

Universidade Federal do ABC
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Curso de Engenharia de Informação

Caio Alvares De Angelis

Simulação de Sistemas de Televisão Digital Terrestre

Trabalho de Graduação III



Santo André – SP

Abril de 2019

Simulação de Sistemas de Televisão Digital Terrestre

Caio Alvares De Angelis

Relatório submetido como requisito para obtenção grau de Bacharel em
Engenharia de Informação

Orientado por Prof. Dr. Claudio José Bordin Jr.



Universidade Federal do ABC

Santo André – SP

Abril de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Claudio José Bordin Jr., pelo suporte e atenção empregados, não somente durante o TG, mas durante toda a graduação.

Agradeço também aos demais Professores, aos TA's, amigos e colegas do curso de Engenharia de Informação. Não posso deixar de agradecer à minha família e amigos pelo incentivo e apoio constantes, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, desenvolve-se um simulador para o sistema de televisão digital ATSC 3.0, que objetiva transmitir vídeo em altíssima definição através de canais terrestres seletivos de frequência. Apresenta-se uma breve revisão do histórico da tecnologia de transmissão de TV e, com base na literatura disponível, desenvolveu-se um simulador para o padrão ATSC 3.0 no qual se buscou reproduzir fielmente as características do padrão. Para avaliar o desempenho do sistema ATSC 3.0 em termos de BER (taxa de erro de bit) média, elaborou-se um simulador do MATLAB que emprega parâmetros de canal exatos, e estimados através de sinais de referência. As simulações numéricas indicaram valores médios de BER próximos aos encontrados na literatura para as configurações consideradas.

Palavras chave:

Simulação de sistemas de comunicação, Televisão Digital, ATSC 3.0, Codificação de Canal

ABSTRACT

In this work, we develop a simulator for the digital television system ATSC 3.0, whose objective is transmitting ultra-high definition video through terrestrial, frequency-selective channels. We present a brief review of TV transmission history and, based on the available literature, we develop a realistic simulation setup according to the ATSC 3.0 standard. To evaluate the BER (bit-error rate) performance of the ATSC 3.0 system, we elaborated a MATLAB simulator that employs exact and pilot-estimated channel parameters. The numerical simulations resulted in mean BER values close to the available on literature for the considered configurations.

Keywords:

Simulation of Communications Systems, Digital Television, ATSC 3.0, Channel Coding

Sumário

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Entrada	9
1.2 Processamento da Entrada	9
1.3 Modulação OFDM	9
2 OBJETIVOS	12
3 MOTIVAÇÃO	14
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	15
4.1 Implementação dos códigos corretores de erro	15
4.1.1 Tipos de códigos LDPC utilizados pelo padrão ATSC 3.0	16
4.2 Implementação da modulação	18
4.3 Implementação dos entrelaçamentos de bits	20
4.3.1 Entrelaçamento de paridade	20
4.3.2 Entrelaçamento de grupos	21
4.3.3 Entrelaçamento de blocos	21
4.4 Canal seletivo em frequência	23
4.4.1 Identificação dos parâmetros do canal	23
4.5 Equalização no domínio da frequência	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6. CONCLUSÕES	31
7 SUGESTÕES DE APRIMORAMENTO	32
8 REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

A televisão é, provavelmente, a forma mais efetiva e de melhor custo-benefício para entreter e informar. Em 2011, a União Internacional de Telecomunicações (em inglês: *International Telecommunications Union*, ITU) estimava que o número de casas com televisão era de, aproximadamente 1,4 bilhões. Ainda hoje, a televisão desempenha um papel importante na divulgação de informação em lugares onde poucas pessoas possuem acesso à internet.

Com o avanço das tecnologias digitais, os benefícios de trocar os padrões analógicos por um sistema digital foram se tornando mais evidentes. Além de o sistema digital prover maior eficiência em termos de largura de banda e a possibilidade de correção de degradações mais efetiva que o sistema analógico, a qualidade da imagem e do som oferecidas ao consumidor final sofreu melhora significativa e, com as frequências desocupadas pelo sistema analógico, puderam ser oferecidos mais canais ou outros serviços, como comunicação via telefone celular [1].

Os padrões mais recentes de televisão digital terrestre (DTT, do inglês, *Digital Terrestrial Transmission*), são o ATSC 3.0, e o DVB-T2. Nas Figuras 1.1 e 1.2 vemos os diagramas de blocos de codificação dos sinais [2] de acordo com esses padrões.

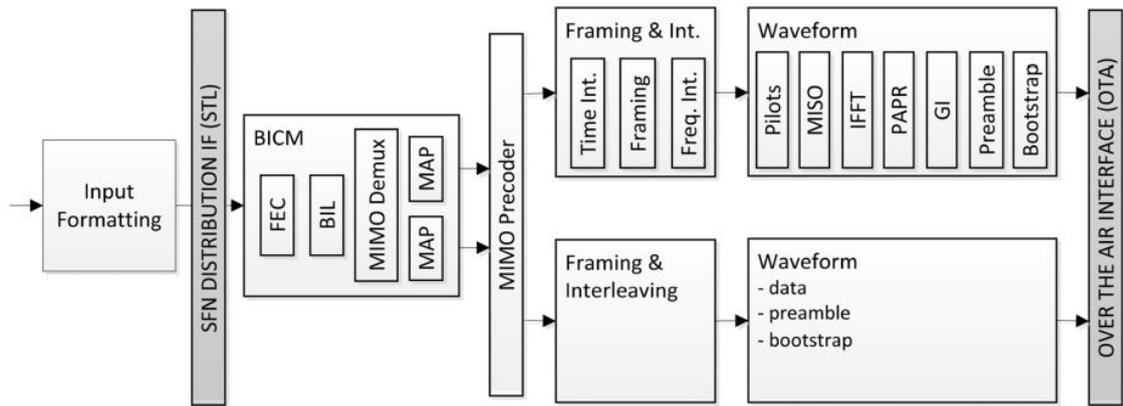


Figura 1.1: Diagrama de blocos da camada de geração de sinal do sistema ATSC 3.0. Retirado de [3]

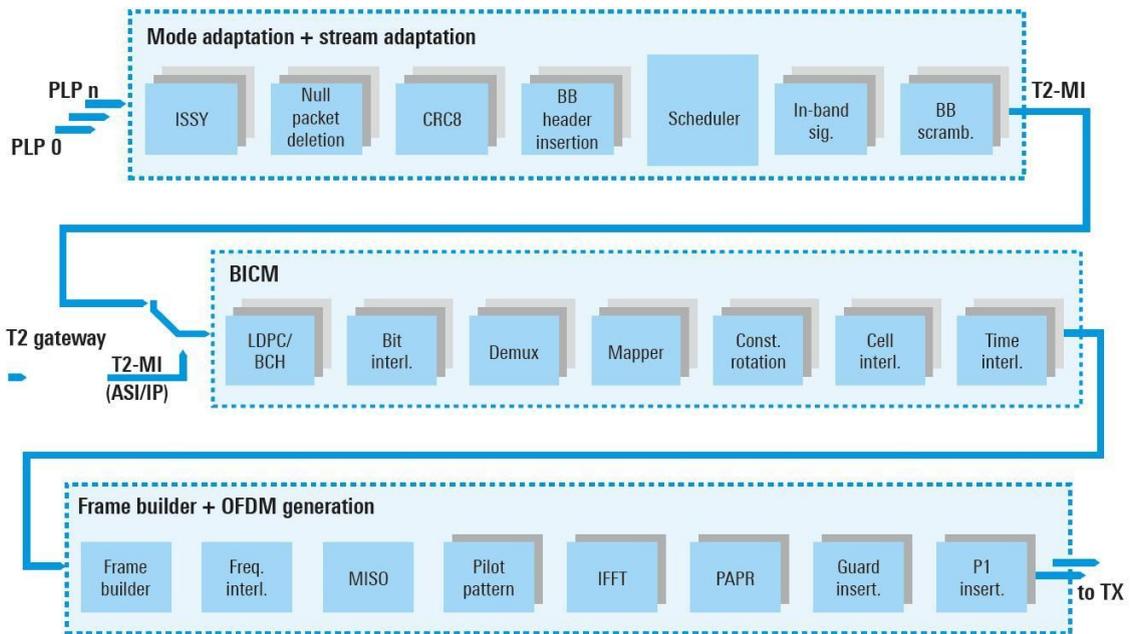


Figura 1.2: Diagrama de blocos da camada de geração de sinal do sistema DVB-T2. Retirado de [4]

Como visto nas Figuras 1.1 e 1.2, ambos possuem diversos elementos em comum. Os componentes de cada sistema são brevemente descritos a seguir.

1.1 Entrada

Bloco responsável pela entrada de dados. Foi considerado que já foi feita a codificação de fonte e retirada de redundâncias dos sinais.

1.2 Processamento da Entrada

Aqui está a principal diferença entre os sistemas: ambos utilizam a mesma tática, mas com códigos com parâmetros diferentes. O processamento inclui adição de redundâncias - os chamados códigos FEC (correção de erros adiante, do inglês, *Forward error correction*) - utilizando a técnica conhecida como BICM (modulação codificada com entrelaçamento de bits, do inglês, *Bit Interleaving Coded Modulation*) [1][5].

Em ambos os casos são utilizados códigos LDPC, (Matriz de paridade esparsa, do inglês, *Low Density Parity Check*) [7], que são códigos em bloco definidos através de modelos gráficos. Diferentemente de outros códigos de bloco, os códigos LDPC permitem a determinação de *likelihood ratios* (do inglês, razões de verossimilhança), que indicam a probabilidade de um bit recebido ser 0 ou 1 em função dos demais, através de algoritmos iterativos baseados em trocas de mensagens [7]. Também são utilizados códigos BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem, seus criadores de forma independente), que são códigos corretores de erro cíclicos. Tais códigos são gerados por polinômios e podem ser projetados para corrigir números específicos de erros [8][9].

1.3 Modulação OFDM

As Figuras 1.2.1 e 1.2.2 ilustram os diagramas de blocos de um modulador e de um demodulador OFDM (Modulação por Divisão Ortogonal em Frequências, do inglês, *Orthogonal Frequency Division Modulation*) [5], respectivamente. No modulador OFDM, o fluxo de bits é dividido em múltiplos canais paralelos, formando um bloco de símbolos, sendo então calculada a IFFT (Transformada Rápida de Fourier Inversa, do inglês, *Inverse Fast Fourier Transform*) [6] de cada bloco, o que dá origem a um bloco de números complexos. Esses números são lidos em sequência, sendo a sua parte real usada para modular uma portadora de RF

(rádio-frequência) em fase e a imaginária para modular a mesma portadora em quadratura. No demodulador, é aplicado o procedimento inverso.

A principal fonte de complexidade envolvida na implementação desses sistemas é o cálculo de FFTs (Transformada Rápida de Fourier, do inglês, *Fast Fourier Transform*), o que pode ser eficientemente realizado em hardware dedicado [6].

A principal vantagem da tecnologia OFDM sobre sistemas de comunicação tradicionais, baseados em portadora única, é a sua habilidade de lidar com ecos introduzidos pelos canais de comunicação (percebidos em sistemas de TV analógicos como “fantasmas” nas imagens) de forma robusta, por prescindir da necessidade de algoritmos complexos de equalização no domínio do tempo [5]. Isto é possível porque o sinal transmitido pelos sistemas OFDM consiste em múltiplas portadoras moduladas em paralelo e de forma bastante lenta, o que torna viável introdução de intervalos de guarda (i.e., intervalos em que informações redundantes ou nenhuma informação é transmitida) entre os símbolos. Se a duração temporal dos intervalos de guarda for superior à dos ecos introduzidos pelo canal, a interferência entre símbolos sucessivos é eliminada [5], e, assim, a necessidade de equalização no domínio do tempo.

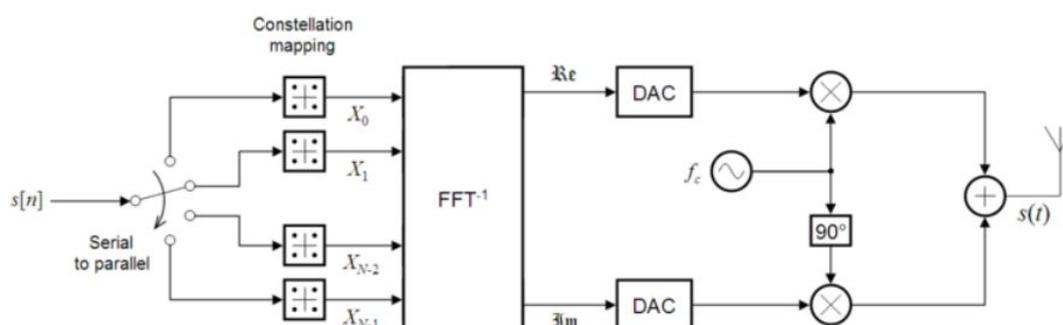


Figura 1.2.1: Diagrama de blocos de um modulador OFDM, onde $s(t)$ é o sinal transmitido, gerado a partir da sequência de bits $s[n]$. (Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing.)

A tecnologia OFDM exibe algumas desvantagens sobre sistemas de portadora única, que, porém, são largamente suplantadas pela vantagem principal. São as principais delas: exigência de transmissores capazes de lidar com amplitudes de

pico elevadas em relação à amplitude média do sinal [5] e sensibilidade a desvios na frequência da portadora de RF no receptor (causados, por exemplo, pelo efeito Doppler devido ao movimento relativo entre o transmissor e o receptor) [5].

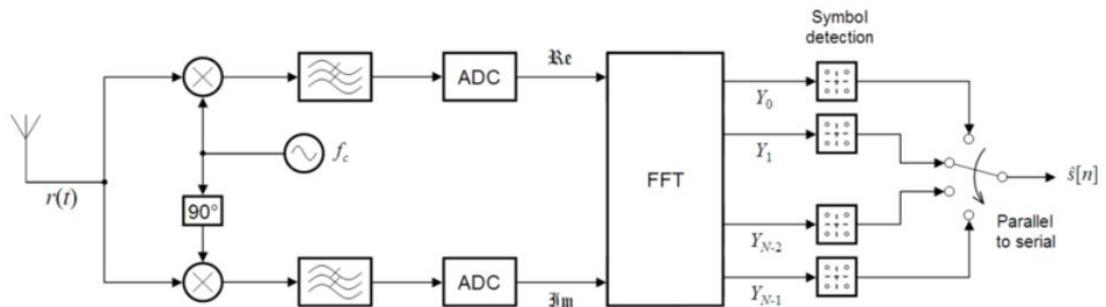


Figura 1.2.2: Esquema de um demodulador OFDM, onde $s[n]$ são os bits estimados a partir do sinal recebido $r(t)$. (Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing.)

A tecnologia OFDM pode ser empregada tanto em sistemas com usuário único, como os que realizam teledifusão (TV e rádio), quanto em sistemas em que múltiplos usuários compartilham o meio de transmissão, como redes de computadores WiFi e WiMAX e os sistemas celulares LTE (4G) [5] e 5G.

2 OBJETIVOS

Utilizando-se dos conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia de Informação, aliados as referências [7] [10] [11] [13] [14] [15], têm-se por objetivo desenvolver um simulador de sistemas de comunicação digital utilizando o padrão de transmissão ATSC 3.0, descrito pelos diagramas de blocos das Figuras 2.1 e 2.2, analisando suas características, comparando os resultados obtidos no simulador desenvolvido com os resultados obtidos em [13] através de sua taxa de erro de bit (BER, do inglês, *Bit Error Rate*) e de sua robustez [12].

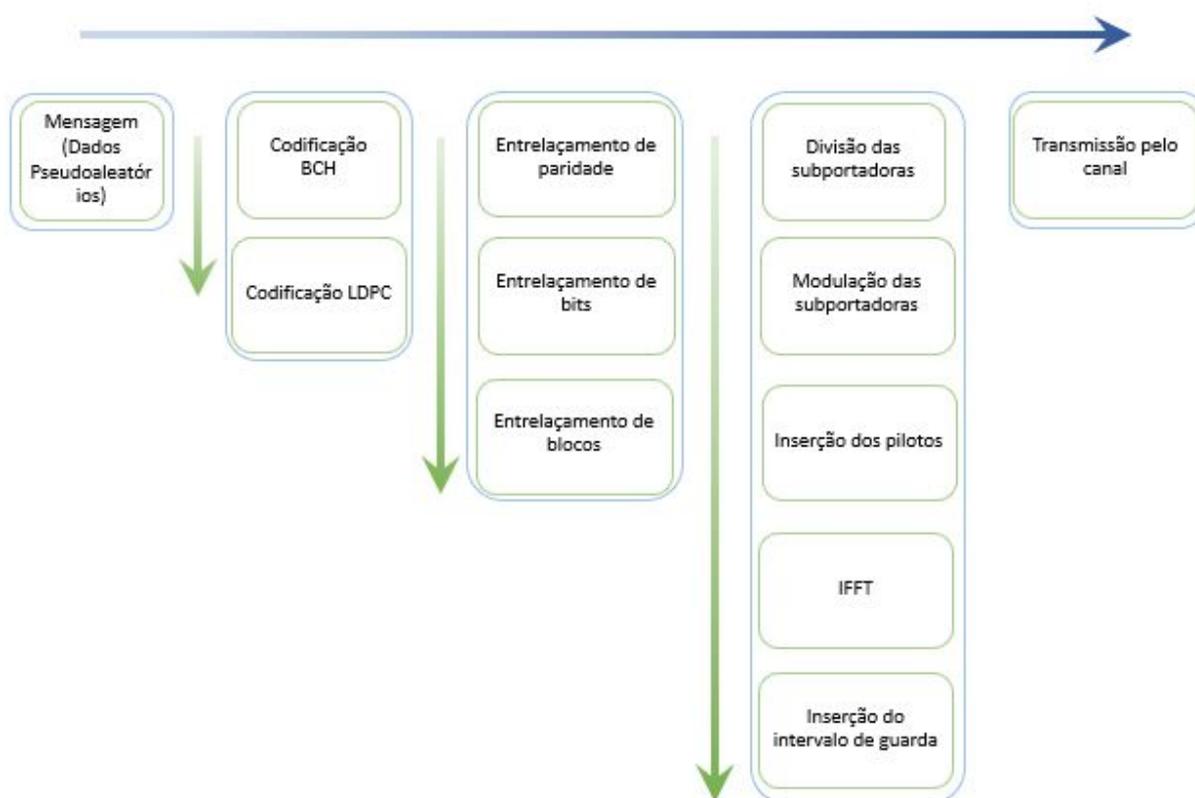


Figura 2.1: Diagrama de blocos do Simulador - Transmissor. Autoria própria.

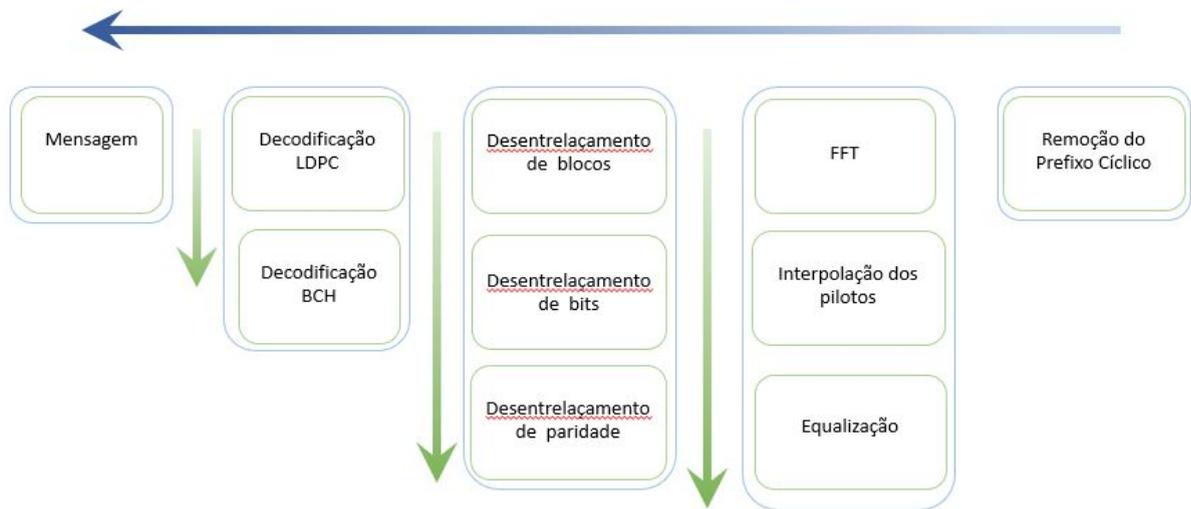


Figura 2.2: Diagrama de blocos do Simulador - Receptor. Autoria própria.

3 MOTIVAÇÃO

Com o avanço das tecnologias de sistemas eletrônicos, os sistemas analógicos de transmissão de televisão foram substituídos por padrões digitais. O primeiro a ser divulgado foi o padrão digital europeu, o DVB [1], na década de 1990. Os sistemas de TV Digital vêm se desenvolvendo para fornecer uma experiência cada vez mais realista ao usuário final. Devido às características diferentes dos canais de transmissão, os sistemas de TV digital são projetados especificamente para teledifusão terrestre, via satélite, a cabo ou via internet.

Nos padrões mais atuais de TV Digital Terrestre temos dois representantes de peso: o ATSC 3.0 e o DVB T2. Em ambos, dificuldades relacionadas à implementação e à robustez de equalizadores no domínio do tempo fizeram com que fosse empregada modulação multiportadora OFDM. Tais sistemas, ao lado dos sistemas celulares 5G, representam o estado da arte da atual tecnologia de telecomunicações, e, portanto, são sistemas que despertam o interesse tanto na comunidade acadêmica quanto no mercado profissional.

Escolheu-se elaborar o simulador para o padrão ATSC 3.0 devido, entre outras razões, à sua capacidade de operar em menores valores de relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Foram gerados dados pseudo-aleatórios para representação da informação a ser transmitida [17]. Em posse destes dados, são realizados todos os procedimentos necessários para a simulação de sistemas digitais de transmissão terrestre de acordo com o padrão ATSC 3.0. Tais procedimentos incluem a utilização dos códigos BCH e LDPC, assim como os entrelaçamentos de bits descritos pelo padrão [10] [13].

As comparações serão feitas através de simulações numéricas utilizando programas elaborados em MATLAB e C, valendo-se de *toolboxes* apropriados, nas quais se analisou a robustez e a taxa média de erro de bit dos sistemas supracitados[17].

Em todas as simulações são respeitados critérios de simulação como em [16], para garantir a fidelidade dos resultados quando comparados a sistemas reais, mas também levando em conta o tempo computacional para suas realizações.

4.1 Implementação dos códigos corretores de erro

Seguindo as instruções de [7] e [13], foram inicialmente determinados os parâmetros dos códigos corretores de erro BCH e LDPC, que são distintos dos parâmetros disponibilizados por padrão pelas rotinas do MATLAB.

Para o código BCH, foi calculado o polinômio gerador utilizando o número de bits de informação e os 12 polinômios extraídos de [13] com o auxílio do software Notepad++. Após a extração dos polinômios, foi utilizado o *toolbox* de variáveis simbólicas do MATLAB para sua multiplicação e adequação dos dados para uso pelo *toolbox* de comunicação.

A implementação do código LDPC, por sua vez, foi dificultada pela falta de clareza com o qual o mesmo é descrito no padrão ATSC 3.0, que não apresenta explicitamente as matrizes de verificação paridade dos códigos (que são distintas

para cada combinação de tamanho de palavra e taxa). Além disso, por questões de propriedade intelectual, tais informações não são divulgadas por autores de artigos científicos sobre o assunto, que em sua maioria têm ligação com a indústria. Para deduzir tais matrizes, seguiu-se o procedimento descrito em [3], que é bastante intrincado. Por conta desta dificuldade, não houve tempo hábil para se calcular as matrizes de paridade relativas a todas as configurações do padrão ATSC 3.0.

Para uma análise inicial do desempenho do esquema de codificação, os códigos corretores de erro foram então submetidos a um canal AWGN, o que permitiu a comparação com os resultados de [7]. Para isso, utilizaram-se os objetos incluídos na biblioteca de comunicação (*communication toolbox*) do MATLAB [18], responsáveis por modelar os codificadores, canal e decodificadores, inserindo os parâmetros calculados anteriormente. Inicializaram-se os objetos responsáveis pelo codificador e decodificador do código BCH, atribuindo a eles o polinômio gerador obtido. O mesmo vale para o codificador e decodificador LDPC e suas matrizes de paridade. Configurou-se também o modulador e o demodulador para um sistema 4-PSK com entrada e saída em bits calculando a LLR (*Log-likelihood ratio*, do inglês razão de verossimilhança logarítmica). Os resultados obtidos nesta etapa encontram-se no item “Resultados e Discussões” deste trabalho, e, em posse deles, foi possível prosseguir com o desenvolvimento do simulador.

4.1.1 Tipos de códigos LDPC utilizados pelo padrão ATSC 3.0

O padrão ATSC 3.0 utiliza códigos LDPC com matrizes de paridade variáveis conforme a taxa e o tamanho da palavra escolhidos. As matrizes possuem duas estruturas possíveis, que são denominadas A e B conforme a Tabela 4.1.1

Tabela 4.1.1: Estrutura da matriz de paridade do código LDPC. Retirado de [13].

Code Rate	LDPC Code Structure Type	
	$N_{inner}=64800$	$N_{inner}=16200$
2/15	A	A
3/15	A	A
4/15	A	A
5/15	A	A
6/15	B	B
7/15	A	B
8/15	B	B
9/15	B	B
10/15	B	B
11/15	B	B
12/15	B	B
13/15	B	B

Os códigos do tipo A são implementados reorganizando-se os bits em uma matriz com menos colunas e mais linhas que, após este procedimento, é concatenada com a matriz de paridade disponibilizada em [13]. Seus tamanhos também variam em função da taxa do código, e são apresentados nas Tabelas 4.1.2 e 4.1.3.

Tabela 4.1.2: Parâmetros dos códigos LDPC do tipo A com tamanho de palavra 64800. Retirado de [13].

Code Rate	Sizes			
	M_1	M_2	Q_1	Q_2
2/15	1800	54360	5	151
3/15	1800	50040	5	139
4/15	1800	45720	5	127
5/15	1440	41760	4	116
7/15	1080	33480	3	93

Tabela 4.1.3: Parâmetros dos códigos LDPC do tipo B com tamanho de palavra 16200. Retirado de [13].

Code Rate	Sizes			
	M_1	M_2	Q_1	Q_2
2/15	3240	10800	9	30
3/15	1080	11880	3	33
4/15	1080	10800	3	30
5/15	720	10080	2	28

Já os códigos tipo B organizam todos os bits de acordo com a sua posição no vetor seguindo diversas regras, sendo o primeiro elemento a ter sua posição alterada escolhido conforme a Tabela 4.1.4.

Tabela 4.1.4: Parâmetros dos códigos do tipo B. Retirado de [13].

Code Rate	$Q_{ldpc} (N_{inner}=64800)$	$Q_{ldpc} (N_{inner}=16200)$
6/15	108	27
7/15	N/A	24
8/15	84	21
9/15	72	18
10/15	60	15
11/15	48	12
12/15	36	9
13/15	24	6

4.2 Implementação da modulação

Para garantir a aderência do simulador ao padrão ATSC 3.0, escolheu-se utilizar a modulação 64 QAM bidimensional não uniforme (NUC 2D, do inglês, *Bidimensional Non Uniform Constellation*) [19]. O ATSC 3.0 utiliza tais constelações

devido ao seu desempenho alegadamente superior. Tais constelações variam em formato conforme a taxa dos códigos corretores de erro empregados.

O termo bidimensional vem do fato de que tais constelações podem ser descritas como a combinação de duas constelações de ordem inferior. Na Figura 4.2.1 está o exemplo de uma constelação 16-QAM NUC 2D, que pode ser descrita como a combinação de duas constelações 4-QAM.

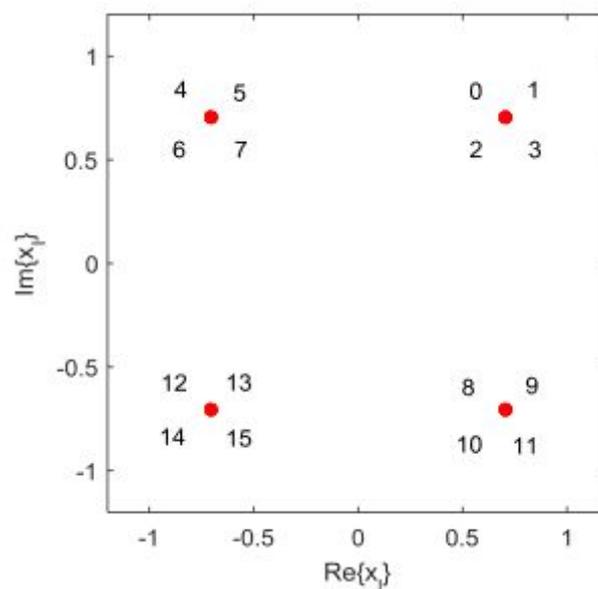


Figura 4.2.1 – 16 NUC 2D para um código 2/15 no padrão ATSC 3.0 [13].

A modulação e a demodulação de constelações QAM NUC 2D, assim como nas constelações uniformes (UC, do inglês *Uniform Constellation*), podem ser implementadas computacionalmente através de operações matriciais, que foi a forma utilizada no desenvolvimento do simulador.

Devido a limitações sistêmicas do *communication toolbox*, foi necessário implementar um algoritmo responsável pela modulação e demodulação das constelações QAM NUC. Utilizando novamente o Notepad++ para a extração do conteúdo de [13] e seguindo as instruções de [19], construíram-se as matrizes de números complexos que descrevem as constelações para cada uma das taxas de

codificação. Novamente, a norma ATSC 3.0 instrui apenas como deveria ocorrer o processo de modulação; foi então necessário utilizar a lógica e os conhecimentos adquiridos durante o curso para desenvolver as técnicas de demodulação. Ressalte-se ainda que, devido à utilização de NUCs, não foi possível utilizar as bibliotecas disponíveis no MATLAB para o cálculo da LLR. Foi necessário a implementação de uma função específica, capaz de realizá-la. Os resultados obtidos nesta etapa encontram-se no item “Resultados e Discussões” deste trabalho, e, em posse deles, foi possível prosseguir com o desenvolvimento do simulador.

4.3 Implementação dos entrelaçamentos de bits

A Figura 4.3.1 descreve a sucessão de operações de entrelaçamento utilizada pelo padrão ATSC 3.0. O objetivo destas operações é uniformizar as ocorrências de erro.

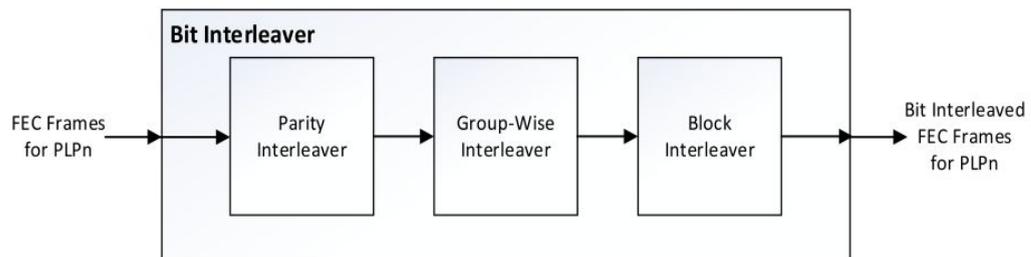


Figura 4.3.1: Organização do entrelaçador de bits [13] do padrão ATSC 3.0.

4.3.1 Entrelaçamento de paridade

O entrelaçador de paridade é utilizado apenas para códigos do tipo B. Eles são descritos da seguinte forma:

$$u_i = \lambda_i \quad \text{for } 0 \leq i < N_{outer} \text{ (information bits are not interleaved)}$$

$$u_{N_{outer}+360t+s} = \lambda_{N_{outer}+Q_{ldpc}s+t} \quad \text{for } 0 \leq s < 360, 0 \leq t < Q_{ldpc}$$

Onde $u_{N_{outer}}$ é o vetor formado por u_i e o parâmetro Q_{ldpc} é oriundo da Tabela 4.1.4.

4.3.2 Entrelaçamento de grupos

Cada quadro (*frame*) que entra no entrelaçamento de bits é dividido em $N_{inner}/360$ blocos de 360 membros, conforme a Figura 4.3.2.1.

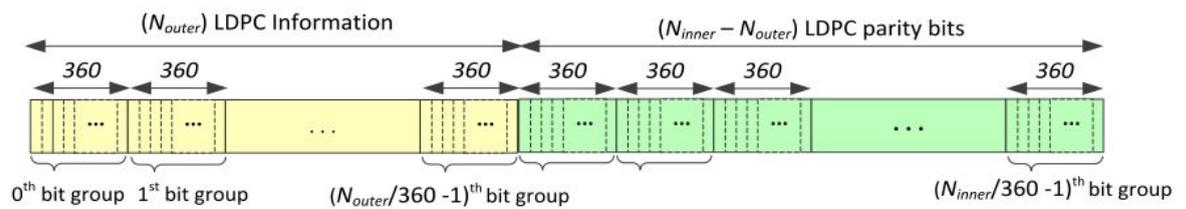


Figura 4.3.2.1: Divisão da palavra código por grupos. Retirado de [13]

Utilizando Notepad++ para realizar a mesma técnica de extração, obtiveram-se as tabelas dos Anexos B.1 e B.2 de [13] que descrevem as trocas de posições necessárias conforme as taxas de código.

4.3.3 Entrelaçamento de blocos

Assim como o entrelaçamento de grupos, o entrelaçamento de blocos altera a posição dos blocos em função de suas taxas de codificação. Extraíu-se com o Notepad++ as posições de substituição e, utilizando o comando *reshape*, estabeleceram-se as novas posições dos blocos. Na Figura 4.3.3.1 tem-se a descrição do procedimento de entrelaçamento e de desentrelaçamento de blocos.

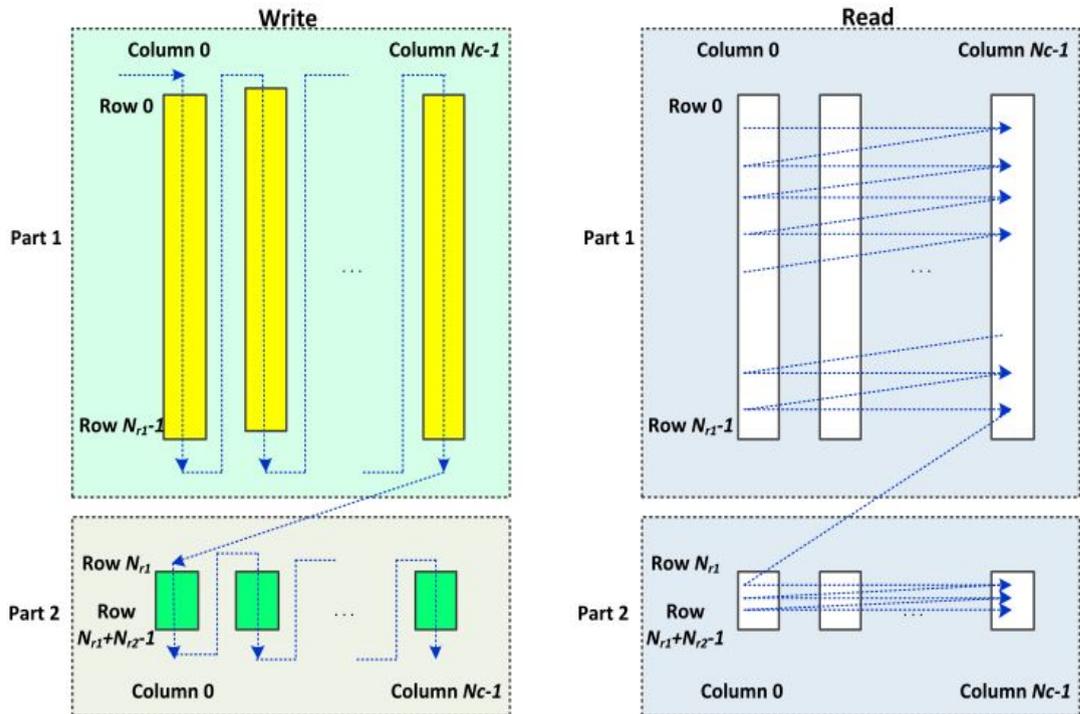


Figura 4.3.3.1: Operação de escrita e leitura que implementam o entrelaçamento de blocos. Retirado de [13].

Percebe-se que tanto a leitura quanto a escrita são divididas em duas partes: na primeira, utiliza-se os *frames* de entrada e, conforme a Tabela 4.3.3.2, decide-se o seu tamanho. As colunas concatenadas são então lidas até a linha constante da Tabela 4.3.3.2, procedimento que é repetido na Parte 2.

Modulation	N_{QCB_IG}	N_{part1}		N_{part2}	
		$N_{inner} = 64800$	$N_{inner} = 16200$	$N_{inner} = 64800$	$N_{inner} = 16200$
QPSK	2	64800	15840	0	360
16QAM	4	64800	15840	0	360
64QAM	6	64800	15120	0	1080
256QAM	8	63360	14400	1440	1800
1024QAM	10	64800	N/A	0	N/A
4096QAM	12	64800	N/A	0	N/A

Tabela 4.3.3.2: Parâmetros para o entrelaçamento de blocos. Retirado de [13].

4.4 Canal seletivo em frequência

O padrão ATSC 3.0 foi projetado para a operação em canais seletivos em frequência. Para fins de simulação, considerou-se que o transmissor e o receptor são perfeitamente sincronizados, do que resulta que o canal seletivo em frequência pode ser modelado como um filtro FIR cuja saída é afetada por ruído gaussiano [7]. Os coeficientes do filtro FIR que simula o canal foram obtidos amostrando-se aleatoriamente de uma distribuição gaussiana complexa circular. O número de coeficientes foi escolhido para refletir a duração do eco do canal simulado.

4.4.1 Identificação dos parâmetros do canal

Para as configurações do sistema ATSC 3.0 que utilizam modulação coerente, a demodulação requer estimar os parâmetros do canal de transmissão equivalente após o cálculo da FFT dos sinais recebidos.

Para identificação dos parâmetros do canal, foi utilizado o algoritmo recursivo dos mínimos quadrados (RLS, do inglês “Recursive least squares”). Foi então implementado este algoritmo adaptativo, que é capaz de relacionar os sinais recebidos ao sinal transmitido, nos instantes em que este é conhecido (piloto). Este algoritmo foi escolhido devido a sua velocidade de convergência. Explicá-lo de maneira detalhada foge ao escopo deste trabalho, sendo assim, foram utilizadas as equações retiradas de [20] para desenvolvê-lo.

Vale ressaltar que o padrão ATSC 3.0 não transmite pilotos em todas as portadoras OFDM e que não há instruções específicas no padrão sobre como identificar os parâmetros do canal para tais frequências. Assim, neste trabalho, desenvolveu-se um algoritmo que realiza a interpolação linear desses parâmetros entre as portadoras de acordo com a sua frequência (dada pelo índice da portadora). Por simplicidade, os parâmetros estimados são mantidos constantes até a recepção de novas amostras de piloto.

Na Figura 4.4.1.1 encontra-se um exemplo, retirado de [14], que demonstra a posição em que os símbolos piloto (SP - *spread pilots*, e CP - *continuous pilots*) são inseridos nas portadoras OFDM.

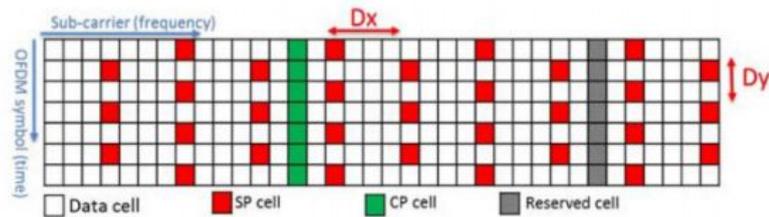


Figura 4.4.1.1 - Exemplo de distribuição dos pilotos no tempo e em frequência. Retirado de [14]

4.5 Equalização no domínio da frequência

A partir dos parâmetros do canal, pode-se determinar o equalizador *Zero Forcing* (ZF, do Inglês, forçante a zero) ou o equalizador MMSE (*minimum mean-squared error*, do inglês, mínimo erro quadrático médio). O Equalizador ZF consiste simplesmente em dividir o sinal recebido pela resposta do canal na portadora em questão. Já o Equalizador MMSE, cuja expressão é um pouco mais complexa, faz com que o erro quadrático médio entre o sinal equalizado e o de referência (piloto) seja o menor possível.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Canais AWGN

Conforme descrito na metodologia experimental, foi necessário testar se os códigos corretores de erro estavam funcionando da maneira esperada [10][13]. Foi então implementado um sistema de teste 4-PSK utilizando código de taxa 10/15 num canal AWGN. Com isso, traçaram-se as curvas de taxa de erro brutas (saída do demodulador), após decodificação LDPC e após a decodificação BCH. Os resultados médios obtidos na simulação se encontram na Figura 5.1. Nela percebe-se que para níveis de SNR superiores a 2,8 dB não ocorrem mais erros, resultado que coincide com o apresentado em [13]. Pode-se notar ainda que os desempenhos após o código BCH e após o código LDPC coincidem; isto ocorre porque os parâmetros do código BCH adotados pelo sistema ATSC 3.0 são tais que apenas 10 a 12 erros por bloco podem ser corrigidos [22]. A utilidade do código BCH neste sistema é apenas eliminar o patamar de erro (*BER floor*, em torno de 10^{-4}) comum em decodificadores LDPC que operam por troca de mensagens (*message passing*) [7].

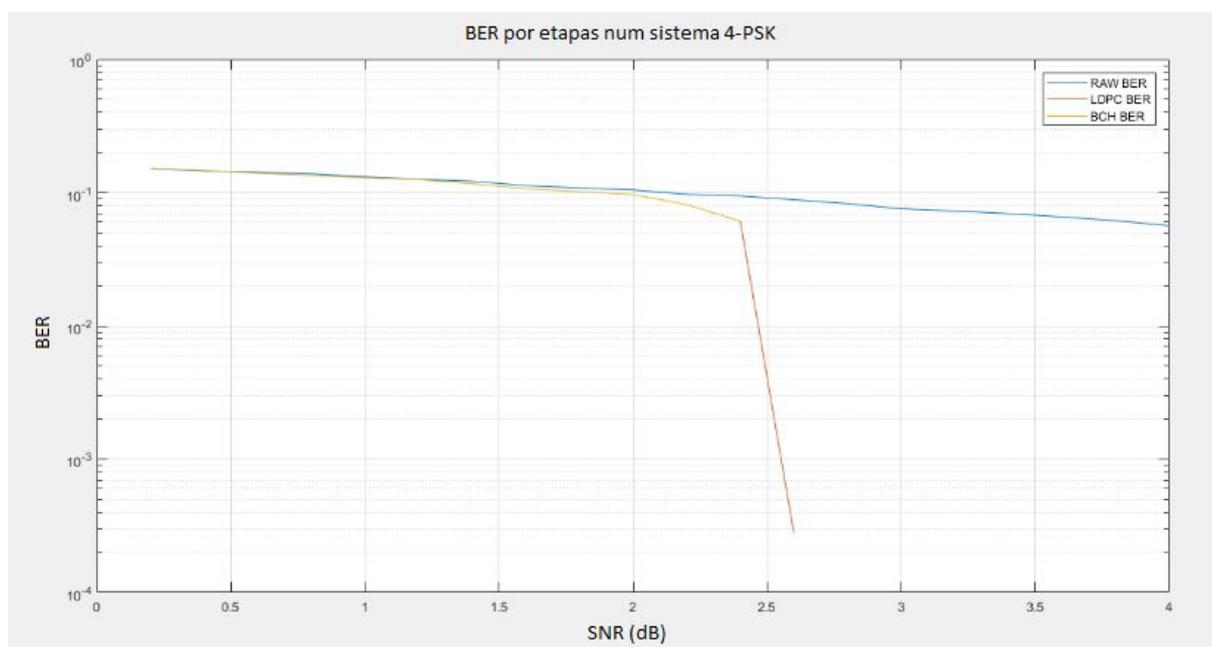


Figura 5.1 – Desempenho obtido dos códigos BCH e LDPC num canal AWGN, com modulação 4-PSK e taxa 10/15.

Devido às técnicas de modulação NUC utilizadas pelo ATSC 3.0 não estarem implementadas no MATLAB, foi necessário desenvolver algoritmos específicos, conforme citado no Item 4.2 (Implementação da modulação) deste trabalho. Os resultados obtidos nesta etapa encontram-se na Figura 5.2. Nota-se nela que os erros após o decodificador LDPC deixam de ocorrer para níveis de SNR em torno de 15 dB; o efeito do código BCH não é perceptível devido à queda abrupta da taxa de erro na saída do decodificador LDPC.

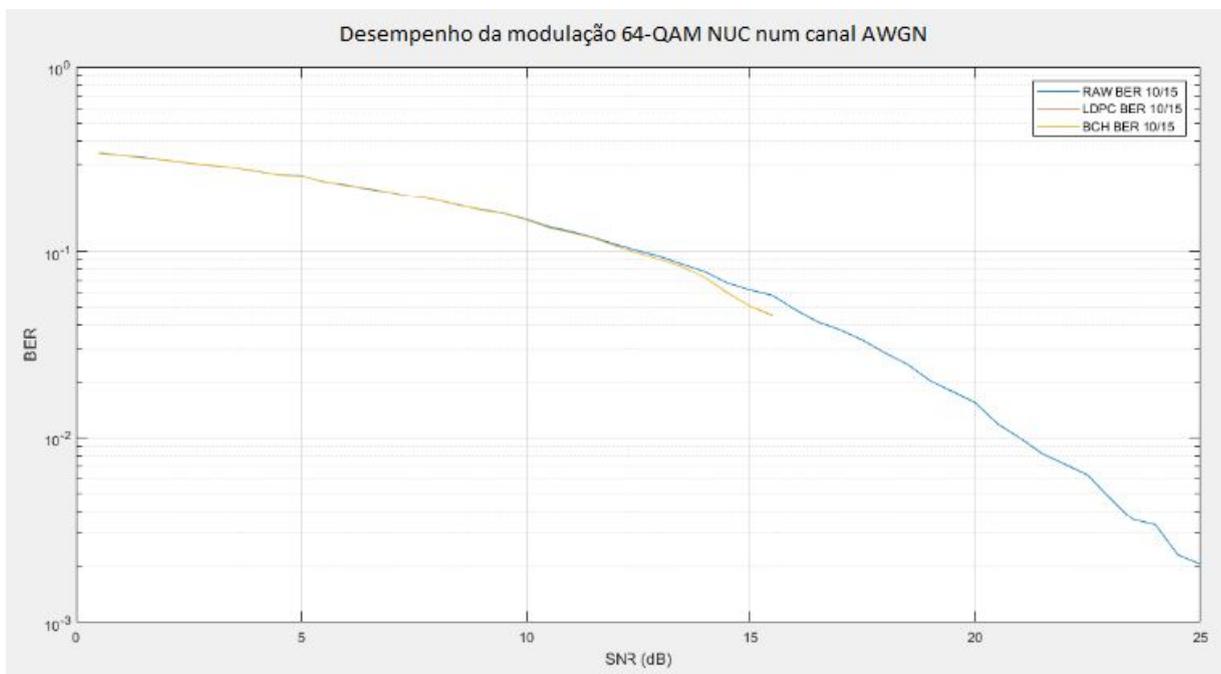


Figura 5.2: BER em função da SNR para modulação 64-QAM com NUC em um canal AWGN.

Na Figura 5.3, observa-se que, para uma constelação 64 QAM NUC, com código LDPC de taxa de código 10/15 (eficiência espectral aproximada de 4 bits/s/Hz) o sistema ATSC 3.0 apresenta limiar de ausência de erros numa SNR de aproximadamente 14dB, ou seja, o simulador desenvolvido levou a uma perda de

desempenho de 1dB em relação ao valor teórico, o que se pode atribuir a problemas numéricos.

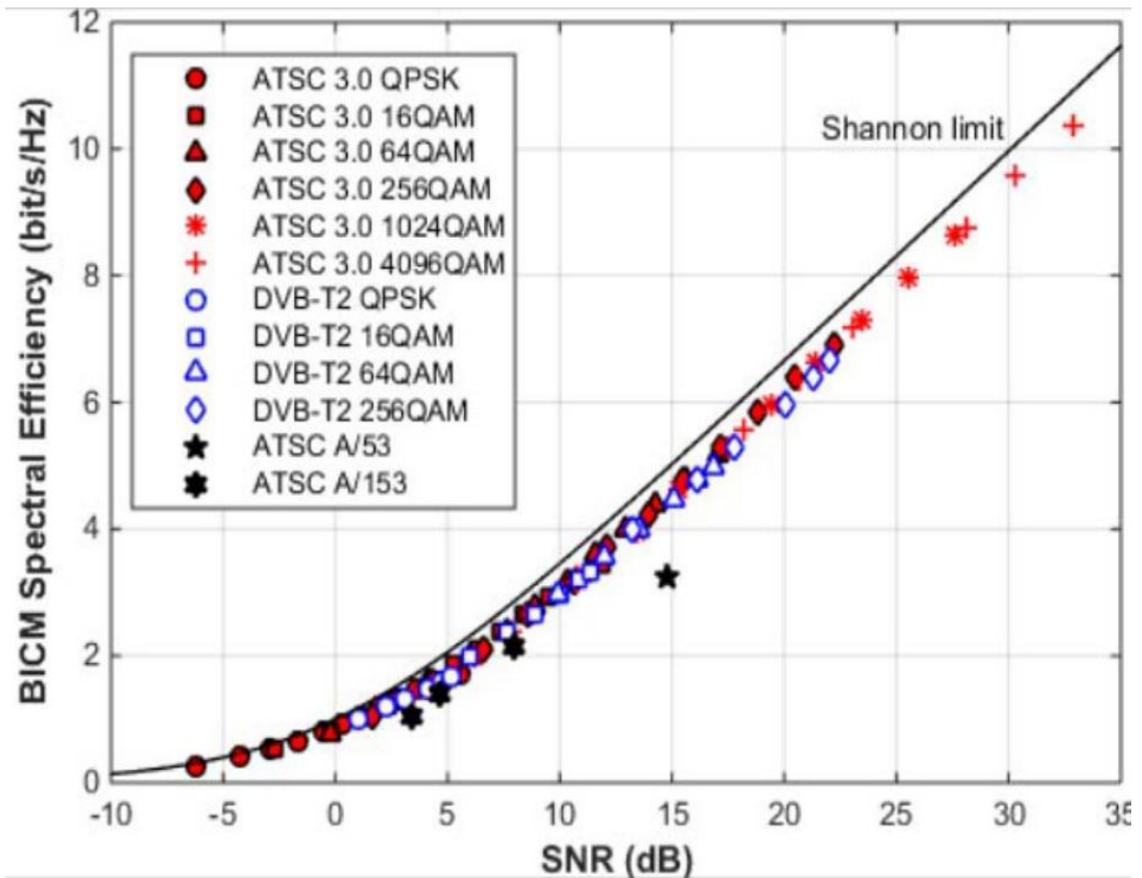


Figura 5.3: Eficiência Espectral de padrões de Televisão Digital Terrestre com BICM. Extraído de [14].

Canais Seletivos

Nas simulações com canais seletivos, faz-se necessário o uso de um método de equalização. Foram realizadas simulações e percebeu-se que a BER bruta, antes do processamento pelos códigos corretores de erro, era cerca de 1% menor ao se utilizar o equalizador ZF ao invés do MMSE, e, portanto, o primeiro foi adotado no simulador. Isto pode ser justificado pelo fato de a otimização do erro médio quadrático, resultante do uso do equalizador MMSE, não implicar na minimização da BER [25].

Na Figura 5.4, encontra-se o resultado obtido pelo receptor desenvolvido neste trabalho, inicialmente utilizando os parâmetros exatos do canal (seletivo em frequência). Para o mesmo código de taxa 9/15, observa-se o limiar ocorre para um nível de SNR próximo de 16dB. Essa diferença, de 3dB, pode ser explicada pelo fato de o canal seletivo em frequência impor maiores dificuldades à recuperação do sinal, e é habitualmente observada.

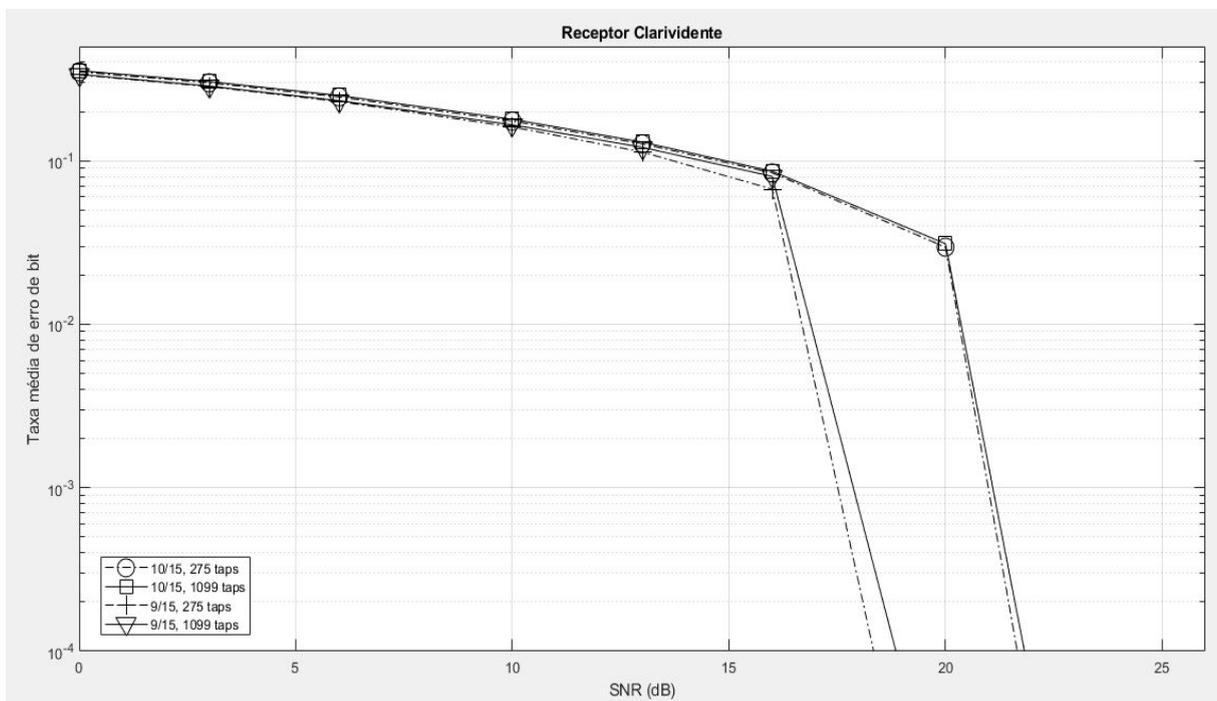


Figura 5.4: Resultados obtidos com o simulador desenvolvido utilizando-se de um receptor clarividente (i.e., que dispõe dos parâmetros exatos do canal).

As Figuras 5.5 e 5.6, por sua vez, exibem os resultados obtidos quando os parâmetros do canal não são conhecidos pelo receptor, o que constitui a situação mais realista. Neste caso, torna-se necessário estimar tais parâmetros através do uso de um algoritmo de estimação (usualmente baseado no critério de mínimos quadrados) fazendo uso de sinais de referência, que são transmitidos periodicamente (pilotos). Mais detalhes podem ser vistos na Seção 4.4.1.

Como se pode observar na Figura 5.5, a taxa de erro de bit após a decodificação LDPC tende a zero para níveis de SNR superiores a certos patamares. Como esperado, as configurações utilizando código de taxa mais baixa são mais robustas ao ruído. Percebe-se também a influência do tamanho da resposta do canal: quanto mais curta for a resposta no domínio no tempo, mais suave será a sua variação no domínio da frequência, o que faz com que a interpolação introduza menos erros [5][6]. Tal fato também está condizente com o fato de o resultado da simulação do canal com menor número de taps estar mais próximo do resultado da simulação com canal exato.

Na Figura 5.6, por sua vez, estão mostrados, nos mesmo eixos, os desempenhos médios para receptores operando com parâmetros de canal exatos e estimados. Conforme esperado, o uso de parâmetros estimados leva a uma degradação de desempenho. Tal degradação tende a se agravar em situações de alta mobilidade, nas quais os parâmetros do canal variam abruptamente ao longo do tempo [21].

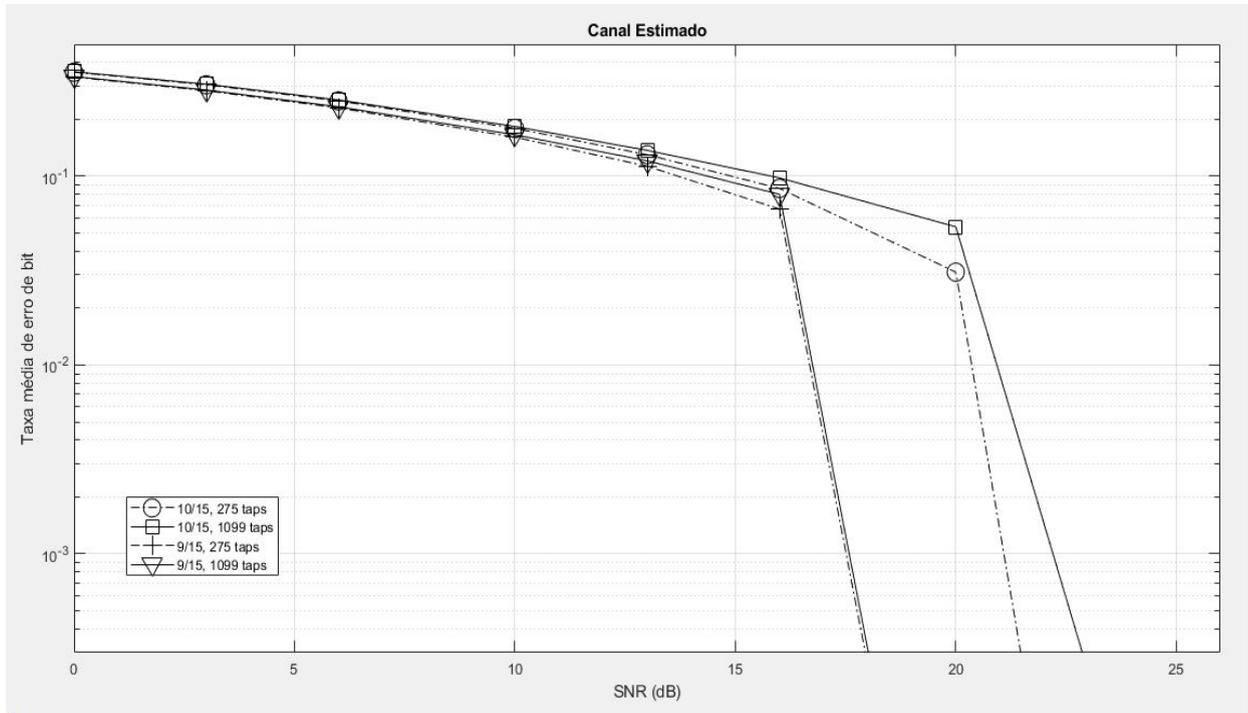


Figura 5.5: Resultados obtidos com o simulador desenvolvido utilizando-se de um receptor com canal estimado através de pilotos.

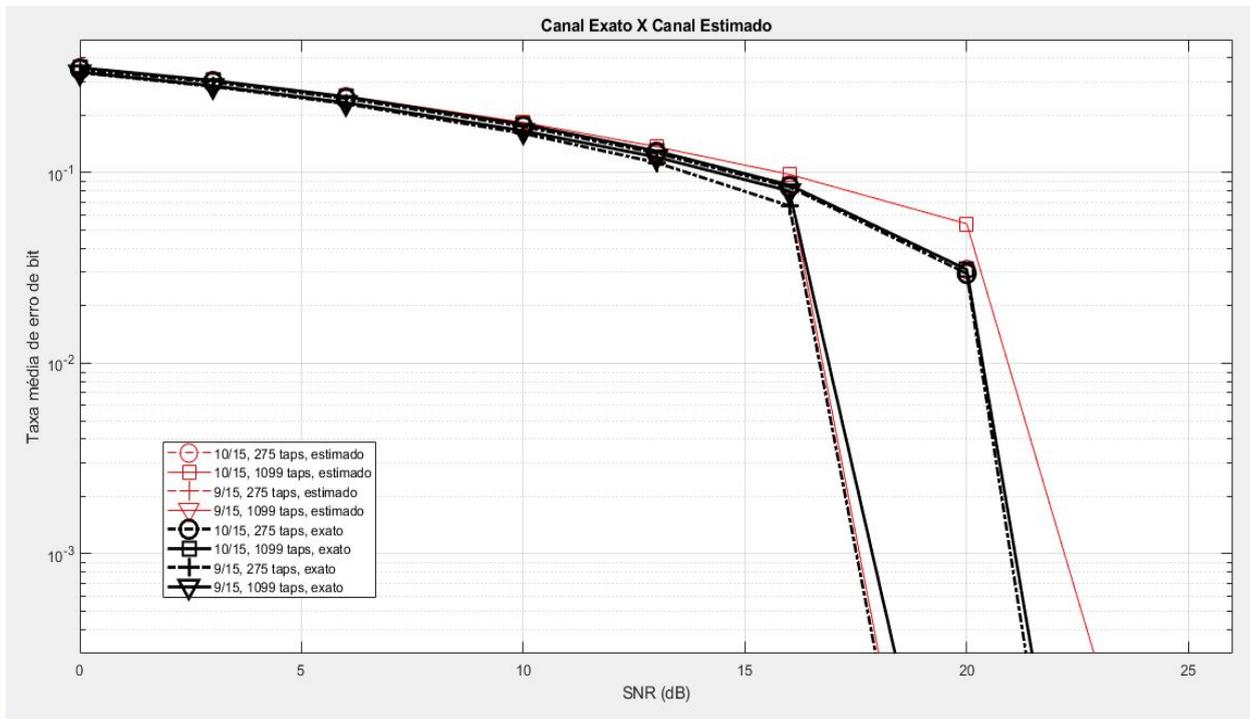


Figura 5.6: Comparação entre os resultados obtidos com o receptor clarividente e com o receptor com canal estimado através de pilotos.

6. CONCLUSÕES

Através de simulações numéricas, constatou-se que o sistema ATSC 3.0 é um método robusto para a transmissão de sinais de vídeo por canais terrestres. Verificou-se que esquema BICM descrito pelo padrão é eficiente e que a estimação dos parâmetros dos canais de transmissão pode ser realizada eficientemente utilizando-se os sinais de referência descritos pelo padrão. Além disso, comparando-se os resultados providos pelo simulador com resultados teóricos, pode-se concluir que o simulador desenvolvido está condizente com os modelos utilizados para um sistema de comunicação digital real.

Por se tratar do estado da arte da tecnologia de telecomunicação, houve grandes dificuldades para a obtenção de informações detalhadas para a simulação do padrão por questões relacionadas à propriedade intelectual. Por exemplo, grande parte dos algoritmos possuía apenas as instruções de codificação, mas não as de decodificação, sendo necessário deduzi-las.

7 SUGESTÕES DE APRIMORAMENTO

Como possíveis trabalhos futuros, sugere-se, inicialmente:

-Estender o simulador desenvolvido para canais MIMO 2x2, cujo uso pelo padrão ATSC 3.0 é facultativo.

-Implementar a técnica de divisão das camadas multiplexadas (LDM, do inglês, Layer Division Multiplexing), facultativo no padrão Atsc 3.0, mas instruído em [24].

Outra alternativa de aprimoramento está no desenvolvimento de uma melhor técnica de estimação para os parâmetros do canal, que utilize uma técnica mais sofisticada para a interpolação nos domínios do tempo e da frequência. Havendo disponibilidade de recursos, poderia-se cogitar a implementação dos algoritmos desenvolvidos em hardware, o que criaria uma infraestrutura para a análise do padrão ATSC 3.0 visando uma futura adoção deste padrão no Brasil.

8 REFERÊNCIAS

[1] M. El-Hajjar and L. Hanzo, “**A survey of digital television broadcast transmission techniques,**” IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 15, no. 4, pp. 1924–1949, April 2013.

[2] Lachlan Michael and David Gómez-Barquero, “**Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM) for ATSC 3.0**”, IEEE Transactions On Broadcasting, Vol. 62, No. 1, March 2016

[3] David Gómez-Barquero, David Vargas, Manuel Fuentes, Peter Klenner, Sangchul Moon, Jin-Yong Choi, Daniel Schneider, and Kenichi Murayama, “**MIMO for ATSC 3.0**”, IEEE Transactions On Broadcasting, Vol. 62, No. 1, March 2016

[4] Digital Video Broadcasting (DVB), “**Frame structure channel coding and modulation for a second-generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)**”, November 2014

[5] B. P. Lathi, Z. Ding, “**Modern Digital and Analog Communication Systems**”, 4^a ed., Oxford University Press, 2009.

[6] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, “**Discrete-Time Signal Processing**”, McGraw-Hill, 1989.

[7] KIM, Kyung-Joong et al. **Low-density parity-check codes for ATSC 3.0**. IEEE transactions on broadcasting, v. 62, n. 1, p. 189-196, 2016.

[8] FORNEY, G. **On decoding BCH codes**. IEEE Transactions on information theory, v. 11, n. 4, p. 549-557, 1965.

[9] CAETANO, Diogo Gará et al. **Análise de desempenho de sistemas de tv digital móveis dvb-h e isdb-t utilizando concatenação de códigos bch e turbo codificadores**. 2007.

[10] STANDARD, E. T. S. I. **Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital**

terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). ESTI EN, v. 302, n. 755, p. V1, 2015.

[11] MOON, Todd K. **Error correction coding. Mathematical Methods and Algorithms.** Jhon Wiley and Son, 2005.

[12] JOKELA, Tero; PAAVOLA, Jarkko. **Robustness analysis of physical layer signaling transmission in DVB-T2.** In: **Broadband Multimedia Systems and Broadcasting**, 2009. BMSB'09. IEEE International Symposium on. IEEE, 2009. p. 1-5.

[13] ADVANCED TELEVISION SYSTEMS COMMITTEE et al. **ATSC Standard: Physical Layer Protocol (A/322).** Doc. A/322: 2106. Washington, DC, September, 2016.

[14] FAY, Luke et al. **An overview of the ATSC 3.0 physical layer specification.** IEEE Transactions on Broadcasting, v. 62, n. 1, p. 159-171, 2016.

[15] GÓMEZ-BARQUERO, David et al. **MIMO for ATSC 3.0.** IEEE Transactions on Broadcasting, v. 62, n. 1, p. 298-305, 2016.

[16] JERUCHIM, Michel. **Techniques for estimating the bit error rate in the simulation of digital communication systems.** IEEE Journal on selected areas in communications, v. 2, n. 1, p. 153-170, 1984.

[17] JERUCHIM, Michel C.; BALABAN, Philip; SHANMUGAN, K. Sam. **Simulation of communication systems: modeling, methodology and techniques.** Springer Science & Business Media, 2006.

[18] LOFBERG, Johan. **YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB.** In: Computer Aided Control Systems Design, 2004 IEEE International Symposium on. IEEE, 2004. p. 284-289.

[19] LOGHIN, Nabil Svenh *et al.* **Non-uniform constellations for ATSC 3.0.** IEEE Transactions on Broadcasting, v. 62, n. 1, p. 197-203, 2016.

[20] Young P.C. **Recursive Least Squares Estimation.** In: **Recursive Estimation and Time-Series Analysis.** Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. p 29-46

[21] Vilar F. C. **Implementation Of Zero Forcing And MMSE Equalization Techniques In OFDM**. Fundação Edson Queiroz, Universidade De Fortaleza. 2014.

[22] MICHAEL, Lachlan; GÓMEZ-BARQUERO, David. **Modulation and Coding for ATSC 3.0**. In: 2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. IEEE, 2015. p. 1-5.

[23] SOARES, J. N.;BRITO, J. L. **Simulação de desempenho dos padrões DVB-T e DTMB de TV digital**. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Informação) - UFABC. São Paulo. 2017.

[24] ZHANG, Liang et al. **Channel estimation strategy for using LDM to deliver local content insertion in ATSC 3.0**. In: 2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). IEEE, 2017. p. 1-5.

[25] SAYED, A.H.. **Fundamentals of adaptive filtering**. John Wiley & Sons, 2003.