

Implementação e Validação em Plataforma Computacional da Camada Física da Próxima Geração da TV Digital - ATSC 3.0

Francisco Portelinha, André dos Anjos, Danilo Gaspar, Wheberth Dias, Marcelo Carneiro e Carlos Augusto Rocha

Resumo—Maior conectividade e interatividade são os anseios da próxima geração de transmissão digital da indústria de radiodifusão. Além disso, com a redução do espectro das emissoras de TV, concedido para as operadoras celulares, se torna necessário o uso eficiente do espectro na faixa de UHF e uma nova padronização se faz necessária. O ATSC é o padrão de TV utilizado em vários países há mais de 20 anos, dada suas limitações, um novo padrão foi proposto para suprir a necessidade de uma maior interação entre emissoras e usuários, com maior conectividade, qualidade de áudio, vídeo em alta resolução e uma maior flexibilidade para atender usuários fixos e móveis. Vistos estes novos desafios, neste trabalho, a camada física do ATSC 3.0 para o sistema de transmissão é simulada utilizando o ambiente de simulação MATLAB®, com objetivo de explorar a funcionalidade de cada bloco proposto, assim como servir de referência para implementação e posterior validação do sistema em hardware. Com o intuito de aferir a plataforma de simulação desenvolvida, a mesma foi validada de acordo com vetores de teste compatíveis com a norma existente, fornecidos por um modulador comercial padrão, garantindo a interoperabilidade do sistema.

Palavras-Chave—ATSC 3.0, camada física, OFDM, transmissão terrestre, TV.

Abstract—Higher connectivity and interactivity are the aspirations of the next digital broadcast solution. Also, by reducing the spectrum of TV broadcasters, granted to cellular operators, it becomes necessary to use the spectrum efficiently by TV broadcasters in the UHF band. The ATSC is the TV standard used in several countries for more than 20 years, given its obsolescence, a new standard has been proposed to address the need for more significant interaction between broadcasters and users with higher connectivity, audio quality, resolution and greater flexibility to serve both fixed and mobile users. Given these new challenges proposed in this standard, in this paper, the physical layer of ATSC 3.0 for the transmission system is simulated with MATLAB®. Simulation can be used as a learning platform to demonstrate the functionality of each block within the system since, in an industrial development environment, simulation is always done before actual implementation. Therefore, this work can also be used as a reference simulation platform, serving for validation and verification purposes. Also, to evaluate the simulation platform, it was validated according to the test vectors compatible with the existing standard provided by a standard commercial modulator, guaranteeing the interoperability of the system.

Keywords—ATSC 3.0, digital terrestrial broadcasting, OFDM, physical layer, TV.

Francisco, André, Danilo, Wheberth, Marcelo e Carlos, INATEL, Santa Rita do Sapucaí - MG, Brasil, E-mails: franciscoportelinha, andre-anjos, danilogaspar, wheberth, mcpaiva, caugusto@inatel.br

I. INTRODUÇÃO

Com a alta demanda de conectividade exigida pelo mercado de radiodifusão, e a redução do espectro de TV cedido para serviço de comunicações móveis, a indústria de radiodifusão está enfrentando novos desafios para manter sua fatia ativa no mercado [1]. Aliado a este fato e notória obsolescência do primeiro padrão ATSC (*Advanced Television Systems Committee*), um nova versão do padrão ATSC foi proposta para atender as novas exigências do mercado e de usuários cada vez mais flexíveis [2]. A primeira versão do padrão tem cerca de 20 anos e não suporta serviços baseados em IP (*Internet Protocol*) [3], oferece baixa taxa de transmissão e não possui flexibilidade para suportar usuários fixos e móveis simultaneamente [4].

O ATSC 3.0 foi desenvolvido para prover um aumento de 30% na vazão de dados quando comparada com sua versão anterior [3], considerando uma mesma relação sinal ruído [5]. Esse novo padrão utiliza modulações ortogonais como o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), junto com códigos internos corretores de erro (*LDPC - Low Density Parity Check*) e códigos externos detectores de erro com o BCH (Bose Ray-Chaudhuri) concatenados para a utilização mais eficiente do espectro e melhoria na relação sinal ruído do sinal [6]. Além disso, ainda podemos destacar as seguintes técnicas de transmissão adotadas no novo padrão: a utilização de modulações não uniformes para reduzir a distância entre a capacidade alcançada por modulações uniformes e o limite de capacidade imposto por Shannon [7]; o uso de técnicas de multiplexação por camadas (*LDM - Layered Division Multiplexing*), onde fluxos de informação são transmitidos simultaneamente, no mesmo instante de tempo e frequência. Neste caso, a camada superior (*Core Layer*) contém as informações de um fluxo de dados mais robusto, e a camada inferior (*Enhanced Layer*) contém as informações de um fluxo de dados com maior taxa de dados, em que estes sinais são combinados com diferentes níveis de potência. Nesta composição, dentro de um mesmo quadro, duas aplicações poderão ser suportadas, como um usuário fixo [8] e um usuário móvel [9].

Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de referência da camada física do ATSC 3.0 para o sistema de transmissão em ambiente MATLAB®. Modelos computacionais são amplamente utilizados pela indústria como referência para implementação real em sistemas embarcados. A literatura sobre o tema ainda é escassa, uma vez que sua padronização foi finalizada recentemente, em junho de 2017,

assim, poucas publicações abordam o padrão estabelecido, dentre estes podemos citar o trabalho realizado em [10], que descreve o resultado de uma série de testes de software e hardware aplicados às primeiras implementações do ATSC 3.0, com intuito de verificar e validar a proposta normativa deste padrão. E em [11] é apresentada uma implementação do ATSC 3.0 em plataforma GNU-RADIO utilizando um SDR (*Software Defined Radio*).

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira. Na Seção II é apresentada uma breve introdução da camada física do ATSC 3.0 abordando as principais características. Na Seção III, é descrito o modelo de referência utilizado para o desenvolvimento do projeto. A Seção IV apresenta os testes de validação e verificação com o auxílio de um modulador de referência padrão e os resultados obtidos. Por fim, na Seção V, as conclusões do trabalho são apresentadas.

II. ARQUITETURA DA CAMADA FÍSICA DO ATSC 3.0

O ATSC 3.0 possui muitos recursos e funcionalidades, entretanto, os detalhes de todas as especificações contidas na norma estão além do escopo deste artigo. Ainda assim, este artigo aborda os pontos cruciais para geração da forma de onda do ATSC 3.0 especificadas em [12] e [13]. Com o intuito de apresentar com detalhes o desenvolvimento da camada física do transmissor ATSC 3.0, descreve-se a formação de um quadro válido do transmissor de acordo com as normas mencionadas.

A. Estrutura de Quadro do ATSC 3.0

Para a formação de um quadro de transmissão válido do ATSC 3.0 é necessário um estudo detalhado das normas [12], que descreve em detalhes o processo de construção do símbolo de sincronismo e [13] onde são descritas as regras da formação da estrutura de quadro do sistema e dos símbolos de preâmbulo. A Figura 1 ilustra uma estrutura de quadro de transmissão genérica do sistema ATSC 3.0.

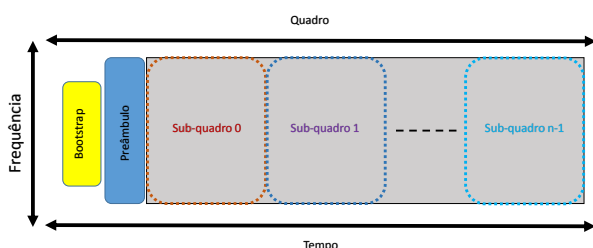


Fig. 1. Diagrama de blocos da estrutura do quadro de transmissão do sistema ATSC 3.0.

Com o intuito de ser flexível e permitir atualizações futuras, a estrutura de quadro é baseada em três partes principais [13]: a primeira denominada *bootstrap*, sucedida pelo símbolo de preâmbulo e pelos sub-quadros de dados. O quadro tem tamanho variável e flexível, com duração de 50 milissegundos a 5 segundos, podendo ser composto por diferentes tipos de

informação e modulações distintas, de acordo com o cenário estipulado.

1) *Sinal de Bootstrap*: O sinal do *bootstrap* é formado por quatro símbolos OFDM, visando agilizar e garantir os processos de detecção e sincronização no receptor [12]. O mesmo foi projetado para que os receptores consigam sincronizar em ambientes adversos em que a relação sinal ruído seja inferior a -6 dB [6].

Os quatro símbolos são gerados no domínio da frequência através do produto entre as amostras de uma sequência pseudo aleatória (PN) com uma sequência Zadoff-Chu (ZC) [15]. Posteriormente, visando a obtenção do símbolo no domínio do tempo, é realizada uma operação de transformada rápida de Fourier inversa - IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) contendo 2048 pontos. O símbolo de *bootstrap*, possui largura de faixa de 4,5MHz e duração de 500 microssegundos. Além de prover o sincronismo entre transmissor e receptor, os símbolos de *bootstrap* carregam informações acerca da versão utilizada, sinalização de emergência, bits de agendamento de *wake-up*, além de informações quanto a largura de banda ocupada, duração do quadro, taxa de amostragem e informações para decodificação do primeiro símbolo do preâmbulo.

2) *Sinais de Preâmbulo*: Como mostrado na Figura 1, após o *bootstrap* é adicionado à formação do quadro o símbolo de preâmbulo. Estes símbolos são responsáveis pela transmissão dos parâmetros necessários para demodular e decodificar toda a informação contida em cada PLP (*Physical Layer Pipe*) [13].

O preâmbulo é composto por duas partes, a primeira denominada L1-Basic e a segunda L1-Detail. O L1-Basic possui um tamanho fixo de 200 bits e contém as informações necessárias para decodificar os símbolos que transmitem de a informação de L1-Detail, este por sua vez é fundamental para decodificar todos os símbolos de dados subsequentes [6].

3) *Sub-quadro de Dados*: Seguindo a formação da estrutura de quadro do enlace de descida para o ATSC 3.0, os sub-quadros de dados são adicionados após os símbolos de *bootstrap* e preâmbulo. A informação útil transmitida nos sub-quadros de dados advém de pacotes no formato IP ou TS (*Transport Stream*). Estas informações são encapsuladas em pacotes ALP (*ATSC Link-Layer Protocol*) [16], com tamanho variável entre 4 e 64 kB. Após esta etapa, os dados serão encapsulados e formatados de acordo com as normas referenciadas em [17] e [18].

Após a formação de todos os PLPs, cada um destes deverá ser codificado e mapeado pelo bloco BICM (*Bit Interleaved and Coded Modulation*) [5]. Neste bloco, primeiramente, os dados passarão por um codificador externo do tipo LDPC [20] e, na sequência, por um codificador interno do tipo BCH [19]. O principal objetivo de utilizar o código BCH juntamente com o LDPC está no fato de que o código LDPC possui uma limitação na sua capacidade de correção, chamado *error-floor*. Isto significa que, para um dado cenário, não importa quão alta seja a relação sinal-ruído do sistema ou mesmo o número de iterações utilizado na decodificação, a taxa de erro de bit obtida após o decodificador LDPC será arbitrariamente baixa, mas não igual a zero. Depois da codificação de canal, é realizado, para aumento do desempenho do sistema, o entrelaçamento de bit em três etapas. Por último, os bits

resultantes são mapeados segundo as possíveis constelações disponíveis no padrão, sendo a partir de então descritos como células.

De acordo com [13], as células são obtidas mapeando-se a sequência de bits a ser transmitida utilizando constelações de ordem mais baixa, como QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*), até constelações de ordem mais alta, como 4096-QAM (*Quadrature amplitude modulation*) com 12 bits por símbolo. Modulações não uniformes [21] foram adotadas visando reduzir a diferença na eficiência energética do sistema em relação ao limite de capacidade do canal especificado por Shannon [7].

Após as etapas de codificação e mapeamento de dados, os símbolos resultantes serão multiplexados de acordo com uma técnica de transmissão inovadora presente no padrão ATSC 3.0 [22]. A multiplexação por camadas, denominada LDM, é uma tecnologia de superposição que combina dois fluxos independentes com diferentes características e configurações de codificação e modulação em um único canal de radio frequência coincidentes no tempo e na frequência. Em seguida, efetua-se o entrelaçamento temporal, o entrelaçamento em frequência e, por fim, a formação do quadro segundo o tipo de multiplexação escolhido [23].

Para a formação do quadro final faz-se necessário a inserção das portadoras pilotos nas posições especificadas em [13]. Posteriormente a formação do quadro de transmissão, é feita a conversão para o domínio do tempo através de uma IFFT de comprimento 8192, 16384 ou 32768 pontos. Os símbolos OFDM no domínio temporal são acrescidos de um intervalo de guarda, na qual se replica uma fração da porção final do símbolo em seu início, de forma a protegê-los dos efeitos dispersivos do canal de transmissão. Finalmente, este sinal é precedido pelos símbolos de *bootstrap* re-amostrados para a taxa de 6,192 MHz, resultando na forma de onda de transmissão em banda básica.

III. IMPLEMENTAÇÃO EM PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Com objetivo de viabilizar o desenvolvimento e implementação do modulador ATSC 3.0 em sistemas embarcados com execução em tempo real, foi desenvolvido um modelo de referência em MATLAB[®] do modulador proposto em [12] e [13]. A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos do modelo de referência desenvolvido.

Foram desenvolvidos todos os blocos essenciais para a validação e implementação de um projeto de modulador em tempo real. Na sequência, foram incorporadas as funções inovadoras do padrão ATSC 3.0. Todo o processo de formação do quadro seguiu fielmente os passos descritos na seção anterior. Primeiro, foram gerados os dados de entrada de acordo com [13]. Após esta etapa, os dados já em formato de PLPs foram codificados, entrelaçados e mapeados no bloco de BICM. Neste bloco os PLPs de entrada foram codificados por um codificador externo BCH e um codificador interno LDPC com o tamanho da palavra código de 64800 bits para símbolos de dados e 16200 para codificação dos símbolos de preâmbulo.

Após o entrelaçamento, os bits foram convertidos em células para realizar o mapeamento. Com o intuito de demonstrar a

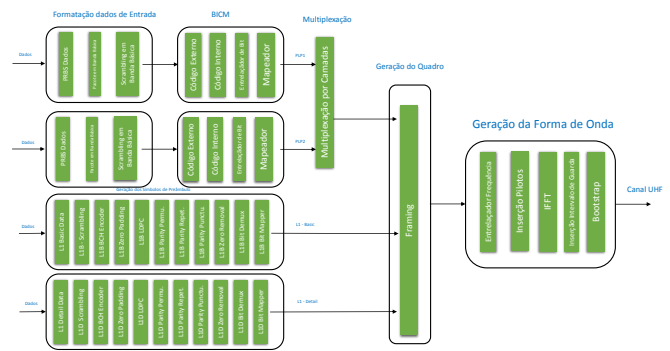


Fig. 2. Diagrama de blocos do modelo de referência implementado em Matlab[®].

funcionalidade de mais de um PLP em um mesmo canal de radio frequência, tanto o fluxo da camada superior, como o da camada inferior foram processados de forma independente e paralela, conforme ilustrado na Figura 2.

Paralelamente ao processo de formação dos sub-quadros de dados, ocorre a geração dos símbolos de preâmbulo, tanto o L1-Basic e o L1-Detail. É importante ressaltar que toda a cadeia de formação destes dados, a partir da formatação dos dados de entrada, passando pela codificação até o mapeamento tem por objetivo aumentar a robustez do sinal. Após este processamento, é realizada a etapa de formação de quadro, onde os símbolos de dados e preâmbulo são multiplexados, conforme pode ser verificado na Figura 2, para que no final do processo se tenha o quadro de transmissão completo, já apresentado anteriormente na Figura 1. Os símbolos de preâmbulo devem ser entrelaçados na frequência, sendo o mesmo opcional para os símbolos de dados, na sequência ainda são realizados os seguintes processos: inserção de pilotos, transformação para o domínio do tempo através da IFFT e inserção do intervalo de guarda.

Para a formação final do quadro válido, o símbolo de *bootstrap* deve passar por um processo de re-amostragem, visando adequar o período de amostragem do *bootstrap* aos demais símbolos. Por fim, todos os símbolos do sistema são multiplexados, formando o sinal de transmissão do padrão ATSC 3.0.

IV. TESTES E RESULTADOS

Nesta seção, é realizada a validação do modulador ATSC 3.0 de referência desenvolvido conforme as normas [12] e [13], já detalhadas nas seções anteriores. Para a aferição dos resultados, os vetores resultantes de cada bloco são comparados com um modulador padrão de mercado, fabricado pela empresa DekTec (DTU-315) [24]. Este modulador segue as normas [12] e [13], provendo vetores de teste para blocos do sistema, tornando assim concebível a validação do sistema como um todo.

Para a validação e aferição do sistema, foi utilizada a metodologia apresentada na Figura 3. Para cada bloco implementado na Figura 2 foi desenvolvido um roteiro de teste com os vetores de entrada e saída de cada ponto do sistema.

O sinal de estímulo, ou vetor de entrada, é processado por cada bloco, gerando um vetor de saída. Este vetor resultante é então comparado com o vetor fornecido pelo modulador de referência, possibilitando, assim, a validação de todos os blocos desenvolvidos.

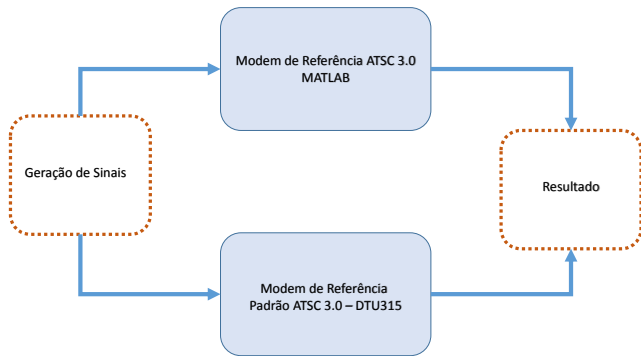


Fig. 3. Diagrama de blocos set-up de validação.

Para melhor ilustrar o conceito da técnica de modulação não uniforme a Figura 4, apresentada a constelação resultante de um fluxo de dados da camada inferior (256-QAM NUC com taxa de 9/15), implementada na plataforma de referência. O desempenho das modulações não uniformes apresentam aproximadamente 1 dB de ganho sobre o das modulação uniforme.

Na Figura 5, é apresentada a técnica de multiplexação por camadas, que apresenta vantagens sobre as convencionais, uma vez que, em um mesmo instante de tempo e na mesma frequência, dois usuários, com configurações distintas, são transmitidos, aumentando-se a eficiência espectral do sistema.

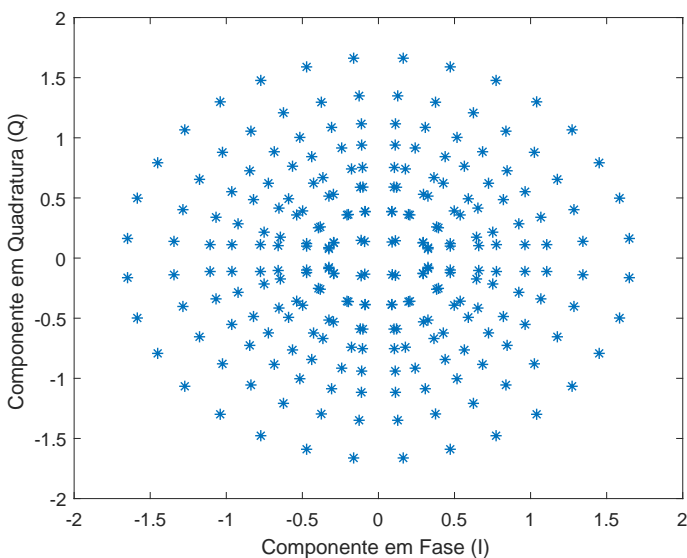


Fig. 4. Constelação do usuário da camada inferior de alta vazão.

No receptor, o sinal da camada superior é decodificado primeiramente e depois reconstruído para que na sequência seja possível decodificar o sinal da camada inferior, através da utilização da técnica de cancelamento sucessivo. Podemos

observar na Figura 5, os dois sinais combinados com um nível de injeção de potência de 10 dB. É importante ressaltar que a camada superior enxerga o nível da camada inferior como ruído, sendo esse nível de separação de potência ajustável entre 0 à 25 dB.

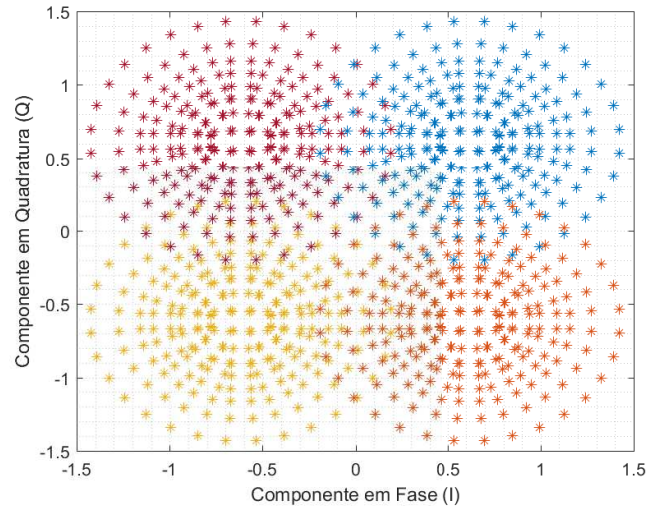


Fig. 5. Técnica de superposição de constelação aplicada.

O sistema final desenvolvido neste trabalho tem os seu parâmetros apresentados na Tabela I. Seguindo a metodologia de validação descrita, para implementação de todos os blocos do sistema, tem-se como resultado final a forma de onda de transmissão do padrão ATSC 3.0, ilustrada na Figura 6.

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS NO MODELO DE REFERÊNCIA.

Parâmetro	Valor
Outer Code	BCH
Inner Code	LDPC
Tamanho da palavra	64800 bits
LDPC Taxa de código	3/15 - 9/15
FEC L1 - Basic	Mode 1
FEC L1 - Detail	Mode 1
Modulação Préambulo	QPSK
Modulação dados	Core Layer: QPSK Enhanced Layer: 256-QAM
Tipo de multiplexação	LDM
Tamanho da IFFT	8192 pontos
Intervalo de guarda	1024
Padrão de pilotos	SP8-4
Largura de faixa	6 MHz
Duração do quadro	100,7 [ms]
Entrelaçador Temporal	Não
Entrelaçador de Frequência	Sim
Número PLPs	2
Número Sub-frames	112
Modo de transmissão	SISO
Frequência	474 MHz

Comparando-a com a forma de onda de transmissão do modulador de referência DTU-315, verificou-se um erro médio quadrático desprezível, corroborando todo o trabalho realizado. A Figura 6 e a Figura 7 apresentam o sinal de transmissão no domínio do tempo e o espectro de transmissão, respectivamente, obtidos com o modulador desenvolvido neste

REFERÊNCIAS

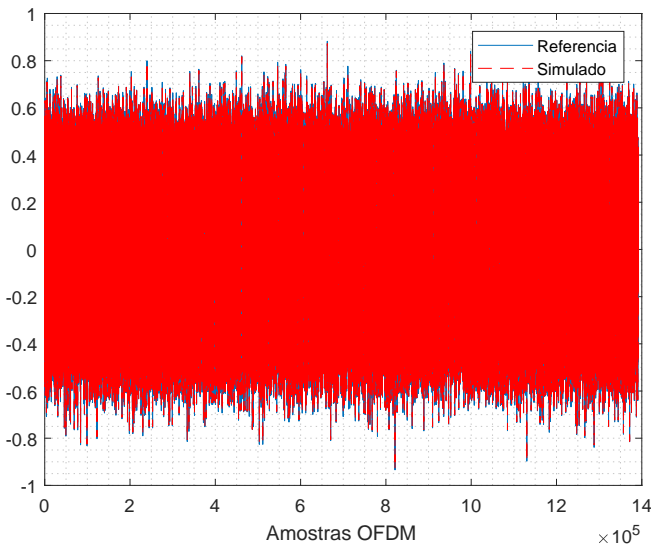


Fig. 6. Sinal ATSC 3.0 na saída do modulador.

trabalho e, também, com o modulador de referência. Perceba que é impossível identificar quaisquer diferenças entre o sinal gerado neste trabalho e o sinal do modelo de referência, o que também reafirma a validação do sistema desenvolvido.

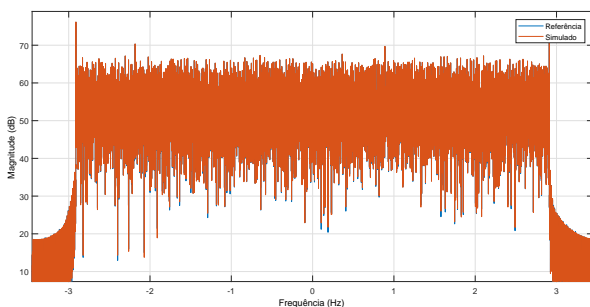


Fig. 7. Espectro do sinal transmitido.

V. CONCLUSÕES

Este artigo forneceu uma visão geral da especificação da camada física do sistema ATSC 3.0 e os desafios relacionados a implementação desta tecnologia. O ATSC 3.0 visa redefinir os padrões atuais de TV, integrando conectividade e interatividade para usuários. O desenvolvimento de uma plataforma de simulação da norma representa um importante marco, demonstrando o estado atual da arte. A plataforma desenvolvida neste trabalho tem como intuito facilitar a implementação de sistemas em tempo real e o entendimento das normativas estabelecidas por esse novo padrão.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi subsidiado pelo Finep/Funttel convênio nº 01.14.0231.00, sob o projeto CRR (Centro de Referência em Radiocomunicações). Os autores agradecem a empresa *yocast!* pelo empréstimo dos equipamentos necessários para teste e validação da plataforma.

- [1] R. Chernock, J. C. Whitaker and Y. Wu, "ATSC 3.0: The Next Step in the Evolution of Digital Television," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 63, no. 1, pp. 166-169, March 2017.
- [2] R. Chernock and J. C. Whittaker, "Next-Generation Broadcast Television: ATSC 3.0 [Standards in a Nutshell]," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33, no. 1, pp. 158-162, Jan. 2016.
- [3] ATSC Digital Television Standard, ATSC Standard A/53 Parts 1?6, Jan. 2007.
- [4] R. Chernock, D. Gómez-Barquero, J. Whitaker, S. I. Park and Y. Wu, "ATSC 3.0 Next Generation Digital TV Standard? An Overview and Preview of the Issue," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 154-158, March 2016.
- [5] L. Michael and D. Gómez-Barquero, "Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM) for ATSC 3.0," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 181-188, March 2016.
- [6] L. Fay, L. Michael, D. Gómez-Barquero, N. Ammar and M. W. Caldwell, "An Overview of the ATSC 3.0 Physical Layer Specification," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 159-171, March 2016.
- [7] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," in *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, July 1948.
- [8] S. Kwon et al., "ATSC 3.0 LDM/TDM performance comparison in fixed reception environment," 2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Cagliari, 2017, pp. 1-3.
- [9] B. m. Lim et al., "Mobile field comparison test of LDM and TDM based on ATSC 3.0," 2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Cagliari, 2017, pp. 1-3.
- [10] L. Michael and D. Gómez-Barquero, "Verification and validation of the physical layer ATSC 3.0 standard," 2016 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Nara, 2016, pp. 1-6.
- [11] V. M. Dionísio and C. Akamine, "ATSC 3.0 implementation in GNU Radio Companion," 2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Cagliari, 2017, pp. 1-6.
- [12] ATSC: "ATSC: A/321, System Discovery and Signaling," Doc. A/321:2016, Advanced Television System Committee, Washington, D.C., 23 March 2016.
- [13] ATSC: "ATSC: A/322, Physical Layer Protocol," Doc. A/322:2017, Advanced Television System Committee, Washington, D.C., 6 June 2017.
- [14] ATSC: "ATSC Standard: Signaling, Delivery, Synchronization and Error Protection," Doc. A/331:2017, Advanced Television System Committee, Washington, D.C., 6 December 2017.
- [15] D. He, K. Shelby, M. Earnshaw, Y. Huang, H. Xu and S. I. Park, "System Discovery and Signaling Transmission Using Bootstrap in ATSC 3.0," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 172-180, March 2016.
- [16] W. Kwon, J. Hwang, H. K. Yang, S. Hwang, K. Takahashi and L. Michael, "The ATSC Link-layer Protocol (ALP): Design and Efficiency Evaluation," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 316-327, March 2016.
- [17] ATSC: "ATSC Standard: Link-Layer Protocol," Doc. A/330:2016, Advanced Television System Committee, Washington, D.C., 19 September 2016.
- [18] ATSC: "ATSC Candidate Standard: Scheduler and Studio-Transmitter Link," Doc. A/324, Advanced Television System Committee, Washington, D.C., 30 September 2016. (Work in process.)
- [19] L. Michael and D. Gómez-Barquero, "Modulation and coding for ATSC 3.0," 2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Ghent, 2015, pp. 1-5.
- [20] K. J. Kim et al., "Low-Density Parity-Check Codes for ATSC 3.0," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 189-196, March 2016.
- [21] N. S. Loghin, J. Zöllner, B. Mouhouche, D. Anzorregui, J. Kim and S. I. Park, "Non-Uniform Constellations for ATSC 3.0," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 197-203, March 2016.
- [22] L. Zhang et al., "Layered-Division-Multiplexing: Theory and Practice," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 216-232, March 2016.
- [23] M. Earnshaw, K. Shelby, H. Lee, Y. Oh and M. Simon, "Physical Layer Framing for ATSC 3.0," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 263-270, March 2016.
- [24] All-Standard All-Band Modulator for USB-3," DTU-315", DekTec, March 2017.