estima a palavra-código que foi transmitida,

usando o processo que minimiza a probabilidade de erro que, sob certas condições, se baseia no critério de mínima distância de Hamming. Por esta razão, um parâmetro importante de um código de canal é a distância mínima  $d_{\min}$  entre as palavras-códigos. Quando  $d_{\min} = 2t + 1$ , sendo  $t$  um inteiro, o decodificador de mínima distância é capaz de desfazer até  $t$  inversões de bits introduzidas pelo canal. É interessante destacar que em determinadas aplicações, o processo de decodificação incompleto é utilizado, i.e., dependendo do bloco de bits observados na saída do canal, o decodificador pode indicar uma falha de transmissão ao invés de efetivamente estimar a palavra-código transmitida. É interessante notar que um código com  $d_{\min} = 2t + 1$  permite diferentes modos de operação, conforme a descrição a seguir.

- Modo 1: corrige até  $t$  erros;
- Modo 2: corrige até  $t - 1$  erros e detecta  $t$  e  $t + 1$  erros;
- ...
- Modo  $t$ : corrige 1 erro e detecta  $2, \dots, 2t - 1$  erros; e
- Modo  $t+1$ : detecta até  $2t$  erros.

A literatura de códigos de controle de erro é muito vasta e existem diferentes soluções que englobam códigos lineares em bloco, códigos convolucionais, decodificação iterativa, concatenação de códigos, etc [13]. Esta diversidade de soluções está presente nos diferentes sistemas de comunicações utilizados na prática. Considerando que o objetivo deste trabalho é mostrar que o uso de esquemas com decodificação incompleta, em sistemas de comunicação com transmissão progressiva, resultam em desempenho superior ao desempenho de outros esquemas, escolheu-se, por simplicidade, examinar um sistema que utiliza o código de Golay, com parâmetros  $(n, k, d_{\min}) = (23, 12, 7)$ . Para este código, existem até  $t + 1 = 4$  modos de decodificação.

#### IV. MODOS DE DECODIFICAÇÃO

A principal contribuição deste trabalho é demonstrar que um sistema de comunicação que opera com transmissão progressiva e usa decodificação incompleta possui desempenho superior se ajustado de forma adequada. Esta demonstração é realizada calculando-se o desempenho de um sistema de comunicação hipotético, destituído de retransmissão. A seguinte configuração foi considerada. O sistema transmite a saída de uma fonte gaussiana, comprimida com um codificador de fonte com refinamento sucessivo. Neste caso, um vetor gaussiano  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_N)$ , com  $N$  amostras da fonte, é mapeado em uma palavra-de-código-fonte  $\mathbf{s} = (\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_L)$  com  $L$  níveis de refinamentos sucessivos. A palavra  $\mathbf{s}$  corresponde a uma sequência de bits particionada em  $L$  segmentos, cada segmento  $\mathbf{s}_\ell$  contendo  $NR_\ell$  bits,  $\ell = 1, \dots, L$ . Este trabalho supõe ainda que o codificador de fonte é eficiente, atingindo aproximadamente a curva  $R(D)$ , dada em (1). Portanto, a cada nível de refinamento as distorções médias observadas são dadas pelo inverso da função taxa-distorção, i.e.,  $D_\ell \approx \sigma^2 2^{-2 \sum_{i=1}^{\ell} R_i}$ ,  $\ell = 1, \dots, L$ . Para proteger o envio de  $\mathbf{s}$ , o sistema utiliza um código linear em bloco com parâmetros  $(n, k, d_{\min})$  e as palavras geradas pelo código de canal são transmitidas por um sistema com modulação digital, com potência ajustada para obter a qualidade desejada. Supõe-se

que a comunicação ocorre através de uma canal perturbado por ruído branco aditivo.

Tipicamente, um sistema de comunicação destituído de retransmissão utiliza esquemas com decodificação completa. Sendo assim, o sistema é projetado de forma que a probabilidade de erro, após a decodificação de canal, seja baixa o suficiente. Neste caso, o sinal comprimido é recebido de forma adequada, com alta probabilidade, e o descompressor obtém à sua saída um sinal  $\hat{\mathbf{u}}$  com o nível de distorção determinado pela taxa utilizada na transmissão,  $R = \sum_{\ell=1}^L R_\ell$ . No entanto, apesar de pequena, a probabilidade de erro é diferente de zero. E, caso ocorra um erro, normalmente o decodificador de fonte falha e o sinal é perdido (i.e., faz-se  $\hat{\mathbf{u}} = 0$ ).

Considerando que a transmissão ocorre de forma progressiva, após receber com sucesso os bits,  $\mathbf{s}_1$ , correspondentes ao primeiro segmento do sinal comprimido, o receptor é capaz de reconstruir uma versão  $\hat{\mathbf{u}}^{[1]} = (\hat{u}_1^{[1]}, \dots, \hat{u}_N^{[1]})$  com distorção média  $D_1$ . Na recepção do segundo segmento, caso a transmissão produza alguma inversão de bit em palavras do código de canal, dependendo do modo de operação do decodificador, pode ocorrer um erro, um acerto ou uma falha de decodificação. Em caso de acerto, o sistema será capaz de reconstruir uma versão  $\hat{\mathbf{u}}^{[2]} = (\hat{u}_1^{[2]}, \dots, \hat{u}_N^{[2]})$  com distorção média  $D_2 < D_1$ . Caso a falha seja observada, o sistema irá operar com a qualidade  $D_1$ . No entanto, em caso de erro, normalmente o processo de descompressão é corrompido e o sinal é perdido. Sendo assim, o uso de um decodificador em modo incompleto pode ser vantajoso.

Conforme foi observado na Seção III, um codificador com  $d_{\min} = 2t + 1$  pode operar em  $t + 1$  modos diferentes. Associado a cada um dos  $t + 1$  modos de decodificação, existem probabilidades de erro, de acerto e de falha do decodificador. Se na recepção dos segmentos  $\mathbf{s}_\ell$ ,  $\ell = 1, \dots, L$ , os modos de decodificação forem variados, a qualidade do sinal recebido será dependente da combinação utilizada. Seja  $p$  a probabilidade de erro do decisor utilizado na demodulação e considere que  $\nu$  é o número de erros que o decodificador corrige em um determinado modo de operação. Sendo assim, na decodificação, a probabilidade de acerto de um bloco é dada por

$$P_a(\nu) = \sum_{i=0}^{\nu} \binom{n}{i} (1-p)^{n-i} p^i,$$

sendo  $\nu = 0, \dots, t$ . As probabilidades de falha e de erro são mais difíceis de serem expressas de forma exata, já que um número elevado de erros pode levar a palavra recebida a regiões em que a diferenciação entre erro e falha é definida pela proximidade com uma palavra-código diferente da transmitida. No entanto, considerando que a probabilidade de se distanciar muito da palavra transmitida é baixa, a probabilidade de falha na decodificação de um bloco pode ser aproximada por

$$P_f(\nu) \approx \sum_{i=\nu+1}^{2t-\nu} \binom{n}{i} (1-p)^{n-i} p^i.$$

Neste caso, uma aproximação para a probabilidade de erro pode ser facilmente calculada pois  $P_e(\nu) = 1 - P_a(\nu) - P_f(\nu)$ .

Considerando que o segmento,  $s_\ell$ , possui  $M_\ell$  blocos do código de controle de erro, a decodificação deste segmento ocorre com sucesso se todos os blocos forem decodificados corretamente. Sendo assim, a probabilidade de acerto do segmento  $\ell$  é dada por

$$P_a^{[\ell]}(\nu) = \{P_a(\nu)\}^{M_\ell}. \quad (3)$$

Por outro lado, qualquer erro produzido pelo decodificador implica em erro de recepção do segmento. Portanto, a probabilidade de erro do  $\ell$ -ésimo segmento é dada por

$$P_e^{[\ell]}(\nu) = \sum_{i=0}^{M_\ell-1} \binom{M_\ell}{i} \{P_a(\nu)\}^i \{P_e(\nu)\}^{M_\ell-i}. \quad (4)$$

Considerando o segmento com  $M_\ell$  blocos do código de controle de erro, a falha de transmissão é indicada sempre que há pelo menos uma falha de decodificação. Neste caso, a probabilidade deste evento é dada por

$$P_f^{[\ell]}(\nu) = 1 - P_a^{[\ell]}(\nu) - P_e^{[\ell]}(\nu). \quad (5)$$

Neste ponto, é possível observar que a qualidade do sistema de transmissão depende de dois parâmetros: (a) probabilidade de perder o sinal,  $P_p$ , e (b) média da distorção,  $D_m$ , do sinal reconstruído, dado que não houve perda. É interessante notar que a perda ocorre sempre que há falha da decodificação do primeiro segmento ou quando há erro na decodificação de algum segmento. Portanto, se  $\nu_\ell$  é o número de erros corrigidos na decodificação dos blocos do segmento  $\ell$ , tem-se

$$P_p = P_e^{[1]}(\nu_1) + P_f^{[1]}(\nu_1) + \sum_{\ell=2}^L P_e^{[\ell]}(\nu_\ell) \prod_{\lambda=1}^{\ell-1} P_a^{[\lambda]}(\nu_\lambda).$$

Por outro lado, a média da distorção pode ser calculada sabendo que o sistema de comunicação produz uma versão do sinal com distorção  $D_{\ell-1}$  sempre que os segmentos  $1, \dots, \ell-1$  forem decodificados com sucesso e que, na decodificação do  $\ell$ -ésimo segmento, há uma falha. Sendo assim,

$$D_m = D_L \prod_{\ell=1}^L P_a^{[\ell]}(\nu_\ell) + \sum_{\ell=1}^{L-1} D_\ell P_f^{[\ell+1]}(\nu_{\ell+1}) \prod_{\lambda=1}^{\ell} P_a^{[\lambda]}(\nu_\lambda).$$

Este trabalho mostra que a melhor opção não é necessariamente a utilização de decodificação completa em todos os níveis de refinamento. De fato, na Seção V, um sistema de comunicação hipotético é utilizado para mostrar que há uma estratégia de decodificação que produz uma redução da potência de transmissão, para uma dada distorção.

## V. RESULTADOS

Com o objetivo de provar o conceito de que uma combinação de modos de decodificação produz ganhos no sistema de comunicação introduzido na Seção IV, foram realizados experimentos considerando a configuração a seguir. A fonte de informação considerada produz uma sequência de símbolos modelados por uma gaussiana de média nula e variância unitária. O código de fonte foi ajustado para operar com  $L = 5$  níveis de refinamento e com um bloco de  $N = 1200$  amostras. As taxas do código de fonte foram ajustadas de acordo com a Tabela I, onde também pode ser observado o nível de distorção

em cada nível de refinamento. O código de canal utilizado foi o de Golay com parâmetros (23,12,7), que permite reverter até  $t = 3$  inversões de bits. Neste caso, o número de blocos que o código de canal produz para cada segmento dos dados comprimidos é dado por  $M_\ell = \frac{1}{12}1200R_\ell$ . Estes valores também são apresentados na Tabela I. Como a falha no primeiro segmento dos dados impede a reconstrução de uma versão do sinal com qualidade mínima, na recepção desta parcela sempre foi utilizado o decodificador completo. Para os demais segmentos, com  $\ell = 2, \dots, 5$ , foram testados os quatro modos distintos de decodificação. Para a prova de conceito, a modulação utilizada foi a QPSK.

TABELA I: Taxas e distorções para os níveis de refinamento.

$\ell$	1	2	3	4	5
$R_\ell$	2	1	1	1	1
$D_\ell$	6.25e-2	1.56e-2	3.91e-3	9.8e-4	2.44e-4
$M_\ell$	200	100	100	100	100

O ganho que um modo de decodificação pode produzir, para diferentes valores de razão sinal ruído  $\frac{E_b}{N_0}$ , foi obtido calculando-se a probabilidade de perda de transmissão e a média da distorção para todas as configurações possíveis. É importante observar que o número de configurações distintas é igual a  $(t+1)^{L-1}$ , ou seja, cresce exponencialmente com o número de segmentos. Para o caso do sistema analisado, este número é igual a 256. A Figura 1 apresenta as probabilidades de perda de transmissão da solução convencional (com decodificação completa em todos os segmentos) e da melhor configuração obtida. Esta melhor configuração foi encontrada a partir de uma busca exaustiva, considerando todas as soluções capazes de atingir uma distorção média com uma perda menor ou igual a 2% da distorção  $D_5$ . A Figura 1 mostra que, para este sistema específico, há esquemas de decodificação que produzem um ganho de aproximadamente 0,2 dB na razão sinal ruído, provando assim o conceito. É importante destacar que este resultado depende fortemente das características da fonte. No caso da fonte gaussiana, a curva taxa-distorção mostra que um acréscimo de 1 bit/amostra na taxa produz uma redução de 4 vezes na distorção. De fato, os valores apresentados na Tabela I ilustram esta característica. Em muitas aplicações práticas, a curva taxa-distorção possui um comportamento bem distinto. Por exemplo, em [15], [16], os testes realizados em imagens de satélites de sensoriamento remoto comprimidas com o compressor recomendado pelo *The Consultative Committee for Space Data Systems* mostram que a distorção provocada pelo descarte do último segmento representa aproximadamente 50% dos bits da imagem comprimida. Para curvas taxa-distorção com esta característica, espera-se que o ganho de potência seja maior. Portanto, este artigo conjectura que o ganho seja significativamente maior em aplicações envolvendo imagens comprimidas.

Este trabalho identificou as configurações que produzem os melhores resultados para o sistema testado. Para 100 valores distintos de razão  $\frac{E_b}{N_0}$ , a Tabela II mostra as configurações encontradas e o número de vezes em que cada uma das configurações apresentou o melhor resultado. É possível notar

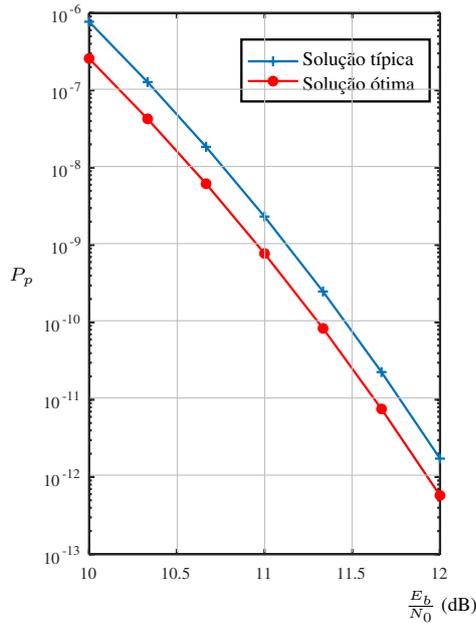


Fig. 1: Probabilidade de perda de transmissão

que as soluções ótimas, em geral, utilizam modos de decodificação em que o número de erros corrigidos diminui para os segmentos referentes aos níveis de refinamento mais elevados. De fato, as linhas da tabela com configurações (1,2,2,3,2), (1,2,3,2,2) e (1,3,3,2,2), que não possuem esta característica, representam apenas 3% dos casos. Este resultado é importante pois pode indicar uma forma eficiente de encontrar a solução ótima, sem utilizar a busca exaustiva que possui complexidade computacional crescendo exponencialmente com o número de segmentos.

TABELA II: Melhores configurações.

	Segmentos					%
	1 <sup>o</sup>	2 <sup>o</sup>	3 <sup>o</sup>	4 <sup>o</sup>	5 <sup>o</sup>	
Modos	1	2	2	2	2	25
	1	2	2	2	3	24
	1	2	2	3	2	1
de Decodificação	1	2	2	3	3	22
	1	2	3	2	2	1
	1	2	3	3	3	19
	1	3	3	2	2	1
	1	3	3	3	3	5

Por fim, é importante destacar que, no melhor conhecimento dos autores, os resultados apresentados na Figura 1 são os primeiros a indicar a possibilidade de explorar os modos diferenciados de decodificação em sistemas com transmissão progressiva. Não menos importante é notar que o esquema proposto prescinde de qualquer modificação no código de controle de erro. Este conceito pode ser aplicado com relativa facilidade em diferentes sistemas de comunicação, como por exemplo os que transmitem imagens de satélites de sensoriamento remoto, modificando ligeiramente o receptor, sem qualquer necessidade de alteração do transmissor.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que a variação do modo de decodificação para o código de canal pode produzir ganhos em sistemas com transmissão progressiva. Utilizando um sistema de comunicação com: (a) fonte gaussiana, (b) compressor com refinamento sucessivo, operando próximo da curva taxa-distorção, (c) código de Golay (23,12,7) e (d) modulação QPSK, foi possível atingir ganhos de aproximadamente 0,2 dB na razão sinal-ruído. Este trabalho conjectura que seja possível atingir ganhos significativamente maiores para sistemas que transmitem sinais em que o segmento referente ao último grau de refinamento seja responsável por uma redução pequena na distorção e que contenha um número significativo de bits. Sistemas de transmissão de imagens de satélites de sensoriamento remoto, como os estudados em [15], [16], são exemplos de sistemas com esta característica. Este artigo também mostra que a configuração ótima dos modos de decodificação, em geral, possui uma determinada característica que pode facilitar a busca pela melhor solução.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. S. Tanenbaum, & D. Wetherall, *Computer Networks*. Pearson Prentice Hall, 2011.
- [2] S. Vembu, S. Verdu, & Y. Steinberg, “The source-channel separation theorem revisited,” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 41, pp. 44-54, 1995.
- [3] I. Csiszar, “On the error exponent of source-channel transmission with a distortion threshold,” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 28, pp. 823-828, 1982.
- [4] S. Borade, B. Nakiboglu, & L. Zheng, “Unequal error protection: an information theory perspective,” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 55, pp. 5511-5539, 2009.
- [5] V. Chande, & N. Farvardin, “Progressive transmission of images over memoryless noisy channels,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 18, pp. 850-860, 2000.
- [6] S. S. Arslan, P. C. Cosman, & L. B. Milstern, “Generalized unequal error protection LT codes for progressive data transmission,” *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 21, pp. 3586-3597, 2012.
- [7] C. Schwartz, C. Torezzan, & L. T. Duarte, “A UEP method for imaging low-orbit satellites based on CCSDS recommendations,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 15, pp. 1770-1774, 2018.
- [8] M. G. Costa, & M. S. Pinho, “An algorithm for optimal unequal error protection rate allocation exploring granular channel rates,” *IEEE Communications Letters*, v. 22, pp. 926-929, 2018.
- [9] H. Schwarz, & M. Wien, “The Scalable Video Coding Extension of the H.264/AVC Standard,” *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 25, pp. 135-141, 2008.
- [10] D. Taubman, & M. Marcellin, *JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice*. The Springer International Series in Engineering and Computer Science, 2001.
- [11] M. Effros, “Distortion rate bounds for fixed- and variable-rate multiresolution source codes,” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 45, pp. 1887-1910, 1999.
- [12] W. H. R. Equitz, & T. M. Cover, “Successive refinement of information,” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 37, pp. 269-275, 1991.
- [13] R. E. Blahut, *Algebraic codes for data transmission*. Cambridge University Press, 2003.
- [14] T. M. Cover, & J. A. Thomas, *Elements of information theory*. Wiley-Interscience, 2006.
- [15] F. S. Marques, M. S. Pinho, & W. A. Finamore, “Designing an efficient LT-code with unequal error protection for image transmission,” *Proceedings of SPIE 9643, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI*, 96431H, 2015.
- [16] M. G. Costa, C. Schwartz, & M. S. Pinho, “Proteção desigual de erros para transmissão de imagens de sensoriamento remoto em função de um critério de qualidade,” *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2017.