

Impacto do uso de portadoras espalhadas no tempo para estimação de canal no sistema ISDB-T

Christofer Schwartz e Evelio Martín García Fernández

Resumo—Apresentamos o impacto de diferentes técnicas de equalização de canal no desempenho do sistema ISDB-T de radiodifusão de TV Digital. Métodos de equalização de canal usando portadoras pilotos foram avaliados em canais com desvanecimento na presença de ruído Gaussiano. Simulações computacionais mostram que, em termos de relação custo-benefício, a estimação em uma dimensão é a opção mais interessante a se ter em conta no projeto de receptores de TV digital. Essa opção é ainda mais adequada para ser considerada no projeto de receptores móveis.

Palavras-Chave—ISDB-T, Estimação de canal, Canais com desvanecimento.

Abstract—The impact of different equalization techniques on the error performance of the ISDB-T Digital TV broadcasting is presented. Methods of channel equalization using pilot carriers were evaluated in fading channels in the presence of Gaussian noise. Computer simulations show that in terms of cost-benefit analysis, the one-dimensional linear interpolation is the most interesting option to be taken into account in the design of digital TV receivers. This is even the most suitable option to be considered in the design of mobile receivers.

Keywords—ISDB-T, Channel estimation, Fading channels.

I. INTRODUÇÃO

O padrão de transmissão terrestre utilizado no Sistema Brasileiro de TV Digital, o ISDB-T, prevê a utilização de portadoras de controle para estimação de canal. A estimação de canal tem o objetivo de mitigar os efeitos causados pelo canal de transmissão ao sinal transmitido. Para isso, são utilizados métodos de interpolação para chegar a uma resposta estimada do canal, com base na resposta do canal calculada para as portadoras de controle. Podem ser utilizadas portadoras de controle no sentido da frequência e no sentido do tempo do quadro OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Ambas as técnicas trazem impactos positivos e negativos, que serão objeto de estudo do presente trabalho.

Este trabalho utiliza o simulador desenvolvido em [1], para avaliar o impacto da utilização das portadoras piloto espalhadas no domínio do tempo, (SP: *Scattered Pilots*), no desempenho do sistema ISDB-T. Poucos artigos foram encontrados na literatura científica avaliando métodos de estimação de canal para o sistema ISDB-T. Em [2], são avaliados métodos de interpolação para realizar a equalização de canal do sistema, utilizando a taxa de erro de modulação (ou MER: *Modulation Error Rate*) como métrica de desempenho em função da relação sinal-ruído (SNR). Porém, nesse trabalho, a equalização de canal foi tratada de forma isolada, sem levar em

consideração a sua interação com o esquema de codificação de canal.

Em [3] é apresentada a estimação de canal para o sistema ISDB-T como base para o sistema proposto para o MI-SBTVD (Modulação Inovadora para o Sistema Brasileiro de TV Digital), porém não são apresentados resultados que descrevam o impacto da utilização das portadoras SP no domínio do tempo (estimação 2D) e no desempenho do sistema.

No presente trabalho, será avaliado o desempenho do sistema de transmissão ISDB-T como um todo segundo descrito na norma brasileira [4], utilizando com métrica de desempenho a taxa de erro de bits (BER: *Bit Error Rate*).

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: na próxima seção será feita uma breve abordagem do sistema de transmissão do padrão ISDB-T. Na seção III serão tratados os métodos de estimação de canal previstos pelo padrão. Resultados de simulações realizadas mostrando o impacto da estimação de canal no desempenho de erro serão apresentados na seção IV. Por fim, na seção V serão apresentadas considerações finais sobre o trabalho.

II. REVISÃO DO SISTEMA ISDB-T

O padrão ISDB-T, desenvolvido pela ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*) em 1998, utiliza o sistema de modulação BST-OFDM (*Band Segmented Transmission-OFDM*). Nessa variação de configuração OFDM o espectro é dividido em 13 segmentos que por sua vez são combinados em três camadas hierárquicas, visando recepção parcial do sinal por meio de receptores portáteis. Além da segmentação da banda o sistema ISDB-T também conta com o entrelaçamento temporal de subportadoras, que visa minimizar a degradação de desempenho provocada pela recepção móvel e pelo multi-percurso. Os parâmetros configuráveis desse sistema podem ser consultados em [4].

A codificação de canal utilizada no sistema ISDB-T consiste em um esquema de codificação concatenado tendo um código de Reed-Solomon encurtado, RS(204,188), como código externo e um código convolucional de taxa 1/2 e comprimento de restrição igual a 7 como código interno. Diferentes taxas de codificação para cada uma das camadas hierárquicas do sistema de modulação podem ser obtidas através do punçãoamento da mensagem codificada pelo codificador convolucional. Isso consiste em eliminar alguns bits após a codificação antes da transmissão, obtendo-se dessa forma taxas de codificação de valor 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8.

A informação digital a ser transmitida é mapeada para as subportadoras dos símbolos OFDM através de constelações de modulação digital tais como: $\pi/4$ -DQPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM.

A. Estrutura do Quadro OFDM

Um quadro OFDM é composto por 204 símbolos OFDM, e pode ser dividido em 13 segmentos no domínio da frequência, como mostrado na Figura 1.

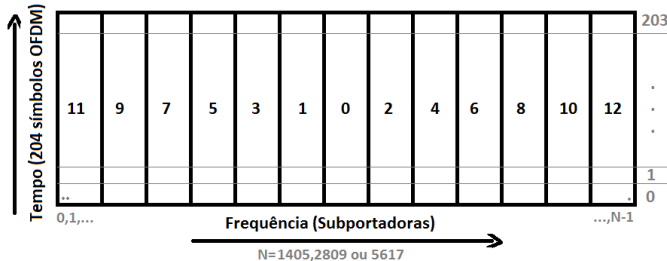


Fig. 1. Estrutura de um quadro OFDM.

Variar a quantidade de subportadoras por símbolo OFDM pode ser interessante do ponto de vista da flexibilidade do sistema perante a interferências no canal de transmissão. Pode-se tornar o sistema mais robusto frente a multipercurso aumentando o número de subportadoras, mas isso irá torná-lo mais suscetível a interferências por efeito Doppler. Em vista desse compromisso são previstos três modos de operação distintos que permitem configurar o sistema de forma a melhor adequá-lo às particularidades da propagação em cada região. As quantidades de subportadoras por símbolo OFDM utilizadas são 1405, 2809 e 5617 respectivamente para os modos 1, 2 e 3. Nessas quantidades já estão incluídas portadoras de dados e portadoras de controle.

Os tipos de portadoras de controle (sinais piloto) são:

- Piloto espalhado, SP (*Scattered Pilot*);
- Piloto contínuo, CP (*Continual Pilot*);
- Controle e configuração de transmissão e de multiplexação, TMCC (*Transmission and Multiplexing Configuration Control*);
- Canal auxiliar, AC (*Auxiliary Channel*).

São de especial interesse nesse trabalho as portadoras SPs, que são as utilizadas pelo receptor para fins de estimação da resposta do canal. As TMCC carregam as informações de parâmetros do sistema de transmissão. As portadoras do tipo AC são utilizadas para transmitir informações auxiliares. As CPs são utilizadas em segmentos de modulação diferencial e tem o mesmo objetivo que as portadoras SPs.

No sistema ISDB-T existem quatro blocos de entrelaçamento distintos. De forma geral, todos têm o objetivo de aumentar a eficiência dos códigos corretores, pois eles evitam seqüências de erros nos dados através do espalhamento dos mesmos. Esses blocos estão implementados no simulador apresentado em [1], porém, não serão detalhados neste artigo.

O processo de estimação de canal é um etapa presente nos receptores que será descrita na próxima seção.

III. ESTIMAÇÃO DE CANAL

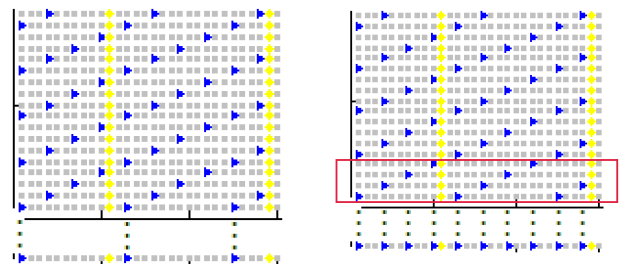
O processamento do sinal OFDM no receptor ISDB-T inclui a remoção do intervalo de guarda dos símbolos OFDM,

realização da FFT e a leitura dos sinais pilotos e estimação de canal. Na seqüência, os símbolos complexos resultantes da FFT são desentrelaçados e as demais etapas de tratamento da informação são realizadas (demodulação, decodificação de canal, entre outras).

É possível utilizar dois tipos de estimadores de canal para o sistema ISDB-T:

- Estimação em uma dimensão: 1D (frequência);
- Estimação em duas dimensões: 2D (frequência e tempo).

A diferença entre essas duas formas de estimação está na forma em que a leitura das portadoras de referência é feita. Essa diferença pode ser vista analisando a Figura 2.



(a) Estimação em uma dimensão. (b) Estimação em duas dimensões.

Fig. 2. Quantidade de portadoras SPs utilizadas para estimação de canal.

A Figura 2 mostra a aquisição de portadoras SPs (representadas por triângulos azuis) que serão utilizadas como referência para estimação da resposta do canal. Para o método de estimação 1D, são utilizadas apenas as portadoras de referência do símbolo em análise. Após a leitura destas portadoras de referências (última linha da Figura 2(a)), os valores lidos são comparados com os valores conhecidos pelo receptor, calculando a resposta estimada do canal para cada SP.

Para estimação em duas dimensões, Figura 2(b), está em destaque a utilização das portadoras de referências de quatro símbolos OFDM (retângulo vermelho). As portadoras de três símbolos OFDM, adjacentes ao símbolo em análise, são utilizadas. Como especificado por [4], as portadoras SPs (triângulos azuis) são espalhadas de 12 subportadoras no sentido da frequência e de quatro subportadoras no sentido dos símbolos OFDM (tempo), o que resulta em um espaçamento significativamente reduzido entre as SPs após realizar a leitura das SPs dos símbolos adjacentes (última linha da Figura 2(b)).

A relação, no domínio da frequência, entre o sinal transmitido (antes da IFFT no transmissor), $X(n_s, n_p)$, e o sinal recebido (após a FFT no receptor), $Y(n_s, n_p)$, para cada subportadora é dada por:

$$Y(n_s, n_p) = X(n_s, n_p)H(n_s, n_p) + N(n_s, n_p), \quad (1)$$

onde $H(n_s, n_p)$ é a função de transferência do canal naquele ponto e $N(n_s, n_p)$ é o ruído AWGN adicionado à subportadora. Os índices n_s e n_p representam, respectivamente, o número do símbolo OFDM no quadro e o número da subportadora (no sentido da frequência) no símbolo OFDM. Para estimação em uma dimensão, n_s não varia, ou seja, é sempre igual ao valor do símbolo em análise.

A função de transferência estimada do canal para cada subportadora ($\hat{H}(n_s, n_p)$), pode ser calculada através de:

$$\hat{H}(n_s, n_p) = \frac{Y(n_s, n_p)}{X(n_s, n_p)}. \quad (2)$$

Por fim, basta realizar uma interpolação entre os pontos calculados, buscando obter uma resposta estimada do canal para as demais subportadoras, que estão localizadas entre as portadoras de referência.

Um método de interpolação bastante utilizado é o *Cubic-Spline*, que utiliza polinômios de terceira ordem para realizar a interpolação. As interpolações por *splines* são casos especiais da interpolação *piecewise* polinomial. Esse método possui boa resposta até mesmo utilizando polinômios de baixo grau, devido à interpolação *spline* evitar o fenômeno de instabilidade numérica, que aparece quando se utilizam polinômios de grau elevado. Em [2] esse método de interpolação, para estimação em duas dimensões, apresentou resultados superiores frente aos demais métodos: interpolação exponencial, *piecewise* e linear. Porém, para canais sem efeito Doppler (recepção fixa). Contudo, simulações considerando o efeito Doppler (recepção móvel), têm mostrado que a estimação em uma dimensão apresenta melhores resultados [2]. Como é de interesse desse artigo, na próxima seção, será analisado o impacto da estimação de canal em uma e duas dimensões utilizando o método de interpolação *Cubic-Spline*, em canais com desvanecimento.

IV. ANÁLISE EM CANAIS COM DESVANECIMENTO

Para analisar o desempenho do bloco de estimação, foi criado um cenário para transmissão de um quadro OFDM em que as portadoras de dados utilizam constelações de modulação 16-QAM síncrona. O sistema opera em modo 1 com taxa de intervalo de guarda igual a 1/8. O modelo de canal utilizado foi o Brasil B (grandes atrasos e atenuações de sinais relativamente altas) [5], especificado no ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication), e não foi inserido ruído AWGN (o termo $N(n_s, n_p)$ da equação (1) é zero). Assim, os danos causados à constelação recebida são atribuídos às características de multipercurso do canal. Isso torna possível avaliar o impacto direto do estimador, pois a inserção de ruído irá prejudicar o desempenho deste. O diagrama de constelação dos símbolos recebidos sem equalização pode ser visto na Figura 3 onde são mostrados os símbolos da constelação 16-QAM recebida contidos em um símbolo OFDM inteiro, ou seja, estão plotadas todas as subportadoras de dados do mesmo. Pode-se notar que não é viável realizar o demapeamento destes símbolos sem antes equalizar tal constelação através da estimação de canal.

Uma vez recebido o quadro, pode-se optar por utilizar a estimação 1D ou 2D. A resposta do canal para um símbolo OFDM, obtida através da estimação em uma dimensão, é mostrada na Figura 4. Note-se que é feita uma comparação da resposta estimada do canal com a resposta real. A resposta real é calculada utilizando a Equação (2) para todas as subportadoras do símbolo OFDM.

Pode-se obter uma visão mais ampliada do resultado da interpolação através da Figura 5, que mostra apenas as 50 primeiras subportadoras do símbolo OFDM.

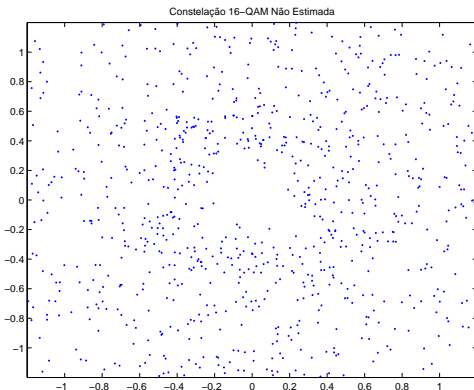


Fig. 3. Constelação 16-QAM recebida sem estimação de canal, considerando a transmissão de um símbolo OFDM por um canal com desvanecimento Rayleigh (Brasil B).

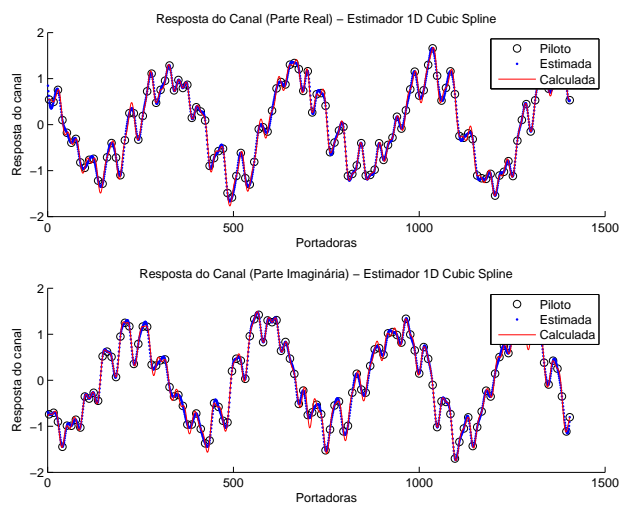


Fig. 4. Resultado do estimador de canal 1D *Cubic-Spline* para um símbolo OFDM em modo 1 (canal Brasil B).

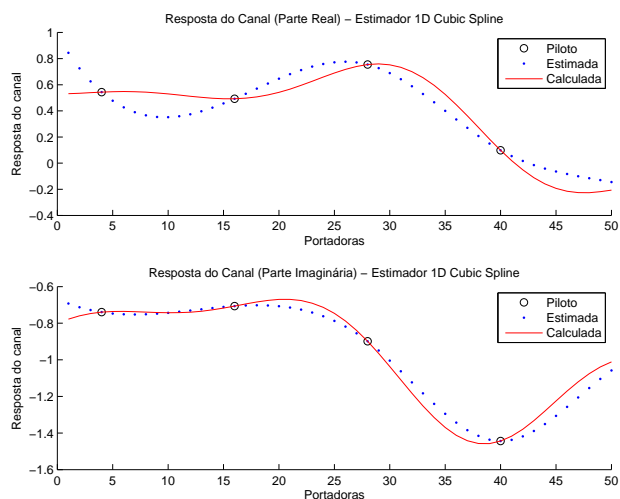


Fig. 5. Resultado do estimador de canal 1D *Cubic-Spline* para as 50 primeiras subportadoras de um símbolo OFDM em modo 1 (Canal Brasil B).

Nota-se que a distância entre as subportadoras SPs não é suficiente para garantir que a interpolação seja precisa. Por

menor que seja o erro de estimação, os símbolos QAM ainda irão se encontrar deslocados de sua posição ideal, como ilustra a Figura 6.

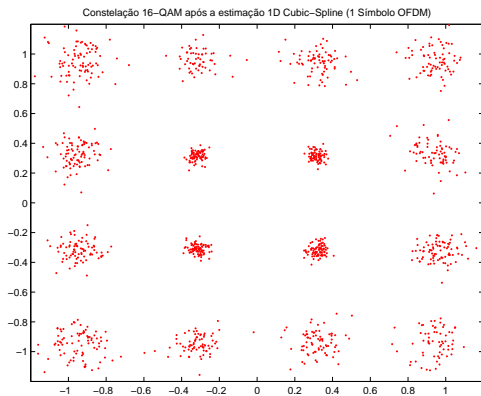


Fig. 6. Constelação 16-QAM das subportadoras recebidas de um símbolo OFDM com estimação 1D *Cubic-Spline* considerando a transmissão por um canal com desvanecimento Rayleigh (Brasil B).

A mesma análise pode ser feita para o método de estimação em duas dimensões. A Figura 7 mostra o resultado da estimação de canal para as 50 primeiras subportadoras de um símbolo OFDM.

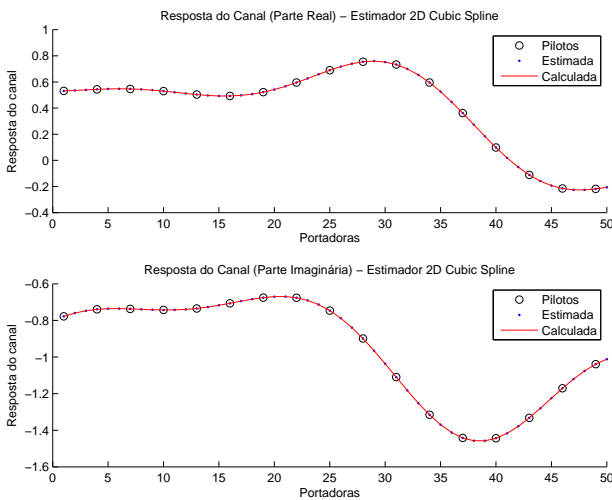


Fig. 7. Resultado do estimador de canal 2D *Cubic-Spline* para as 50 primeiras subportadoras de um símbolo OFDM em modo 1 (Canal Brasil B).

Pode-se observar que os erros de interpolação foram significativamente reduzidos pela estimação de canal 2D. Essa melhoria é atribuída à redução de espaçamento entre as portadoras de referência. A constelação corrigida com o método de estimação 2D é mostrada na Figura 8.

V. ANÁLISE EM CANAIS COM DESVANECIMENTO E RUÍDO BRANCO GAUSSIANO ADITIVO

Pode-se notar que a estimação 2D *Cubic Spline* corrigiu todos os danos causados pelo canal ao símbolo OFDM analisado na seção anterior em que somente foi considerado o efeito do multi-percurso no sinal recebido. Quando considerado também o ruído térmico presente na entrada do receptor, o desempenho

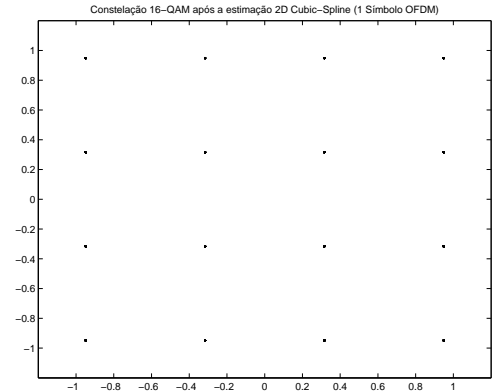


Fig. 8. Constelação 16-QAM das subportadoras recebidas de um símbolo OFDM com estimação 2D *Cubic-Spline* considerando a transmissão por um canal com desvanecimento Rayleigh (Brasil B).

do estimador cai consideravelmente devido ao efeito do ruído sobre as portadoras de referência. Os erros de estimação podem ser apreciados na Figura 9, que mostra o resultado da estimação 2D (50 primeiras portadoras) para o mesmo cenário em que os resultados da seção anterior foram obtidos, porém considerando agora uma relação sinal-ruído de 12 dB.

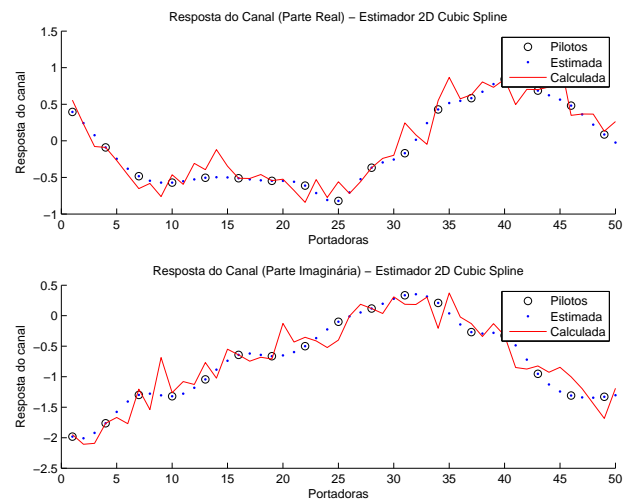


Fig. 9. Constelação 16-QAM das subportadoras recebidas de um símbolo OFDM com estimação 2D *Cubic-Spline* considerando a transmissão por um canal com desvanecimento Rayleigh (Brasil B) e 12dB de SNR.

Essa queda de desempenho causada pelo estimador é de aproximadamente 2 dB e pode ser apreciada na Figura 10, que mostra várias curvas de desempenho de erro com a utilização de estimação de canal considerando canal AWGN. Desta forma, como o canal é sem desvanecimento, o estimador realiza uma falsa equalização do sinal devido à leitura das portadoras SPs ruidosas, propagando o erro às demais portadoras (portadoras de dados).

Por fim, utilizando o simulador desenvolvido em [1], foi parametrizado um cenário que corresponde ao utilizado na prática pelas emissoras de televisão do Brasil com o sistema operando em modo 3, código convolucional com taxa 3/4, profundidade de entrelaçamento igual a zero e modulação 64-QAM. Essa parametrização é utilizada para transmitir um

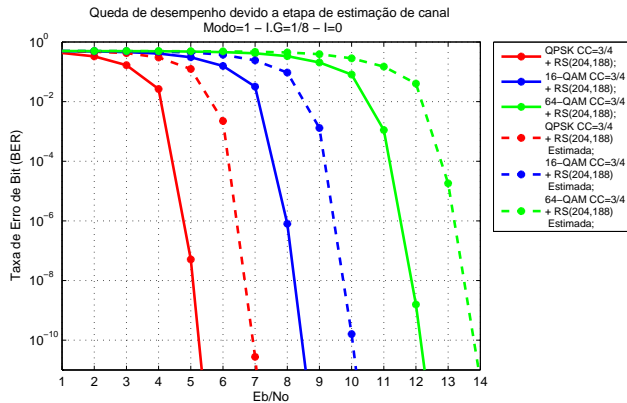


Fig. 10. Desempenho de erro do sistema, em termos de BER, considerando canal AWGN.

programa de TV em alta definição (HDTV: *High-Definition TV*). O desempenho de erro do sistema foi estimado através de simulação de Monte Carlo utilizando-se como critério de parada a contagem de pelo menos 100 erros de bit.

O modelo de canal utilizado foi o Brasil A [5] que considera recepção com antena externa. Em [6], é trazida uma curva de desempenho medida do sistema ISDB-T operando, com esses parâmetros, para o modelo de canal Brasil A. Essa curva medida foi utilizada para validar o simulador descrito em [1], tornando válido os resultados das simulações aqui apresentadas.

A Figura 11 mostra os resultados das simulações considerando três tipos de estimação de canal: estimação ideal, estimação 2D *Cubic Spline* e estimação 1D *Cubic Spline*.

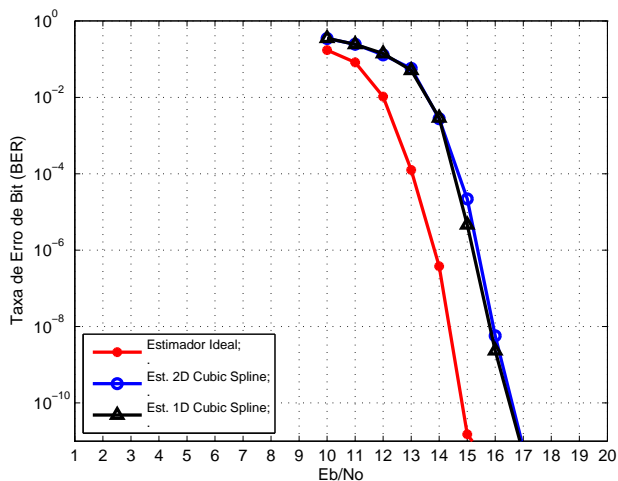


Fig. 11. Desempenho de erro do sistema, em termos de BER, considerando canal com desvanecimento na presença de ruído Gaussiano (modo 3).

A curva mostrando o desempenho de erro com estimação ideal foi traçada calculando a resposta de frequência do canal para cada subportadora do símbolo OFDM, como se o receptor tivesse conhecimento do valor de cada subportadora transmitida. Esse resultado é gerado apenas para fazer uma análise comparativa com os demais métodos (utilizados na prática). Nota-se que os métodos de estimação 2D *Cubic*

Spline e 1D *Cubic Spline* tiveram desempenho similar para os parâmetros de transmissão comumente utilizados no Brasil. O esperado seria que o método de estimação em duas dimensões tivesse um desempenho superior. Isso não acontece devido ao efeito negativo do ruído térmico sobre as portadoras SPs dos três símbolos adjacentes utilizados para estimação em duas dimensões. Outro fator que contribui para a similaridade dos resultados é uma maior proximidade, em frequência, das portadoras pilotos, quando o sistema opera em modo 3. Isso faz com que o interpolador 1D produza melhores resultados em comparação com os demais modos de operação.

VI. CONCLUSÕES

Apesar de não se ter conhecimento de quais métodos de estimação são utilizados na prática, decorrente dos projetos de receptores de TV digital serem de propriedade dos fabricantes, o sistema de estimação de canal em duas dimensões com método de interpolação *Cubic Spline* apresentou bom desempenho frente ao espalhamento temporal.

Os resultados das simulações realizadas neste trabalho mostram que, quando é considerado também o efeito do ruído térmico no canal com desvanecimento, utilizando os parâmetros práticos de transmissão, o desempenho de erro do sistema, que faz uso da estimação de canal em uma e duas dimensões, é semelhante. Para altos valores de relação sinal-ruído, caso em que o desempenho do sistema estaria sendo mais afetado pelo efeito do multipercurso, o método de estimação em duas dimensões poderia ser, em princípio, mais vantajoso. Porém, o uso de esquemas muito eficientes de codificação de canal no padrão ISDB-T possibilita a correção de erros nesse caso, fazendo com que o desempenho do sistema com os dois tipos de estimação de canal seja similar para o modo de operação utilizado. Simulações utilizando canais mais seletivos em frequência podem exigir mais dos interpoladores, porém, deve ser levado em consideração que o modelo de canal Brasil A representa a principal condição de transmissão enfrentada pelo sistema operante. Tendo em conta que a estimação 2D implica em maior complexidade computacional e, portanto, num consumo de energia maior, pode-se concluir que, em termos de relação custo-benefício, a estimação em uma dimensão é a opção mais interessante a se ter em conta no projeto de receptores de TV digital. Essa opção é ainda a mais adequada para ser considerada no projeto de receptores móveis, visando mitigar o consumo de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Schwartz, *Ferramenta de Previsão de Desempenho do Sistema ISDB-T de TV Digital*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2011.
- [2] A. K. Ishini e C. Akamine, "Técnicas de Estimação de Canal para o Sistema ISDB-T_b". *Revista de Radiodifusão*, v. 03, p. 151-157.
- [3] G. C. Lima, F. J. A. de Aquino, R. Machado, B. F. Uchôa Filho, M. N. Neto, R. S. Demo, "Projeto MI-SBTVD: STC-OFDM e Estimação de Canal". *Revista Científica Periódica - Telecomunicações*, v. 09, 2006.
- [4] Televisão Digital Terrestre - Sistema de Transmissão. *ABNT NBR 15601:2007*.
- [5] ABERT/SET, *Brazilian Tests on Digital Television Systems*, 2000.
- [6] L. L. Mendes, J. M. C. Brito, F. A. Cardoso, D. A. Guimarães, G. C. Lima, G. G. R. Gomes, D. S. Arantes e R. S. Demo, *MI-SBTVD: A proposal for the brazilian digital television system SBTVD*. *Journal of the Brazilian Computer Society*, vol. 12 no. 4, 2007.