



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA**



RAFAEL HENRIQUE IGNÁCIO

SOLUÇÕES USANDO LDM PARA EVOLUÇÃO DO ISDB-Tb

Limeira
2019



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA**



RAFAEL HENRIQUE IGNÁCIO

SOLUÇÕES USANDO LDM PARA EVOLUÇÃO DO ISDB-Tb

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Rangel Arthur

Limeira
2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de tudo agradeço a Deus por tudo, pela vida que tenho, pela minha saúde, pelas oportunidades que sempre me proporcionou, por sempre estar me guiando e me iluminando.

Agradeço aos meus pais (Airton e Francisleine) que são a minha base e sempre me apoiaram e me incentivaram nos meus estudos e em todos os momentos de minha graduação, me dando as melhores condições possíveis para estudar.

Agradeço também a todos os meus colegas de curso que contribuíram na minha formação, compartilhando conhecimentos e me ajudando a alcançar minha graduação.

Deixo também o agradecimento a Universidade Estadual de Campinas, em especial à Faculdade de Tecnologia de Limeira e seus docentes, por compartilharem seus conhecimentos e experiências, contribuindo para a minha qualificação profissional e pessoal, e me permitindo aprender uma profissão.

Por fim, em especial, deixo meu agradecimento ao Professor Doutor Rangel Arthur, que me concedeu a oportunidade de desenvolver um projeto FAPESP de iniciação científica extremamente relevante, cujo resultados renderam publicações internacionais e participação no *2018 IEEE Broadcast Symposium* nos EUA. Agradeço-o também pela oportunidade de poder ter experiência em monitorias e Trabalho de Conclusão de Curso durante minha graduação, por sempre acreditar e confiar em mim, e por me dar apoio e suporte em todas as atividades que desenvolvi ao seu lado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro do sinal ISDB-Tb	9
Figura 2. Conceito de sobreposição espectral	12
Figura 3. Arquitetura do transmissor	13
Figura 4. Arquitetura do receptor	13
Figura 5. Diagrama de sistemas <i>Cloud Transmission</i>	14
Figura 6. Rede MFN	15
Figura 7. Rede SFN	15
Figura 8. Vantagens X desvantagens das SFNs Distribuídas e <i>Gap-Filler</i>	16
Figura 9. Subsistema transmissor ISDB-Tb	17
Figura 10. Exemplo de intensidade de campo por tipo de recepção para o SBTVD	18
Figura 11. Intensidade de campo da rede de TV digital da EPTV Campinas	19
Figura 12. Sistema SFN ATSC 3.0 com <i>Gap-fillers</i> usando métodos convencionais de entrega	20
Figura 13. Sistema SFN ATSC 3.0 proposto com <i>Gap-fillers</i> usando a LL LDM como <i>link</i> sem fio de distribuição em banda para serviços móveis	20
Figura 14. Espectro do sinal LDM de duas camadas com <i>link</i> de distribuição sem fio em banda	21
Figura 15. Transmissor ISDB-Tb LDM	22
Figura 16. Subportadoras de um sinal OFDM (Frequência normalizada em relação ao valor $1/T$)	25
Figura 17. Transmissão com modulação adicional	26
Figura 18. Receptor ISDB-Tb LDM	27
Figura 19. <i>Setup</i> do laboratório para os testes de transmissão e recepção	28
Figura 20. Placa <i>Nuand bladeRF x40</i>	30
Figura 21. Constelação QPSK do sinal da UL após o mapeamento	32
Figura 22. Constelação 16-QAM do sinal da LL após o mapeamento	32
Figura 23. Constelação LDM na entrada do modulador OFDM	33
Figura 24. Resposta no tempo do sinal LDM modulado	33
Figura 25. Resposta no tempo do sinal após a conversão para RF	34
Figura 26. Resposta no tempo e densidade espectral de potência do sinal após a conversão para RF	34
Figura 27. Banda de transmissão OFDM do sinal LDM	35
Figura 28. PSD do sinal transmitido via antena	36
Figura 29. PSD do sinal transmitido via cabo coaxial	36
Figura 30. Constelação LDM na saída do demodulador OFDM	37
Figura 31. Constelação QPSK na saída do estimador	38
Figura 32. Constelação 16-QAM após o cancelamento de sinal	38
Figura 33. Desempenho do sistema	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Taxa de codificação e padrão de puncionamento	24
Tabela 2. Níveis I e Q	24
Tabela 3. Fator de normalização para QPSK e QAM	24
Tabela 4. Parâmetros da IFFT	26

IGNÁCIO, Rafael Henrique. SOLUÇÕES USANDO LDM PARA EVOLUÇÃO DO ISDB-Tb. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações.) – Faculdade de Tecnologia. Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2019.

RESUMO

Este trabalho de conclusão curso aplicará a Multiplexação por Divisão em Camadas (LDM – *Layered Division Multiplexing*) no Sistema Brasileiro de Televisão Digital usando Rádio Definido por Software (SDR - *Software Defined Radio*) como uma proposta de tecnologia para as novas gerações de TV Digital. A maior motivação para a realização deste trabalho foi a possibilidade de fazer algo novo e de grande impacto nessa área.

Inicialmente, são apresentados alguns conceitos e características sobre o padrão brasileiro ISDB-Tb, depois são apresentados conceitos sobre LDM e Redes de Frequência Única (SFN – *Single Frequency Networks*) necessários para o entendimento e contextualização deste trabalho. Toda a teoria sobre Televisão Digital (DTV – *Digital Television*), LDM, e SFN precisou ser estudada detalhadamente. Assim como, programação avançada em MATLAB e uso da plataforma SDR. O resultado desses estudos serviu como base para os tópicos que apresentem esses conceitos.

As soluções 1 e 2 são explicadas em detalhes, assim como a relação entre as mesmas. Logo após, tem-se a explicação em detalhes, módulo a módulo, da arquitetura e da operação do sistema ISDB-Tb LDM implementado, que serve como base para as soluções 1 e 2 apresentadas.

As ferramentas utilizadas e a forma com que esse trabalho se desenvolveu também foram apresentadas. Para os resultados obtidos, algumas das mais importantes funções utilizadas em MATLAB foram descritas, assim como as que fazem toda interface com a placa de SDR. A operação do sistema é demonstrada com resultados de cada etapa, e finalmente é demonstrado o advento de aumento de capacidade, *performance* e eficiência espectral.

Para finalização desse trabalho, observações importantes são feitas com base nos resultados obtidos, mostrando os pontos positivos da implementação da LDM no ISDB-Tb, e os pontos negativos, que são poucos. Para efeito de dar continuidade nas propostas aqui apresentadas são feitas algumas considerações.

Palavras-chave: ISDB-Tb, SBTVD, LDM, SFN, SDR, DTV, MATLAB.

IGNÁCIO, Rafael Henrique. SOLUTIONS USING LDM FOR ISDB-Tb EVOLUTION. 2019. Course Completion Work (Graduation in Telecommunications Engineering.) - Faculty of Technology. State University of Campinas. Limeira, 2019.

ABSTRACT

This course completion work will apply the Layered Division Multiplexing (LDM) in the Brazilian Digital Television System using Software Defined Radio (SDR) as a technology proposal for the new generations of Digital TV. The greatest motivation for this work was the possibility of doing something new and of great impact in this area.

Initially, some concepts and characteristics are presented on the Brazilian ISDB-Tb standard, after which concepts are presented about LDM and Single Frequency Networks (SFN) necessary for the understanding and contextualization of this work. The whole theory on Digital Television (DTV - Digital Television), LDM, and SFN needed to be studied in detail. As well as, advanced programming in MATLAB and use of the SDR platform. The result of these studies served as the basis for the topics that present these concepts.

Solutions 1 and 2 are explained in detail, the relationship between them is also explained. Then, the module-by-module, architecture and operation explanation of the implemented ISDB-Tb LDM system is presented, which serves as a basis for solutions 1 and 2 presented.

The tools used and the way in which this work was developed was also presented. For the results obtained, some of the most important functions used in MATLAB have been described, as well as those that make all interface with the SDR card. The operation of the system is demonstrated with results of each stage, and finally the advent of increase of capacity, performance and spectral efficiency.

To conclude this work, important observations are made based on the results obtained, showing the positive points of the implementation of LDM in ISDB-Tb, and the negative points, which are few. In order to give continuity to the proposals presented here, some considerations are made.

Keywords: ISDB-Tb, SBTVD, LDM, SFN, SDR, DTV, MATLAB.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	10
3. ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	11
4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE LDM	11
5. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE SFN	14
6. SOLUÇÃO 1	17
7. SOLUÇÃO 2	18
8. SISTEMA ISDB-TB LDM MODIFICADO	21
8.1. TRANSMISSOR.....	22
8.2. RECEPTOR.....	27
9. MATERIAIS	28
9.1. <i>SETUP</i> DO LABORATÓRIO.....	28
9.2. <i>SOFTWARE MATLAB R2016A</i>	29
9.3. PLATAFORMA SDR	29
10. METODOLOGIA	31
11. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
12. CONCLUSÃO	39
13. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

O marco na evolução das tecnologias de radiodifusão televisivas foi a implementação dos sistemas de Televisão Digital (DTV – *Digital Television*), que mudaram completamente o cenário de TV.

Os objetivos dessa transição foram transmitir áudio e vídeo em qualidade superior, melhorar a representação das cores, aumentar as resoluções espaciais vertical e horizontal, apresentar uma razão de aspecto de 16:9, para aproximar o formato da tela da TV ao da tela de cinema, prover som multicanal de alta fidelidade, prover sinal para diferentes tipos de recepção e o mais importante, atingir tudo isso mantendo a mesma largura de banda utilizada [1].

Então, essa transição deu origem a padrões de DTV, que adotam tecnologias diferentes para difusão de informação televisiva. Atualmente, tem-se quatro principais padrões de DTV em operação no mundo, sendo eles o padrão americano ATSC (*Advanced Television Systems Committee*), que se encontra atualmente na versão 3.0 e é um padrão referência para o desenvolvimento desse trabalho. Tem-se também o padrão chinês DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*), o europeu DVB (*Digital Video Broadcasting*), e por fim o japonês ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*), que é referência para o padrão brasileiro [2].

O desenvolvimento do Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD) foi feito pela SET (Sociedade de Engenharia de Televisão) e pela ABERT (Associação Brasileira das Empresas de Rádio e Televisão) que conduziram testes com os padrões existentes para analisar a qualidade de sinal transmitido, a *performance* do sistema e o suporte para os diversos tipos de recepção (fixa, móvel e portátil) [1][3].

Dos padrões analisados, o que melhor se adaptou ao cenário brasileiro, apresentou qualidade suficiente para os diversos tipos, que inclusive é um pré-requisito do SBTVD, e era o mais avançado do ponto de vista tecnológico e de desempenho, foi o japonês ISDB-T [1][3].

O ISDB-T é uma evolução do padrão europeu DVB-T que foi desenvolvido com o objetivo de permitir que receptores de banda larga e banda estreita pudessem ter acesso ao sinal em Alta Definição (HD – *High Definition*) [1].

Dessa forma, o padrão brasileiro passou a ser chamado de ISDB-Tb. As especificações do ISDB-Tb por sua vez são banda de canalização de 6 MHz, esquema de modulação OFDM com banda segmentada e acrescido de algumas tecnologias, como compressão de vídeo MPEG-4 AVC (H.264), transmissão digital de sinal em Definição Padrão (SD - *Standard Definition*) e em *Full-HD*, transmissão simultânea para recepção fixa, móvel e portátil, mais interatividade, e *middleware* Ginga. Esse *middleware* é fruto de tecnologias desenvolvidas em universidades brasileiras [1][3].

Como foi dito no parágrafo anterior, esse padrão utiliza uma modulação OFDM de banda segmentada, em outras palavras, isso quer dizer que a banda total de transmissão é dividida em 13 segmentos que formam as camadas, dando origem a transmissão hierárquica, como é representado no espectro da Figura 1. A recepção em dispositivos móveis portáteis, que é um dos requisitos do ISDB-Tb, é possível com essa configuração de banda, onde a camada em verde contendo um segmento, geralmente chamado *one-seg*, é utilizada para tal função [4].

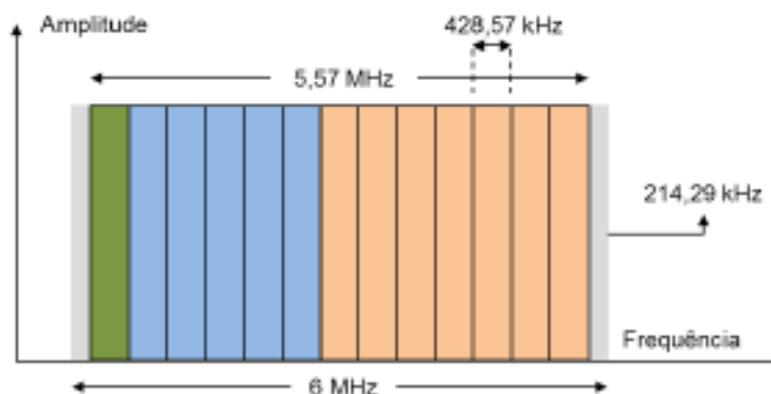


Figura 1. Espectro do sinal ISDB-Tb [4].

De forma geral, um sistema de televisão digital terrestre é definido como uma plataforma capaz de transmitir e receber sinais de áudio e vídeo, bem como dados, onde o sinal de radio difusão é transmitido na banda VHF (*Very High Frequency*) ou na banda UHF (*Ultra High Frequency*). O modelo que serve de referência para todos os padrões de DTV foi desenvolvido pela União Internacional de Telecomunicações (ITU – *Internacional Telecommunications Union*).

Basicamente, em sua arquitetura o sistema pode ser dividido em dois blocos principais, o de Difusão e Acesso e o Terminal de Acesso. No primeiro bloco a informação é preparada para transmissão no meio, e no segundo bloco o objetivo é reconstruir da melhor forma possível a informação recebida. Entre esses dois blocos se encontra o Canal de Radiodifusão, que é o meio (no caso o ar) por onde os sinais são transmitidos. O canal de transmissão é um meio difícil de ser prever, devido aos efeitos de multipercurso, as fontes de interferência, adição de ruídos e efeito Doppler na recepção. Para contornar as adversidades do meio, são necessárias técnicas complexas para que a transmissão e recepção seja eficiente e confiável [1].

Assim como toda tecnologia evolui, cada uma com sua velocidade, os padrões de DTV também estão em evolução. As expectativas para a Próxima Geração de DTV (NG-DTV – *Next Generation Digital Television*) são sistemas com maiores taxas de transmissão de dados, maior qualidade e sinais em definições superiores, robustez e *performance* contra o ruído e interferências, e prover novos serviços [5].

Entretanto, a situação em que se encontram as emissoras de TV atualmente colocou um novo tópico em discussão recentemente. As difusoras de TV estão perdendo seu tradicional espaço de produção e distribuição de conteúdo para corporações que vêm fazendo o mesmo, porém com diferentes estratégias de distribuição de conteúdo, não usando as tecnologias de rádio difusão.

Diante desse cenário, um tema crescente em discussão é o de Tecnologias Disruptivas para NG-DTV, que são tecnologias que podem mudar o modelo tradicional de negócios ajudando as emissoras a evoluírem seus sistemas e se manterem relevantes no mercado.

Outro desafio que a indústria de TV vem enfrentando, principalmente as emissoras DTV, é a relocação do espectro de TV devido à crescente demanda de serviços sem fio de banda larga, como as redes 4G de telefonia móvel.

Diante de todas essas imposições, a evolução dos sistemas de DTV para superar todos esses desafios, vai certamente depender de tecnologias com alta eficiência espectral.

Uma tecnologia com essa característica capaz de contribuir para a evolução dos sistemas de DTV diante dos desafios apresentados anteriormente é a Multiplexação por Divisão em Camadas (LDM - *Layered Division Multiplexing*). Desenvolvida e implementada no ATSC 3.0, essa tecnologia consegue atingir todas as expectativas para a NG-DTV, e contribui como tecnologia disruptiva [5].

Maiores explicações sobre LDM e como ela foi utilizada nesse trabalho são dadas nas Seções 4 e 6, respectivamente.

Uma outra problemática mais interna dos sistemas de TV, que se resolve com o potencial de trazer mais audiência aos serviços de transmissão de DTV terrestre, é a entrega de serviço televisivo móvel em áreas internas ou fechadas densamente populadas, como aeroportos, *shoppings centers*, centros de eventos, metrô, etc. E esse é um fator importante para o futuro dos sistemas de DTV, uma vez que o número de dispositivos móveis está aumentando significativamente com o tempo [6].

Apesar dos sistemas de transmissão serem muito robustos e potentes, prover serviços em certos tipos de áreas internas e fechadas ainda é desafiador, devido as altas perdas por penetração e limitação no tamanho das antenas desses dispositivos e elevação das mesmas, resultando em um sinal recebido com potência insuficiente, levando a não disponibilidade do serviço [6].

Uma solução que se aplica é a implementação de transmissores de baixa potência em Redes de Frequência Única (SFN – *Single Frequency Network*). As redes SFN são uma ótima alternativa com alta eficiência espectral e apesar de complexa implementação são extremamente vantajosas. Elas serão melhores discutidas na Seção 5 [6].

Então, a estratégia seria colocar esses transmissores de baixa potência para prover serviço móvel confiável e estável, especificamente para essas áreas internas e fechadas. Portanto, esses transmissores necessitam de um *link* de distribuição para transmitir conteúdo. Dessa forma utilizando a proposta da Solução 1, a ideia da Solução 2 é aproveitar a proposta e complementá-la de modo a solucionar a problemática anteriormente apresentada.

Diante de todas essas informações, o sistema ISDB-Tb LDM, que é mostrado na Seção 8, mostra que as Soluções 1 e 2 são aplicáveis ao padrão brasileiro, uma vez que a LDM também é aplicável. O sistema desenvolvido foi primeiramente simulado e validado no *software* MATLAB, e posteriormente foi implementado em Rádio Definido por Software (SDR – *Software Defined Radio*).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho de conclusão de curso é apresentar duas possíveis aplicações da técnica LDM no ISDB-Tb, que possibilitam a evolução desse padrão em termos tecnológicos e em termos de novos serviços de difusão que podem ser oferecidos.

As propostas que serão apresentadas nos tópicos seguintes não são triviais. Elas foram desenvolvidas tomando como referências pesquisas feitas em centros de pesquisa internacionais.

Então, tomando como base essas referências, os objetivos específicos desse trabalho são:

- Desenvolver uma solução para link de distribuição de DTV usando LDM;
- Desenvolver uma solução para prover o serviço de sinal em HDTV e UHDTV ao mesmo tempo usando LDM;
- Implementar um sistema ISDB-Tb usando LDM e SDR;
- Demonstrar por meio dessa implementação que as soluções são válidas e aplicáveis ao ISDB-Tb;
- Estabelecer uma relação entre as mudanças causadas pela aplicação da LDM e ganhos e avanços com essa aplicação.

3. ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

Essa monografia possui 14 seções que são organizadas da seguinte forma: Seção 4 descreve alguns conceitos fundamentais sobre LDM, necessários para a compressão do desenvolvimento e dos resultados desse trabalho. Da mesma forma é feito na Seção 5, para redes SFN. Na Seção 6 é apresentada toda a solução 1 em detalhes. Da mesma forma, é feito na Seção 7 para a Solução 2. Já na Seção 8 tem-se toda explicação sobre os subsistemas transmissor e receptor que formam o sistema ISDB-Tb LDM modificado. Todos os módulos são apresentados em detalhes. Na Seção 9 são expostas as ferramentas e equipamentos utilizados para desenvolvimento e implementação do sistema. Na Seção 10, a forma como as soluções foram pensadas e como o sistema foi implementado usando os materiais do tópico anterior foi descrita. Os resultados de tudo o que foi desenvolvido nesse trabalho está disposto na Seção 11. A Seção 12 conclui a monografia comentando sobre os resultados em relação aos objetivos, e por fim, caracterizada mais como uma extensão da conclusão, a Seção 13 traz sugestões para futuros trabalhos dentro do mesmo tema.

4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE LDM

Assim como as tradicionais técnicas de Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*) e Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM - *Frequency Division Multiplexing*), a LDM é uma tecnologia de camada física que permite a transmissão de múltiplos sinais em um mesmo canal [7].

Comparada a essas tradicionais técnicas de multiplexação, a LDM tem um uso mais eficiente do espectro, e além disso o uso da técnica LDM não impede o uso da TDM, ou da FDM, mas sim uma aplicação de FDM ou TDM em camadas LDM, o que aumenta ainda mais a eficiência espectral e capacidade de transmissão da camada. E além disso, outra vantagem da LDM é que ela pode coexistir também com outras tecnologias de camada física, como tecnologias de múltiplas antenas, e Constelações Não Uniformes (NU-QAM) [8].

Essa técnica foi desenvolvida pelo *CRC Canada, ETRI Korea e EHU Spain*, para ser utilizada nas novas gerações do padrão americano de TV digital ATSC 3.0 [8].

A LDM surgiu da necessidade das difusoras de televisão que seguem o ATSC, em prover conteúdo para diferentes tipos de dispositivos, que vão desde *smartphones* e *tablets* até as televisões [7].

A característica de prover sinal para diversos tipos de recepção não era o forte nas gerações anteriores do ATSC, devido a isso, a LDM foi inserida na versão mais atual do ATSC, que é a 3.0, justamente para suprir essa demanda.

Além disso, a LDM foi desenvolvida em um cenário onde se tem um crescente aumento das demandas sobre o uso do espectro, devido ao crescimento de outros tipos de serviço de banda larga sem fio, como telefonia móvel. Dessa forma, a LDM possibilita mais informação e flexibilidade dentro de uma banda de frequência reservada.

Conceitualmente, a LDM é uma técnica de transmissão hierárquica de reutilização do espectro por meio do conceito de sobreposição espectral, cuja ideia é sobrepor vários fluxos de dados sincronizados (tempo e frequência), com diferentes técnicas de codificação e modulação, utilizando camadas de diferentes níveis de potência e a mesma largura de banda. Cada fluxo de dados pode corresponder a um tipo de serviço ou tipo de recepção [9][10].

O conceito de sobreposição espectral é mostrado graficamente na Figura 2 a seguir, para um sistema LDM configurado em 2 camadas. Lembrando que esse conceito é extensível para n camadas LDM. Na Figura 2, tem-se a Camada Superior (UL – *Upper Layer*) e a Camada Inferior (LL – *Lower Layer*) separadas por uma diferença de potência chamada de Nível de Injeção (*Injection Level*) [10].

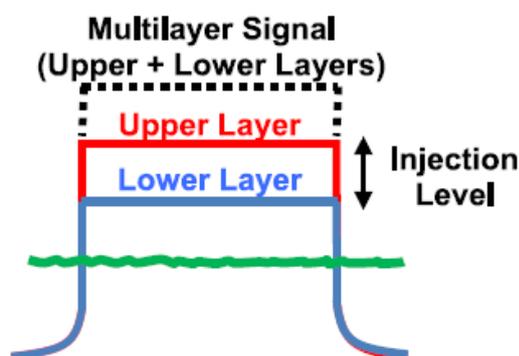


Figura 2. Conceito de sobreposição espectral [9].

O Sinal Multicamadas (*Multilayer Signal*), também chamado de sinal LDM, é o resultado da soma do sinal da UL com o sinal da LL. Com isso, 100% da largura de banda de RF e 100% do tempo são usados para transmitir o sinal multicamada, que é composto pelos sinais das duas camadas [10].

Baseando-se nos conceitos de *Cloud Transmission*, é especificado que a UL deve ser muito robusta, tendo como objetivo uma maior área de cobertura, ou seja, permitir a recepção adequada em condições de baixo SNR e não focando em altas taxas de transmissão. Já a LL, o foco é alta taxa de transmissão de dados e área de cobertura reduzida quando comparado à UL [5][10].

O nível de injeção que separa as camadas em termos de potência, pode variar de 3 a 6 dB [10].

A grande questão agora é como implementar esse conceito na arquitetura de um sistema ISDB-Tb ou qualquer outro sistema de TV. Aí que se tem mais uma das grandes vantagens dessa tecnologia, pois o aumento de complexidade de um receptor LDM em relação a um receptor tradicional é de menos de 10%. E no subsistema transmissor o que se tem é uma duplicação de módulos já existentes [7].

Em relação à arquitetura de um sistema LDM, é especificado que os parâmetros relativos à modulação do sinal e transmissão sejam compartilhados por ambas as camadas, o que faz sentido, considerando que somente o sinal

multicamadas é enviado. Esses parâmetros são tamanhos da IFFT/ FFT, duração do Intervalo de Guarda (IG), e o prefixo cíclico [9][10].

A arquitetura do subsistema transmissor representada em forma de diagrama de blocos pode ser vista na Figura 3 a seguir.

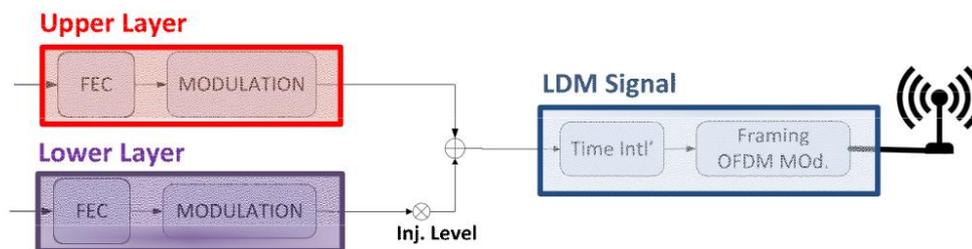


Figura 3. Arquitetura do transmissor [10].

Como pode ser visto, as partes principais dos módulos de transmissão (em azul) são compartilhadas por ambas as camadas. As mudanças ocorrem mesmo nos blocos de codificação de canal e mapeamento, haja visto que isso é determinado pelo tipo de serviço que cada camada está provendo.

As grandes mudanças na arquitetura do sistema ocorrem no subsistema receptor. Mais uma das grandes vantagens da LDM, é que o receptor tradicional consegue operar em um sistema LDM, demodulando e decodificando somente o sinal da camada superior. Dessa forma, a aplicação da LDM não torna os receptores simples obsoletos [10].

Já a recepção completa do sinal LDM, é feita por um receptor que segue a arquitetura representada pelo diagrama de blocos na Figura 4.

A primeira etapa é a aquisição do sinal em RF, onde é feita toda demodulação, estimação de canal, sincronização, e equalização, para regeneração do sinal LDM. Em seguida, é feita toda recuperação do sinal da UL. O primeiro processamento nessa etapa é feito pelo bloco estimador *fi* (*Estimator of Data Stream fi*), conforme especificado no diagrama de blocos de um sistema *Cloud Transmission* representado graficamente na Figura 5 [5][10].

Depois de recuperado o sinal da UL, ele segue para regeneração para posteriormente ser subtraído do sinal LDM recuperado, resultando em um processo de cancelamento do sinal da camada superior.

Após o cancelamento do sinal, o sinal da LL segue para o desmapeamento e decodificação de canal.

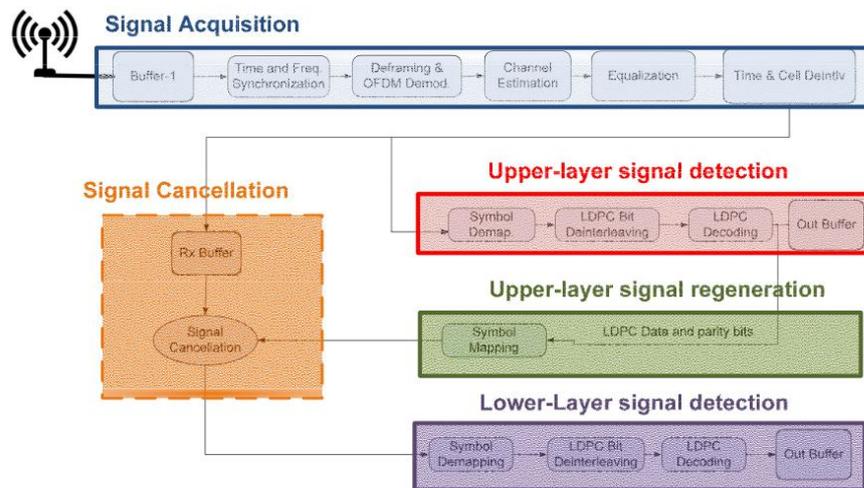


Figura 4. Arquitetura do receptor [10].

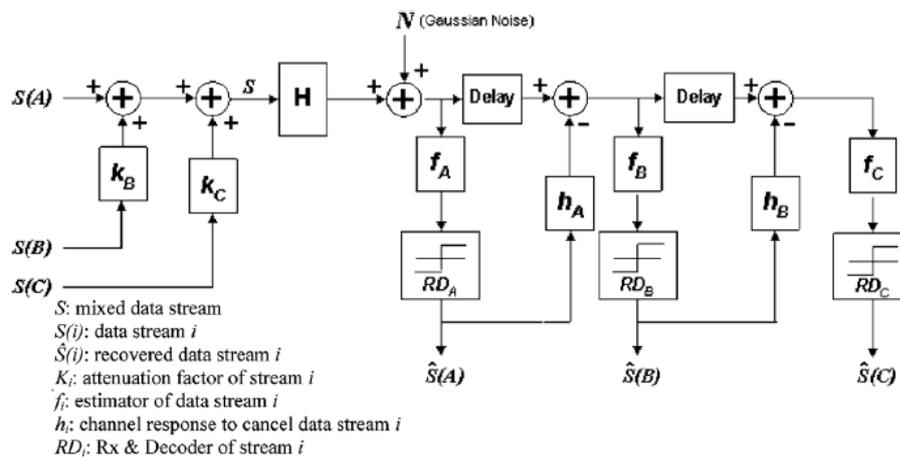


Figura 5. Diagrama de sistemas Cloud Transmission [5].

Um dos testes que foram realizados quando se desenvolveu a tecnologia LDM, foi a comparação de um sistema LDM de duas camadas, com um nível de injeção da camada inferior de -4 dB, com o sistema DVB-T2+NGH de camada única, com esse último usando 55%, 40% e 30% da capacidade de canal DVB-T, para o fluxo móvel mais robusto [11].

Analisando os resultados, foi observado que a TDM não consegue atingir a relação entre as taxas de dados e os SNR, semelhante as alcançadas pela LDM. O sistema em teste estava transmitindo separadamente dois programas, um em UHDTV (4K) em uma taxa de 19.43 Mbps, e outro em HDTV, a 60 frames por segundo [11].

Concluiu-se que a técnica LDM é muito robusta, sendo muito difícil quebrar o fluxo em UHDTV, e quase impossível quebrar o fluxo de sinal em HDTV [11].

5. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE SFN

As SFN são uma tecnologia, que assim como a LDM, possuem uma grande eficiência espectral quando comparada às técnicas concorrentes tradicionais.

A principal característica de uma rede SFN é que os transmissores de uma determinada célula ou região transmitirão simultaneamente a mesma informação

usando um mesmo canal de frequência para a cobertura de uma área geográfica [12][13].

Essa tecnologia é aplicável às redes de radiodifusão de TV digital, pois seu funcionamento é baseado nas propriedades da modulação OFDM. Dessa forma, a topologia de uma rede SFN contrasta com a topologia de uma Rede de Múltiplas Frequências (MFN – *Multiple Frequency Network*), onde os transmissores operam em frequências distintas. A representação de uma rede MFN é mostrada na Figura 6 e de uma rede SFN na Figura 7 [12][13].

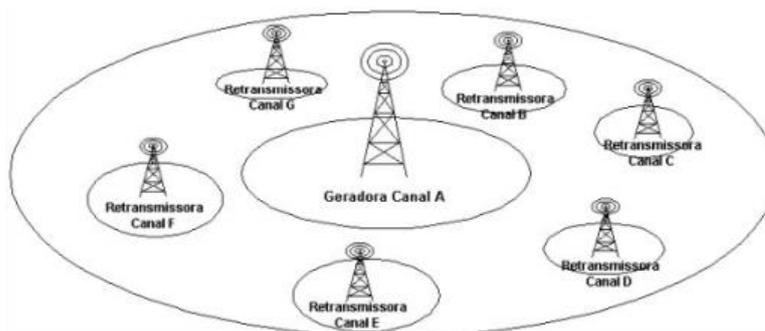


Figura 6. Rede MFN [12].

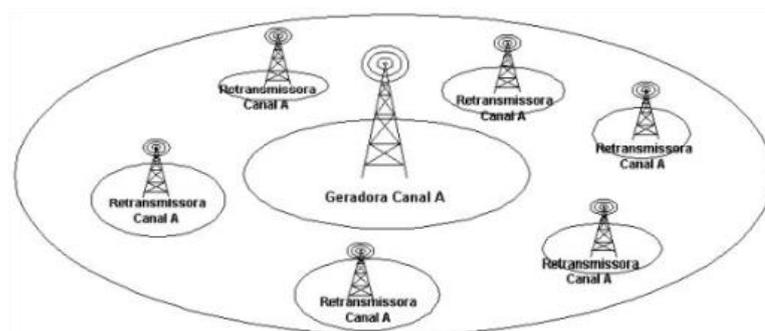


Figura 7. Rede SFN [12].

Como pode ser visto na Figura 6, tem-se 7 canais sendo utilizados para transmissão e retransmissão de um mesmo sinal. Já na Figura 7, tem-se um mesmo canal utilizado por todas as estações retransmissoras, para transmissão de um mesmo sinal.

Como resultado disso, fica claro que as redes SFN oferecem vantagens significativas, permitindo a otimização do espectro eletromagnético e da largura de banda utilizada, podendo ser uma das únicas saídas aos desafios futuros de congestionamento do espectro.

Entretanto, duas das maiores preocupações no planejamento e implementação de uma rede SFN, é saber como o sistema lidará com Interferência Intersimbólica (ISI – *Intersymbol Interference*), que em DTV baseados em OFDM, é controlada com o uso do Intervalo de Guarda (GI). A segunda preocupação é a estratégia de sincronização dos receptores, sendo esse parâmetro mais difícil de abordar para sistemas baseados em OFDM. Se esses dois fatores forem tratados adequadamente a implementação da rede SFN será feita com sucesso e a área de cobertura será eficientemente alcançada [12].

Para a apresentação da Solução 2 e consequente implementação da mesma foi considerado um sistema onde esses dois fatores são tratados adequadamente.

Dessa forma, a implementação consiste em apresentar a Solução 2, que traz algo dentro dos conceitos de formas de distribuição em uma rede SFN.

Como pode ser visto na Figura 8, as redes SFN são divididas em duas categorias: Distribuída ou por Repetição.

Tipo de SFN	Vantagens	Desvantagens
Distribuída	<ul style="list-style-type: none"> • Confiabilidade - Os transmissores operam de forma independente. • Sem limitação de potência. • Sem degradação da relação sinal ruído. • Permite delay = 0. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisa de um link para distribuição do BTS (STL).
Repetição	<ul style="list-style-type: none"> • Não há necessidade de STL para distribuir o conteúdo, desde que o sinal do transmissor principal possa ser recebido com qualidade mínima para repetição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se o transmissor principal falhar, todos os <i>gap filters</i> ficarão fora de operação. • Limitação da potência devido ao acoplamento da saída para a entrada. • Degradação da relação sinal ruído. • Delay Mínimo = Delay de trânsito.

© Fonte: HKL

Figura 8. Vantagens X desvantagens das SFNs Distribuídas e *Gap-Filler* [13].

O mesmo sinal BTS (*Broadcast Transport Stream*), que é o sinal de áudio, vídeo e informações que sai do estúdio para ser inserido na entrada do transmissor, é sincronizado nas diferentes estações considerando o tempo de propagação do mesmo até cada estação transmissora. Além da própria potência do transmissor, os seguintes fatores são levados em conta na configuração de uma SFN, em relação às áreas de intersecção de sinal [13].

- IG;
- Ajuste de Atraso (*delay*);
- Modo, ou seja, número de pontos da FFT.

O IG e o Modo especificam qual é área de máxima de intercessão em que a SFN consegue operar, enquanto o *delay* permite ajustar a área protegida pelo IG em que sinais sobrepostos resultam num ganho aditivo de potência, chamado de ganho SFN que pode chegar a 9 dB, a fim de posicioná-la na região em que o objetivo é fornecer o sinal com essa maior potência. Um exemplo desse tipo de aplicação é para uma região com uma alta concentração de telespectadores [13].

Sabendo que uma SFN distribuída é uma rede composta por dois ou mais transmissores transmitindo na mesma frequência o mesmo conteúdo de áudio, vídeo e informações, a distribuição da estação geradora para as estações transmissoras pode ser realizada por meio de duas formas principais:

- Enlaces de fibra óptica;
- Enlaces de micro-ondas;

A primeira forma não é utilizada no Brasil devido aos elevados custos que a tornam proibitiva. Os enlaces de micro-ondas apesarem de serem custosos e trabalhosos de serem implementados, são os *links* mais utilizados para retransmissão terrestre de TV no Brasil. O *link* de distribuição é chamado de STL (*Studio-to-Transmitter Link*). Dessa forma, o *link* ideal de distribuição SFN é utilizando o mesmo sinal que é transmitido na mesma frequência por uma estação

transmissora, de modo que as outras estações recebem esse sinal e o repetem, sem realizar nenhum outro processamento adicional. Essa forma é utilizada nas redes SFN por repetição, que são redes bastantes utilizadas em aplicações onde se deseja prover sinal em zonas de somreamento [12][13].

Nesse tipo de rede, os retransmissores são de baixa potência e são chamados de *Gap-fillers*. Esses equipamentos possuem um aprimoramento nos filtros de cancelamento de realimentação (LCF – *Loop Cancelation Filter*). Esses filtros fazem o cancelamento de realimentação da antena transmissora para a antena receptora, não causando assim uma saturação do receptor que está no mesmo ponto do transmissor, permitindo a transmissão e recepção em uma mesma coordenada [12][13].

6. SOLUÇÃO 1

Essa primeira solução consiste em utilizar os conceitos de um sistema LDM de duas camadas para implementar no ISDB-Tb, a transmissão simultânea de sinal em resolução *Full HD* e *UHD*, assim como foram feitos nos testes apresentados em [11].

A ideia é implementar a técnica LDM no sistema transmissor do ISDB-Tb, que é apresentado na forma de diagrama de blocos na Figura 9 a seguir.

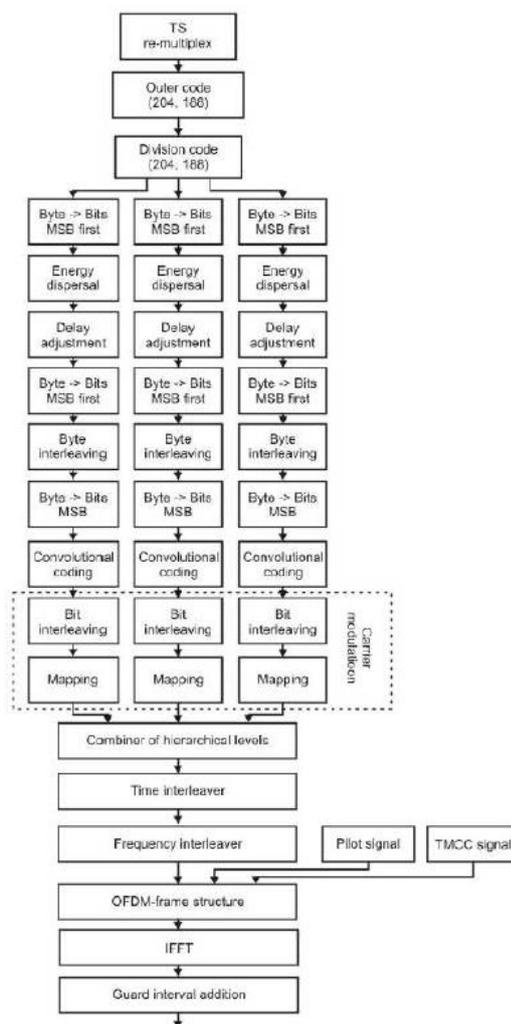


Figura 9. Subsistema transmissor ISDB-Tb [14].

Então, a UL será destinada a transmissão de sinal em *Full HD*, sendo esse o sinal que deve atingir a maior área de cobertura com níveis de potência acima do limiar de sensibilidade do receptor para fazer a recepção. Por outro lado, a LL será utilizada para transmissão de sinal em UHD, sendo esse o sinal com maior taxa de transmissão e atingindo uma área de cobertura reduzida.

Assim sendo, essa solução atinge grande parte das expectativas para a NG-DTV, provendo conteúdo em qualidade UHD utilizando a mesma largura de banda disponível e sem muitas modificações nos sistemas que já estão implementados em campo.

Essa implementação se torna a base indispensável para implementação da Solução 2 que será explicada logo em seguida.

7. SOLUÇÃO 2

Baseando-se na proposta que é apresentada em [6] de um *link* de distribuição em banda sem fio usando LDM para transmissores SFN e *Gap-fillers* no padrão ATSC 3.0, a segunda proposta desse trabalho consiste em analisar e apresentar uma implementação semelhante no ISDB-Tb.

Na primeira solução a ser apresentada nessa monografia, a proposta é utilizar um sistema LDM de duas camadas, como o discutido na Seção 4 para implementar um sistema ISDB-Tb usando LDM para prover serviço em diferentes qualidades de sinal.

Como já foi apresentado na Introdução, um dos pré-requisitos do sistema ISDB-Tb é prover conteúdo para recepção portátil e móvel sendo elas internas ou externas. Existem regiões em que se têm maior concentração de dispositivos móveis, como por exemplo, *Shoppings*, estádios, aeroportos, metrô, etc.

A mínima intensidade de campo transmitido necessário para alguns dos tipos de recepções comentadas anteriormente, conforme apresentado na Figura 10 a seguir, só é possível em regiões próximas a uma estação transmissora.

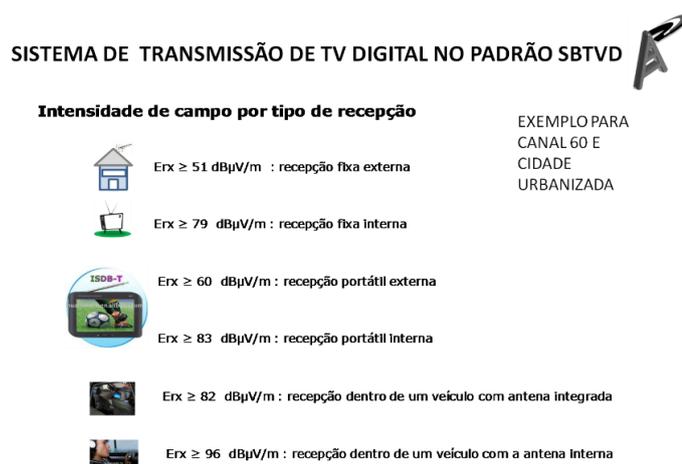


Figura 10. Exemplo de intensidade de campo por tipo de recepção para o SBTVD [15].

Essa última afirmação é baseada nas informações contidas na Figura 11, que traz dados reais da rede de televisão digital da EPTV em Campinas-SP.

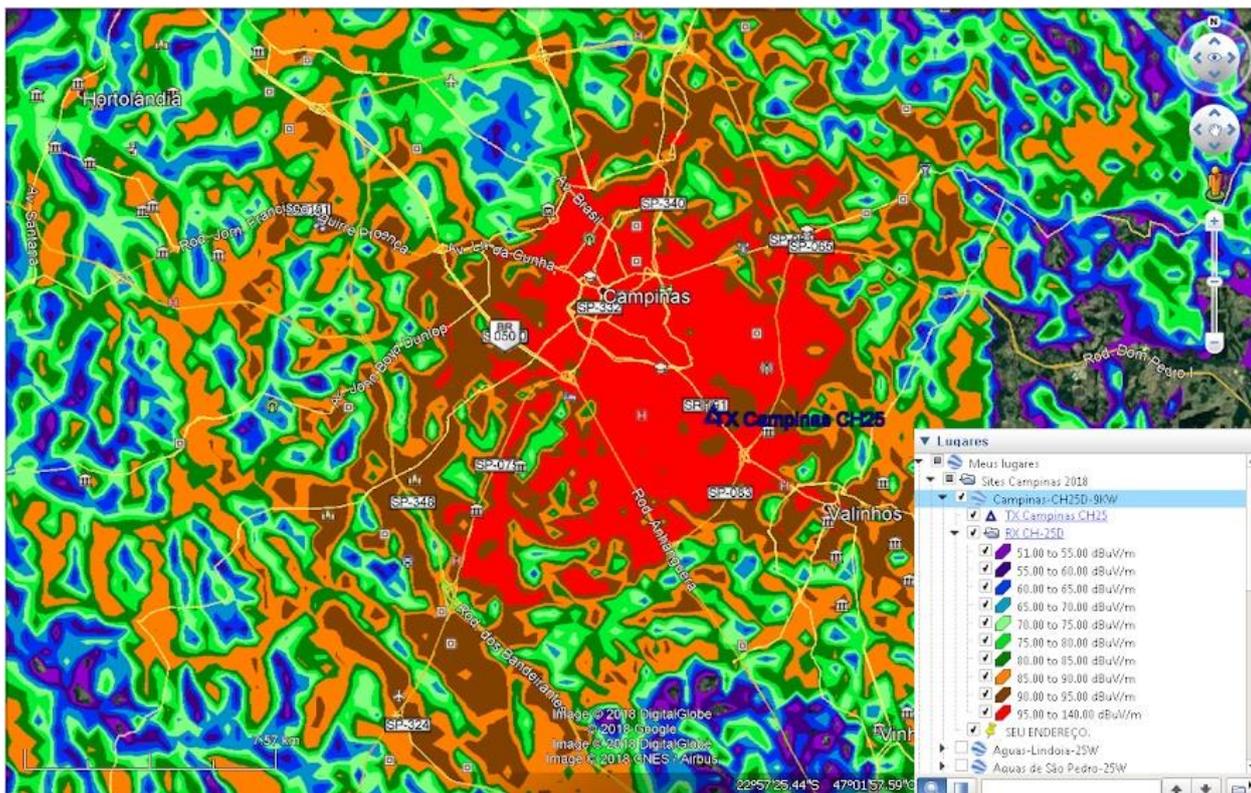


Figura 11. Intensidade de campo da rede de TV digital da EPTV Campinas.

Dessa forma, se em regiões com alta concentração de dispositivos móveis a mínima intensidade de campo não estiver disponível devido a grandes atenuações do sinal, a recepção portátil interna é afetada. Sendo que nessas regiões é que estão a maior possibilidade de público, de visualização de conteúdo e propagandas.

Partindo dessa problemática, a proposta é que uma porção de umas das camadas de um sistema LDM implementado na estação transmissora principal seja utilizada como *link* de distribuição em banda, para alimentação de estações retransmissoras de baixa potência nessas regiões estratégicas, em que se tem grande atenuação do sinal e intensidade de campo insuficiente para recepção portátil.

No sistema ISDB-Tb LDM de duas camadas proposto, a UL, que é camada LDM de maior potência e mais robusta é usada para entregar primordialmente sinal em *Full HD* para recepção fixa e portátil para os consumidores em uma área de cobertura maior, em que o sinal tem potência para a recepção desejada. Por outro lado, a LL, que é camada de menor potência é usada para transmitir sinal em UHD para recepção fixa e agora para transmitir dados do STL para os retransmissores SFN, podendo ser eles *Gap-fillers* ou qualquer outro tipo de retransmissor. Esses dados STL são recebidos pelos *Relay Receivers*, que os recuperam para passar pelos moduladores, que geram as formas de onda dos sinais para transmissão para os serviços móveis internos [6].

Na Figura 12, tem-se um diagrama que representa como são feitas as distribuições de sinal para o ATSC 3.0 da geradora para os retransmissores usando os enlaces já discutidos na Seção 5.

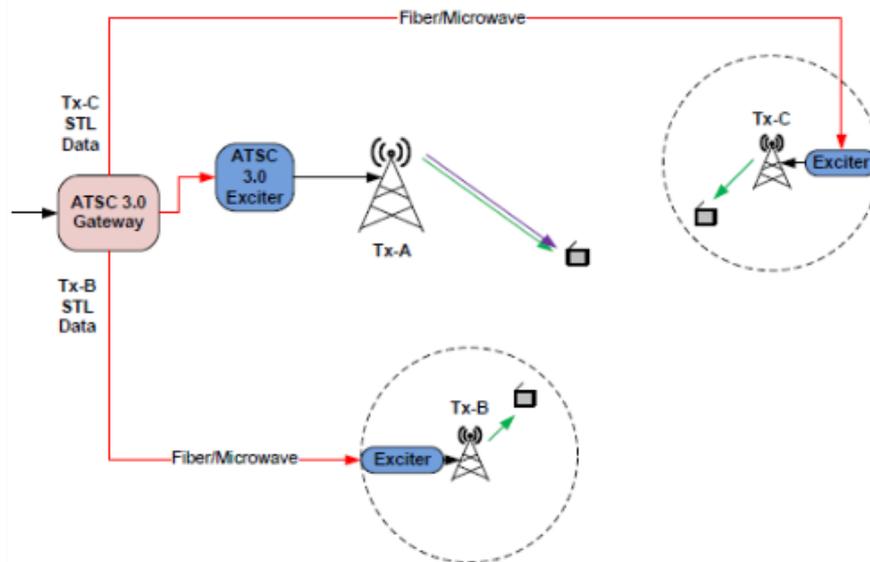


Figura 12. Sistema SFN ATSC 3.0 com *Gap-fillers* usando métodos convencionais de entrega [6].

Comparando com as informações apresentadas na Seção 5, é possível perceber que esse diagrama também representa da mesma forma o que é aplicado no sistema ISDB-Tb, quando são usadas redes SFN. Tem-se um transmissor principal de alta potência e retransmissores de baixa potência, cada um fornecendo sinal para uma região. O *Gateway* gera o sinal BTS e envia a cada transmissor via *link* de distribuição, juntamente com a correspondente sinalização de controle para operação dentro da rede SFN. Esses *links* são dedicados e no Brasil são em sua maioria um enlace de micro-ondas [6].

Como já foi dito, é uma forma de distribuição cara, considerando que só fornece sinal a dois retransmissores. Para isso, considerando um sistema ISDB-Tb LDM que já teria estrutura disponível no sistema de TV, segundo Solução 1, pode ser usado na mesma rede para implementar um *link* de distribuição em banda.

O conceito de um *link* de distribuição sem fio é mostrado na Figura 13 a seguir, para uma rede com os mesmos elementos da rede da Figura 12, sendo um transmissor de alta potência (Tx-A) e dois retransmissores de baixa potência (Tx-B e Tx-C).

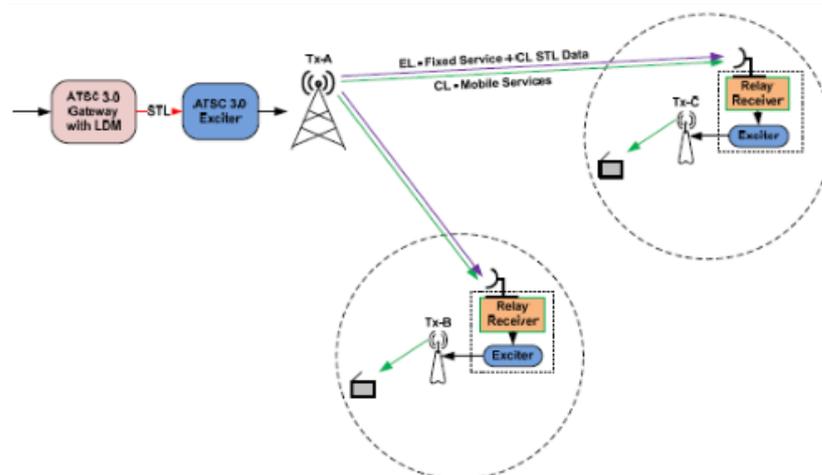


Figura 13. Sistema SFN ATSC 3.0 proposto com *Gap-fillers* usando a LL LDM como *link* sem fio de distribuição em banda para serviços móveis [6].

Nessa última configuração, os dados STL são enviados pelo *Gateway* ao Tx-A via *link* de distribuição cabeado. Em seguida, esses dados são encapsulados na LL (representada por EL na Figura 13) e enviados aos retransmissores usando o mesmo canal de TV dos outros sinais emitidos pelo Tx-A. Em cada retransmissor, o *Relay Receiver* decodifica os dados STL contidos na LL, para posterior geração e transmissão da forma de onda para serviço móvel somente. É importante salientar que somente o Tx-A, que é o transmissor de alta potência emite os sinais da UL (representada por CL na Figura 13), e que também os outros tipos de serviços nas camadas LDM continuam sendo oferecidos, assim como os serviços apresentados na Solução 1. Os retransmissores emitem somente os sinais destinados ao serviço móvel [6].

O espectro do sinal LDM com o *link* de distribuição integrado na LL é mostrado na Figura 14. A UL mantém sua função de prover sinal para recepção em *Full HD* para recepção móvel e portátil. Enquanto, parte da capacidade da LL é usada para entregar dados STL aos múltiplos retransmissores SFN, e a outra parte restante é usada para entregar serviço em qualidade UHD para recepção fixa.

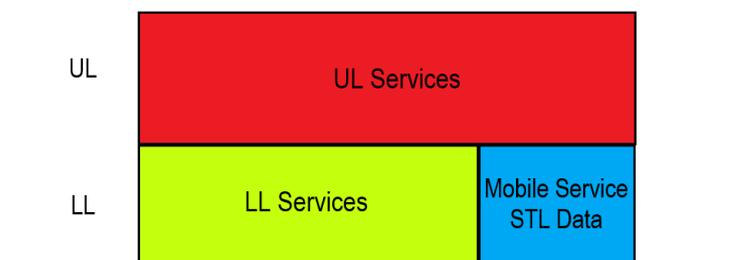


Figura 14. Espectro do sinal LDM de duas camadas com *link* de distribuição sem fio em banda.

Resultados de testes apresentados em [6] mostram que aproximadamente 5% da capacidade de canal da LL é requisitada para implementação do *link* de distribuição, isso quando os *Relay-Receivers* operam em condições favoráveis e modulação 1k-QAM é usada com codificação LDPC de taxa 13/15.

Comparado aos métodos tradicionais de distribuição de sinal para retransmissores SFN, o método proposto apresenta as seguintes vantagens [6]:

- Baixo custo de implementação quando comparados aos links de micro-ondas e fibra óptica;
- Maior disponibilidade de links de distribuição, uma vez que essa implementação é mais fácil de ser feita;
- Não há necessidade de espectro adicional;
- Completamente compatível com o ISDB-Tb.

8. SISTEMA ISDB-Tb LDM MODIFICADO

Um sistema ISDB-Tb, como o apresentado na Figura 9, é um sistema muito robusto e poderoso projetado para combater todos os tipos de interferência e degradações típicas de canal, que influenciam quando o sistema é implementado em campo. Para isso, como pode ser observado, o sistema conta com quatro tipos de entrelaçadores.

De acordo com os objetivos e com as propostas desse trabalho de conclusão de curso, que é mostrar a aplicabilidade da técnica LDM no padrão brasileiro de

DTV, de modo que os soluções previamente apresentadas se comprovem realmente como soluções aplicáveis e vantajosas para a NG-DTV, a implementação do sistema ISDB-Tb completo em toda sua robustez em *software*, não se faz necessária. Tal implementação estenderia muito o tempo de desenvolvimento desse trabalho sem a real necessidade, uma vez que se trata somente de uma simulação de um estudo e não uma implementação em campo.

Então, tomando como base o subsistema transmissor completo ISDB-Tb da Figura 9, foi estudada a retirada de alguns blocos de processamento, de modo que o subsistema transmissor desenvolvido a ser implementado não se tornasse ineficiente e não funcional.

Sobre o subsistema receptor, como pode-se perceber não se tem um diagrama a ser seguido, dessa forma, o mesmo foi desenvolvido baseado no processamento inverso dos blocos do transmissor e utilizando os conceitos sobre como fazer a recepção de um sinal LDM. Ambos os subsistemas serão explicados detalhadamente no subtópicos seguintes.

8.1. Transmissor

De acordo com os conceitos sobre um sistema LDM, o diagrama de blocos do subsistema transmissor modificado é apresentado na Figura 15 a seguir.

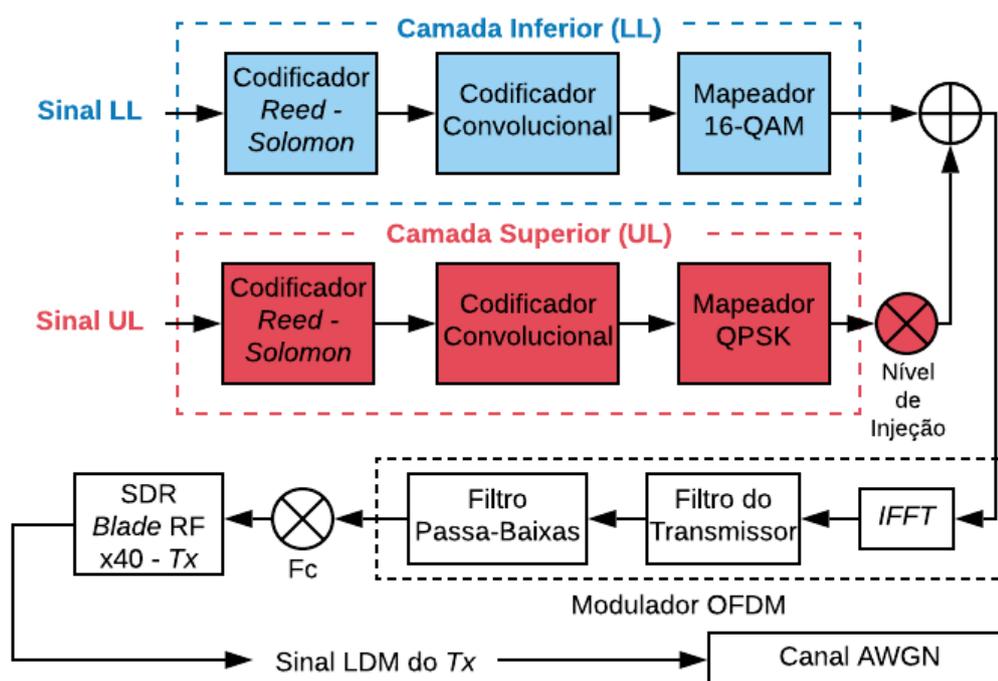


Figura 15. Transmissor ISDB-Tb LDM.

Começando pelas fontes de dados que geram os sinais a serem inseridos nas entradas dos transmissores, os sinais UL e LL são sinais *BTS*, sendo para a Solução 1, sinais de áudio, vídeo e informações em UHD (sinal LL) e *Full HD* (sinal UL). Para a Solução 2 são os mesmos sinais, porém na LL tem-se uma porção da camada destinada aos dados STL do sinal da UL.

Esses fluxos de dados da UL e da LL são inseridos cada um em sua respectiva entrada no transmissor ISDB-Tb, e eles possuem uma taxa de bits constante que

depende diretamente da largura de banda para transmissão e da frequência de amostragem da IFFT [4].

O fluxo de bits da fonte é dividido em Pacotes de Fluxos de Transporte (*TSP – Transport Stream Packet*) de 204 bytes, onde 188 bytes são informação de áudio e vídeo, e os restantes 16 bytes são informações para o modulador, como cabeçalho, e dados nulos [4].

Nesse sistema, dois sinais diferentes são transmitidos simultaneamente. Esses sinais são originados em fontes diferentes, sendo uma fonte que gera o sinal da LL de acordo com os serviços que ela oferece, e uma fonte que gera da UL.

De acordo com a cadeia de processamento apresentada na Figura 9, cada uma das 3 camadas hierárquicas do ISDB-Tb é processada de forma independente, o que significa que é necessário um processo de filtragem para direcionar corretamente os TSP's, uma vez que os mesmos possuem em seu cabeçalho a informação de qual camada pertencem. Em relação a essas camadas hierárquicas, na concepção desse sistema modificado somente uma camada é usada, ou seja, tem-se somente uma camada que tem a largura de banda igual à toda largura de banda total disponível. O processo de filtragem por sua vez não é necessário uma vez que os TSP's pertencem a uma camada somente [4].

Essa mudança foi feita pois não seria viável para a simulação repetir os mesmos blocos de processamento para as outras camadas hierárquicas, se a análise pode ser feita somente para uma camada, sem nenhuma implicação.

Seguindo com a explicação dos módulos, assim que os sinais da UL e da LL entram na entrada do transmissor, eles passam pelos codificadores *Reed-Solomon*. Esse codificador, comumente chamado de codificador externo por ficar mais externo a cadeia de processamento, realiza uma codificação de blocos usando o algoritmo *Reed-Solomon*, que é um código de correção de erros capaz de corrigir erros aleatórios e erros em rajadas [4].

Esse código é genericamente definido da forma $RS(n, k, t)$, onde n é o tamanho da palavra codificada na saída, k é o tamanho da mensagem de entrada, e t é a capacidade de correção de erros, que é $(n-k)/2$, e que pode ser omitida por estar diretamente relacionada com n e k [4].

De acordo com o padrão, esse código deve ser um código RS (204,188), que é um código RS (255, 239) encurtado em 51 bytes. A capacidade de correção é de erros em até 8 símbolos [4].

Na sequência, o Codificador Convolutivo realiza a codificação e ainda exclui alguns dados de forma sistemática em sua saída. Esse código, que é especificado pelo tamanho da palavra de entrada n , pelo tamanho da palavra de informação k , e pelos polinômios geradores, tem nesse trabalho uma taxa de codificação de 2/3 para ambos os codificadores convolucionais [4].

A taxa de codificação é obtida por meio da multiplicação da taxa de codificação original (1/2), também chamada de taxa mãe de codificação, pela taxa de punção (4/3). A taxa de codificação pode ser ajustada por meio da técnica de punção, que exclui dados de forma sistemática na saída respeitando o padrão de punção, de acordo com a Tabela 1. No padrão de punção onde tem-se 1, o bit de informação é transmitido, e onde tem-se 0 é descartado, dando origem à sequência de transmissão do sinal [4][14].

Na próxima etapa, os fluxos de bits são convertidos em símbolos complexos, e conseqüentemente em dois novos sinais, em fase (*I – In-phase*) e em Quadratura (*Q – Quadrature*). Essa conversão é feita pelos mapeadores que convertem um

número de bits de acordo com a ordem do mapeamento, em um ponto de uma constelação, dando origem a um símbolo complexo.

Focando em atingir altas taxas de transmissão, a porção do sinal da LL destinado a transmissão do conteúdo em UHD, precisa ser mapeada em uma constelação de alta ordem. Em sistemas reais, esse sinal da LL pode ser mapeado em constelações 64-QAM ou 256-QAM de acordo com o serviço a ser oferecido [4].

Taxa de Codificação	Padrão de Puncionamento	Sequência de Sinal de Transmissão
$\frac{1}{2}$	X: 1 Y: 1	X1, Y1
$\frac{2}{3}$	X: 1 0 Y: 1 1	X1, Y1, Y2
$\frac{3}{4}$	X: 1 0 1 Y: 1 1 0	X1, Y1, Y2, X3
$\frac{5}{6}$	X: 1 0 1 0 1 Y: 1 1 0 1 0	X1, Y1, Y2, X3, Y4, X5
$\frac{7}{8}$	X: 1 0 0 0 1 0 1 Y: 1 1 1 1 0 1 0	X1, Y1, Y2, Y3, Y4, X5, Y6, X7

Tabela 1. Taxa de codificação e padrão de puncionamento (Adaptado de [14]).

Como o escopo desse trabalho envolve simulação somente, o sinal da LL foi mapeado em 16-QAM.

Por outro lado, o sinal da UL, cujo requisito é ter maior imunidade às degradações típicas de canal para que o sinal irradiado possa atingir uma extensa área de cobertura, precisa ser mapeado em uma constelação de menor ordem. Devido a isso, ele foi mapeado em QPSK.

Para cada mapeamento que foi utilizado existe uma normalização com o intuito de controlar as amplitudes de tensão e corrente, e essas informações estão disponíveis na Tabela 2 a seguir.

Bit [0], Bit [1]	Amplitude (I)	Amplitude (Q)
0, 0	+1	+1
0, 1	+1	-1
1, 0	-1	+1
1, 1	-1	-1

Tabela 2. Níveis I e Q (Adaptado de [4]).

Existe também um fator de normalização, que faz com que a potência do sinal a ser transmitido seja sempre a mesma para qualquer mapeamento, e essas informações estão disponíveis na Tabela 3 a seguir.

Esquema de modulação de portadora	Fator de Normalização
DQPSK e QPSK	$Z/\sqrt{2}$
16QAM	$Z/\sqrt{10}$
64QAM	$Z/\sqrt{42}$

Tabela 3. Fator de normalização para QPSK e QAM (Adaptado de [14]).

Depois de realizada a normalização de potência para os dois sinais, os símbolos complexos na saída do mapeador QPSK são multiplicados por um nível de injeção, conforme especificado na técnica LDM, para posteriormente serem somados com os símbolos que saíram do mapeador 16-QAM. O nível de injeção

utilizado nesse projeto resultou em uma separação de 3 dB entre as camadas LDM.

Na sequência, é feita a soma dos símbolos complexos QPSK com os símbolos 16-QAM, para posteriormente serem distribuídos dentro da banda de transmissão disponível por meio do uso da técnica de modulação OFDM.

Essa técnica surgiu como uma evolução da técnica convencional de FDM, usando agora o conceito de sobreposição espectral de subportadoras [16].

A técnica OFDM, que embora apresente o termo multiplexação em sua denominação não realiza nenhum tipo de multiplexação. Ela consiste na transmissão paralela de dados, antes sequenciais, em subportadoras com modulação de portadora única como QAM ou PSK, e taxas de transmissão tão baixas quanto maior o número destas empregadas [16][17].

Para permitir o uso da sobreposição espectral de portadoras moduladas, conforme as visualizadas na Figura 16 a seguir, onde T é a duração de um símbolo complexo, sem introduzir interferências entre subportadoras, é necessário que exista a relação de ortogonalidade entre as mesmas [16][17].

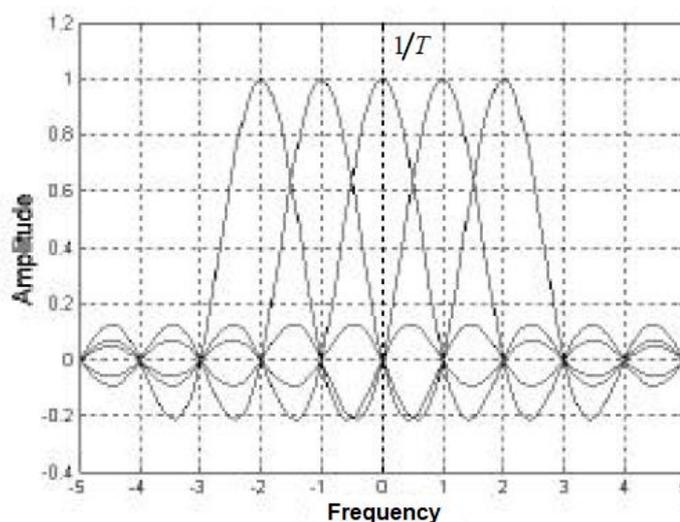


Figura 16. Subportadoras de um sinal OFDM (Frequência normalizada em relação ao valor $1/T$) [17].

A relação de ortogonalidade pode ser obtida com diversos valores de espaçamento entre as subportadoras, e o que deve ser garantido é que cada subportadora esteja localizada em pontos de cruzamento em zero do espectro das demais.

A largura de banda dos subcanais de um sistema OFDM é obtida por meio da divisão da largura de banda total disponível ao sistema pelo número de subportadoras empregadas. Trabalhar com subcanais mais estreitos, ou seja, aumentar a duração dos subsímbolos complexos transmitidos em cada subportadora, ao invés de um canal mais largo traz um grande benefício em relação a sensibilidade em frequência (dispersão no tempo), causada por multipercurso [16].

Os símbolos complexos que resultaram da soma, precisam agora ser convertidos para o domínio temporal e deslocados para uma frequência em VHF ou UHF, para posterior difusão do sinal. Esse processamento é feito pelo modulador OFDM, conforme pode ser visualizado na Figura 17, da entrada de símbolos complexos na IFFT até a geração do sinal OFDM.

Para a construção do modulador desse projeto, como não teve a necessidade de se enviar portadoras piloto e sinais de controle e sinalização, o processo de estruturação de quadro OFDM que é feito em sistemas reais não foi implementado.

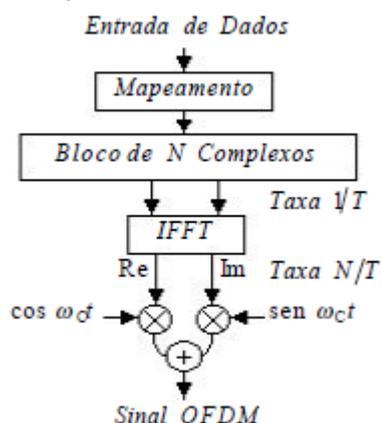


Figura 17. Transmissão com modulação adicional [16].

Assim sendo, cada símbolo complexo modulou uma subportadora complexa OFDM.

No processo de modulação OFDM, a IFFT é aplicada em um bloco de N subsímbolos complexos resultando em N subportadoras espaçadas ortogonalmente na saída. O espaçamento entre duas subportadoras ortogonais adjacentes é igual ao inverso do tempo de um símbolo OFDM [16].

A configuração da IFFT, ou seja, o número de pontos da IFFT, pode ser dividido em três modos para a frequência de amostragem de 8126984 Hz, tendo cada modo, um número específico de subportadoras que contém informação útil. Os parâmetros da IFFT para a dada frequência de amostragem, podem ser visualizados na Tabela 4 a seguir [14].

Frequência de amostragem	8126984 Hz
Número de pontos para Modo 1	2048
Número de pontos para Modo 2	4096
Número de pontos para Modo 3	8192

Tabela 4. Parâmetros da IFFT (Adaptado de [14]).

Na síntese desse modulador, o Modo 1 poderia ter sido utilizado para as simulações, porém o Modo 2 foi utilizado para facilitar a centralização do espectro em torno da frequência de portadora.

Depois de aplicada a IFFT em um vetor de N subsímbolos complexos, tem-se um sinal onde a informação a ser transmitida está presente tanto na parte real quanto na parte imaginária. Então, por questões óbvias somente a parte real será transmitida nas etapas finais.

Para a translação para a frequência de portadora ω_c em RF, todas as subportadoras complexas são separadas em parte real e imaginária, e a parte real é multiplicada por um cosseno e a imaginária por um seno de mesma frequência. Em seguida, as duas partes voltam a formar uma subportadora complexa novamente, e o bloco dessas N subportadoras formam um símbolo OFDM, que são transmitidas simultaneamente por uma duração de tempo determinada pela duração do símbolo OFDM.

Um conceito importante é que caso N não seja uma potência de 2, a técnica *Zero Padding*, que insere subsímbolos complexos nulos que são associados a

portadoras inativas, é geralmente utilizada para inseri-los na parte central na ordenação dos pontos da IFFT [16].

Usando essa técnica, ao sinal de informação são adicionados zeros que permitem alcançar uma sobreamostragem de duas vezes para centralizar o espectro [16].

O uso da técnica anteriormente descrita tem vantagens significativas, como por exemplo o uso do algoritmo IFFT mais comum, que é o algoritmo *butterfly*, e que se baseia em sequências com comprimento potência de 2 [16].

Para centralizar o espectro em torno da frequência portadora foi utilizado uma IFFT de tamanho $2N$ e $T/2$ como período elementar. Esse tempo de símbolo OFDM é especificado para uma IFFT de 2048 pontos (Modo 1), mas uma IFFT de 4096 pontos foi usada, conforme explicado anteriormente.

O sinal no domínio do tempo na saída do modulador OFDM é transladado para a frequência de 2,8035 GHz, que é a frequência de portadora da antena utilizada.

Então, este sinal UHF é enviado para o hardware SDR para ser transmitido pelo ar.

8.2. Receptor

No sistema receptor, o processamento reverso ao do transmissor é feito, como mostrado no diagrama de blocos da Figura 18.

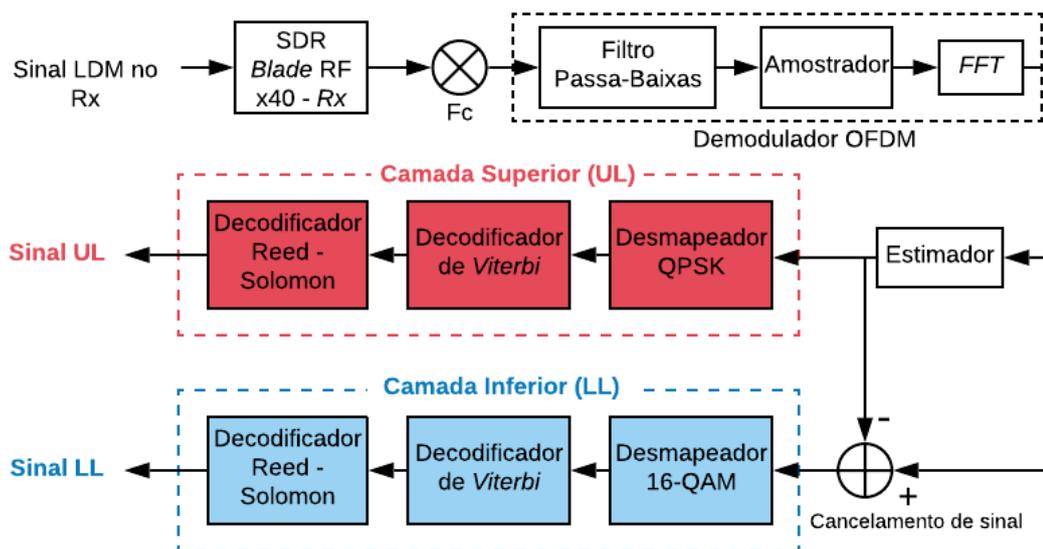


Figura 18. Receptor ISDB-Tb LDM.

No receptor LDM de duas camadas, o processo de aquisição do sinal é o mesmo para ambas as camadas, porque somente um sinal é transmitido e recebido. Cada camada tem seu próprio desmapeador e módulos de decodificação de canal, que são definidos de acordo com as configurações usadas no processo de transmissão.

A diferença entre um receptor ISDB-Tb convencional e um receptor ISDB-Tb LDM é o processamento feito depois do demodulador OFDM, que separa os sinais da UL e LL do sinal LDM combinado.

Um dos módulos responsáveis por fazer essa separação é chamada de Estimador, e ele é derivado do conceito de *Cloud Transmission* introduzido anteriormente.

A função do bloco estimador é receber o sinal LDM, que é nada mais que subsímbolos complexos que representam a informação das duas camadas LDM, da saída do demodulador, e desses símbolos obter os símbolos complexos da UL, que seguem para posterior desmapeamento e decodificação.

O processo de estimação é feito símbolo a símbolo, baseado em tomadas de decisão a respeito do quadrante em que se encontra o símbolo na constelação, e na saída do bloco estimador tem-se os símbolos QPSK da UL, que seguem para os processamentos finais.

Os símbolos complexos da UL são subtraídos dos símbolos complexos da saída do demodulador, que é o sinal LDM recebido e demodulado, dando origem ao chamado processo de cancelamento de sinal.

Os subsímbolos complexos resultantes que são da LL seguem para desmapeamento e decodificação, reconstruindo a informação original que foi inserida na entrada do transmissor.

9. MATERIAIS

As duas soluções, que compõem a parte teórica dessa monografia, foram desenvolvidas com base em artigos do IEEE que se encontram disponíveis nas Referências Bibliográficas.

A implementação do sistema ISDB-Tb LDM modificado, que compõe a parte prática e experimental, foi feita utilizando os recursos que serão apresentados nos subtópicos seguintes.

9.1. Setup do laboratório

Na Figura 19 pode ser visualizada a configuração dos equipamentos utilizados no Laboratório de RF na Faculdade de Tecnologia da UNICAMP.

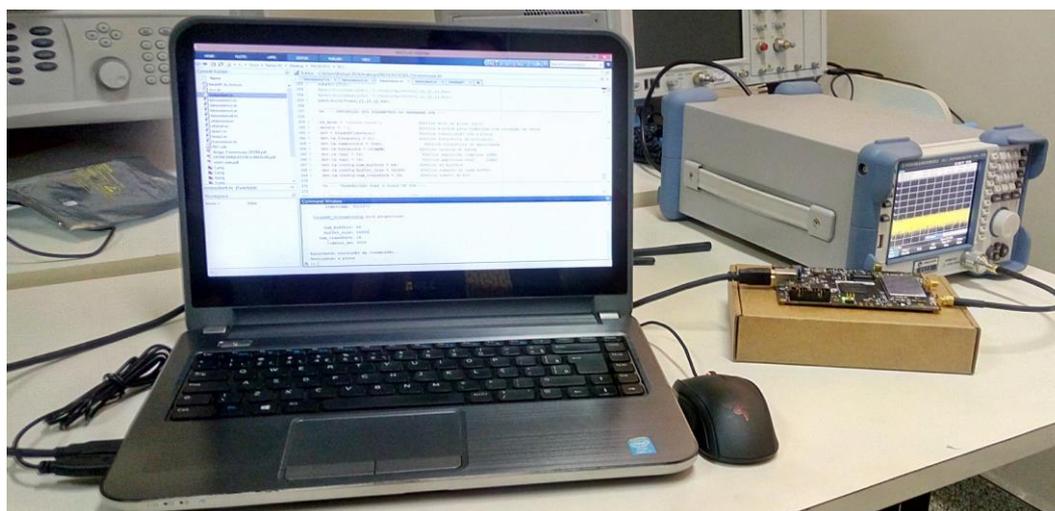


Figura 19. Setup do laboratório para os testes de transmissão e recepção.

Como já dito anteriormente, todo o processamento digital de sinais foi feito via MATLAB utilizando um computador. Para isso, utilizei meu *notebook* pessoal que possui as seguintes especificações técnicas:

- Fabricante: DELL;
- Modelo: Inspiron 5437;
- Processador: Intel Core i7-4500U de 1.80GHz;
- Memória RAM de 8 GB;
- SSD de 480 GB;
- Sistema operacional: Windows 8.1 – 64 bits;
- Software MATLAB R2016a instalado com a *Communications System Toolbox* e a biblioteca *libbladeRF*;
- Software para Windows da placa Blade RFx40;

Para aferição de níveis de potência recebidos e consequente densidade espectral de potência, foi utilizado o analisador de espectro *Rohde & Schwarz FSC 3*, que possui um *range* de frequência de trabalho que vai de 9 kHz à 3 GHz.

9.2. Software MATLAB R2016a

O *software* MATLAB, cuja nomenclatura vem de *MATrix LABORatory*, é um *software* matemático interativo e de alta performance voltado para o cálculo numérico. O elemento mais básico de informação do MATLAB é uma matriz, e todas as operações são feitas com elementos dessa categoria.

Partindo dessas estruturas mais básicas aliada a uma programação simples, esse *software* é utilizado em inúmeras áreas, e suas aplicações são dos mais diversos tipos. Para isso, o programa dispõe de diversas extensões, que são os chamados *toolboxes*, que adicionam funcionalidades ao programa, e além disso é possível encontrar muitas referências sobre o mesmo.

Para o desenvolvimento do sistema proposto nesse projeto foi utilizada a *Communications System Toolbox*, que por meio de funções específicas para simulação fim a fim de sistemas de comunicação, possibilitou o desenvolvimento de forma muito mais eficiente [18].

9.3. Plataforma SDR

Uma definição simples de plataforma SDR é feita pelo *SDR Forum* e o IEEE, que definem a tecnologia de Rádio Definido por Software como um sistema de rádio onde todas ou algumas funções de camada física são definidas por software [19].

As primeiras aplicações de SDR foram feitas pelos militares dos EUA, cujo objetivo era garantir a interoperabilidade dos rádios militares com os rádios de outras agências governamentais, como por exemplo, a Polícia [20].

Dessa forma, o processo de transição foi do Rádio Definido por Hardware (HDR – *Hardware Defined Radio*), que eram limitados no quesito de alteração de funcionalidade, para os SDR. Os sistemas SDR são flexíveis e eficientes, uma vez que as funcionalidades de camada física de processamento são implementadas por meio de um *software* ou *firmware* modificável sobre uma tecnologia de processamento digital de sinais programável, como por exemplo, FPGA [19][20].

Uma plataforma SDR é especificada pelas especificações e funcionalidades de seu *hardware* e pelos *softwares* de programação, que fazem a integração com o *hardware* de forma transparente, ou seja, o desenvolvedor só se preocupa com sua aplicação [4].

Em relação à plataforma SDR que seria adotada, primeiramente foi feito um estudo sobre as opções de placas disponíveis no mercado compatíveis com o que seria desenvolvido. A que apresentou melhor relação custo – benefício foi a *bladeRF x40*, da fabricante americana *Nuand*, que pode ser visualizada na Figura 20 a seguir.



Figura 20. Placa *Nuand bladeRF x40* [21].

As opções de *software* dessa plataforma são MATLAB e Simulink, por meio da biblioteca *libbladeRF*, e GNU Radio, por meio do módulo *gr-osmosdr* [22].

Sobre as especificações de *hardware*, a placa *bladeRF x40* é capaz de operar de 300 MHz até 3.8 GHz, e vem com uma antena cuja frequência de operação é 2,8 GHz [22].

Suas principais especificações relevantes para o trabalho são [22]:

- *Full-duplex* com amostragem de 40 MSPS (*Mega Samples Per Second*) e amostras IQ de 12 bits;
- *Clock* flexível para poder trabalhar com taxas de amostragem arbitrárias;
- *Shields* que podem ser usadas para ajustar a sensibilidade e isolamento do sistema;
- Comunicação via porta GPIO (*Expansion Board*);
- Porta de comunicação USB 3.0;
- Conectores banhados a ouro;
- Terminais RX e TX independentes;
- Canais *full-duplex* de 28 MHz;
- Conversor digital para analógico (DAC) de 16 bits;
- Tecnologia ARM9 de 200MHz com 512kb de SRAM embarcada;
- Altera *Cyclone 4 E* FPGA;
- Capacidade de atuar como MIMO 2x2 configurável por cabo SMB, expansível para 4x4;
- Aceita expansão para aumentar o range de frequência de trabalho.

10. METODOLOGIA

Para apresentar as soluções e o sistema ISDB-Tb LDM modificado foi necessário um estudo completo de todos os módulos que compõem um sistema ISDB-Tb, e suas especificações.

Como a LDM é uma tecnologia recente, foi necessário também analisar e estudar tudo sobre LDM, ganhos, mudanças, etc. Por ser uma tecnologia recente, não se encontrou disponível um grande número de referências, devido a isso por exemplo, o desenvolvimento do receptor foi uma das tarefas desafiadoras, e para solucioná-la foi necessário voltar aos conceitos de *Cloud Transmission*.

Foi analisada a possibilidade de desenvolvimento do sistema em GNU Radio, por ser uma ferramenta *open-source* e teoricamente mais fácil de programar. Porém, o que foi concluído é que os blocos de DTV padrão teriam que ser todos alterados para a implementação desse projeto, o que aumentaria o tempo de desenvolvimento e a complexidade do projeto para além do planejado.

Sendo assim, como se tinha domínio da programação em MATLAB, e compatibilidade da plataforma SDR, a estratégia foi implementar em MATLAB. Com isso, foram estudados exemplos mais simples tanto usando a plataforma SDR, como usando a *Communications System Toolbox*.

Antes de qualquer teste utilizando a placa SDR, o sistema foi testado e modificado várias vezes até que funcionasse perfeitamente no MATLAB. Depois disso, testou-se o sistema no Laboratório de Radiofrequência da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, até que os resultados dos testes fossem satisfatórios.

Então, na Seção 11 seguinte são apresentados os resultados dos testes e os mesmos são discutidos e analisados.

11. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na implementação do sistema ISDB-Tb LDM modificado apresentado nas Figuras 15 e 18, grande parte dos módulos foram desenvolvidos utilizando as funções e ferramentas disponíveis na *Communications System Toolbox* do *software* MATLAB. Então, elas serão apresentadas no decorrer desta seção, assim como as funções da biblioteca *libbladeRF* que são utilizadas para comunicação do MATLAB com a placa de SDR.

Primeiramente no subsistema transmissor, os codificadores *Reed-Solomon* e convolucionais foram sintetizados usando as funções *comm.RSEncoder* e *comm.ConvolutionalEncoder*, respectivamente. Na entrada dos codificadores externos, as fontes de dados de ambas as camadas LDM, são geradores aleatórios de bits implementados por meio da função *randi*.

Os objetos mapeadores foram criados usando as funções *comm.RectangularQAMModulator* e *comm.QPSKModulator*, e os sinais LDM da UL e LL após o mapeamento podem ser vistos nas constelações das Figuras 21 e 22, respectivamente.

Os símbolos complexos da UL são multiplicados por uma variável real de valor igual 2, que faz a função do nível de injeção, resultando na separação de 3 dB entre as camadas LDM. Em seguida, todos os símbolos sofrem um ganho de amplitude para tornar o processo de demodulação mais eficiente, e os símbolos da UL são somados símbolo a símbolo com os símbolos da LL, resultando no sinal LDM não modulado. A constelação LDM pode ser vista na Figura 23.

Ao vetor que representa o sinal LDM foram adicionados símbolos nulos por meio da técnica *Zero Padding*, para ajudar na centralização do espectro.

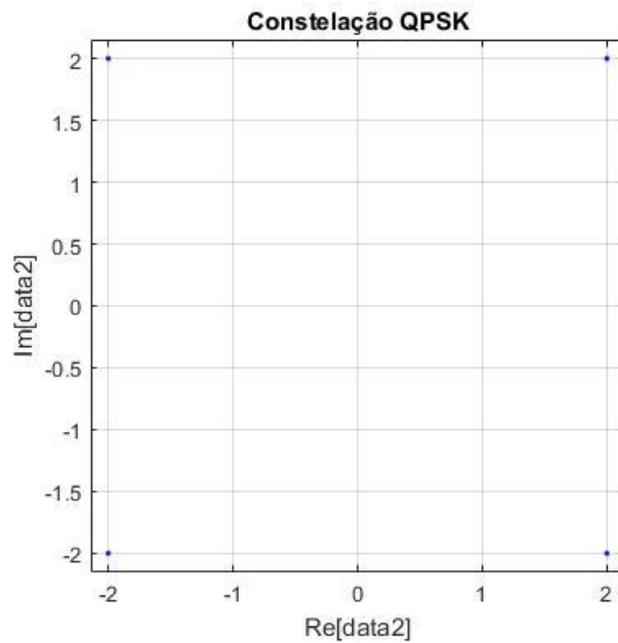


Figura 21. Constelação QPSK do sinal da UL após o mapeamento.

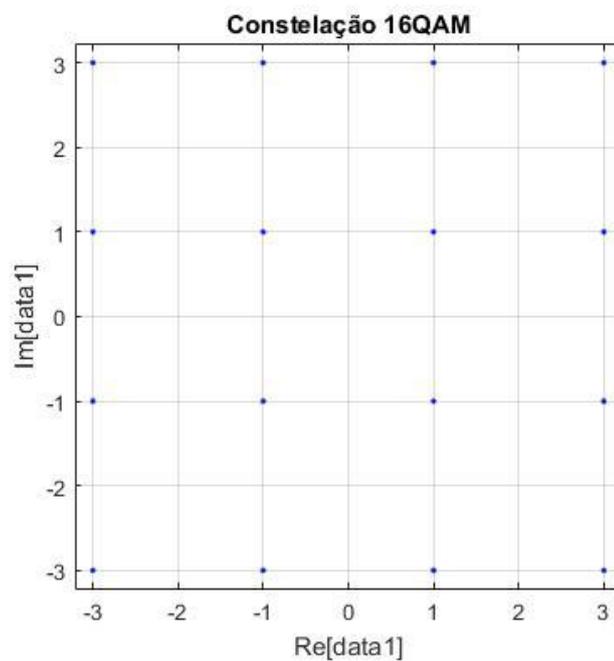


Figura 22. Constelação 16-QAM do sinal da LL após o mapeamento.

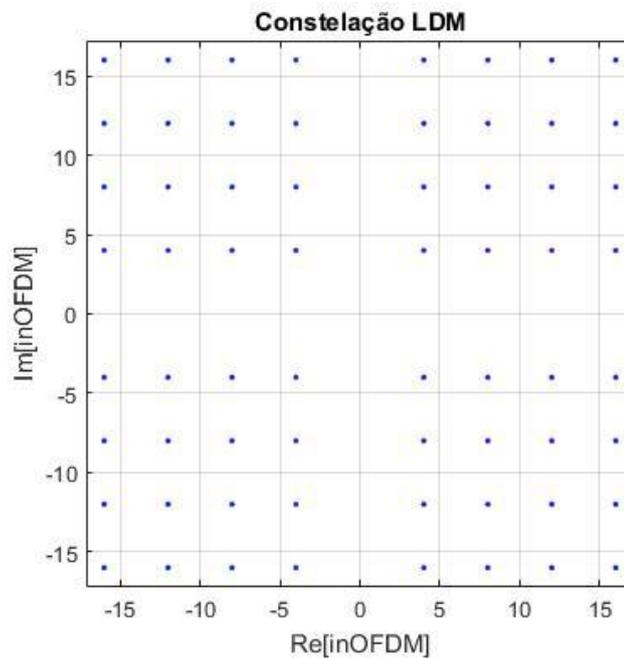


Figura 23. Constelação LDM na entrada do modulador OFDM.

Para o desenvolvimento do modulador OFDM, o código apresentado em [23] foi usado como referência. Então, depois de aplicada a IFFT ao sinal LDM, feita a conversão digital-analógica necessária, feita a filtragem de reconstrução D/A utilizando um filtro com fator de *roll-off* bem pequeno para evitar o efeito de *aliasing*, o sinal LDM modulado pode ser visto na Figura 24 a seguir, tanto a parte real quanto a parte imaginária.

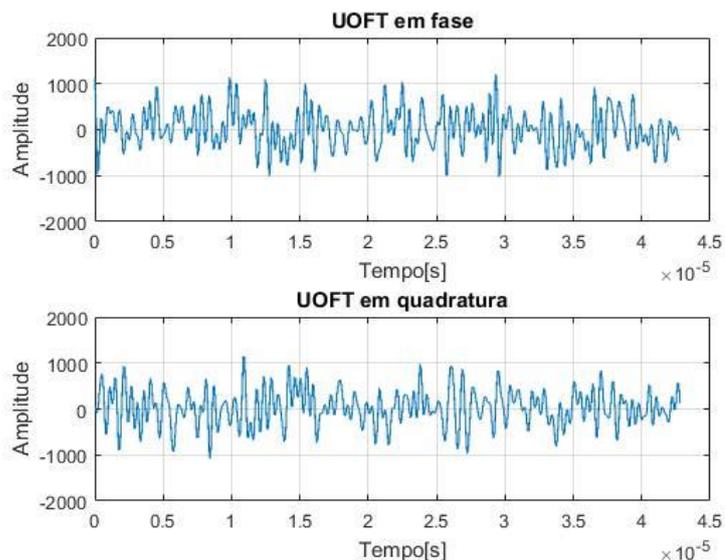


Figura 24. Resposta no tempo do sinal LDM modulado.

Na sequência é feita o translado desse sinal modulado em banda base para a frequência de portadora ωc de 2,8 GHz, e transmitida somente a parte real, como já foi explicado anteriormente. Como resultado, o sinal LDM na saída do modulador

e translado em frequência pode ser visto na Figura 25 no domínio temporal e a Densidade Espectral de Potência (PSD – *Power Spectral Density*) na Figura 26.

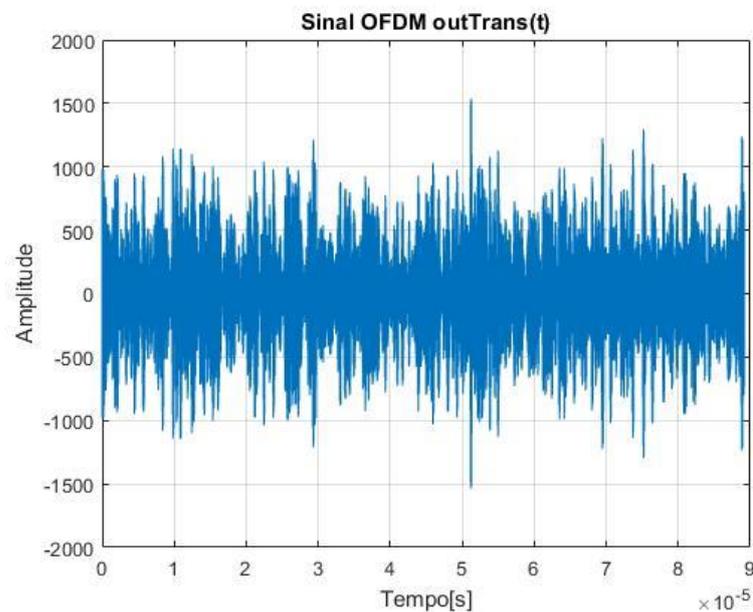


Figura 25. Resposta no tempo do sinal após a conversão para RF.

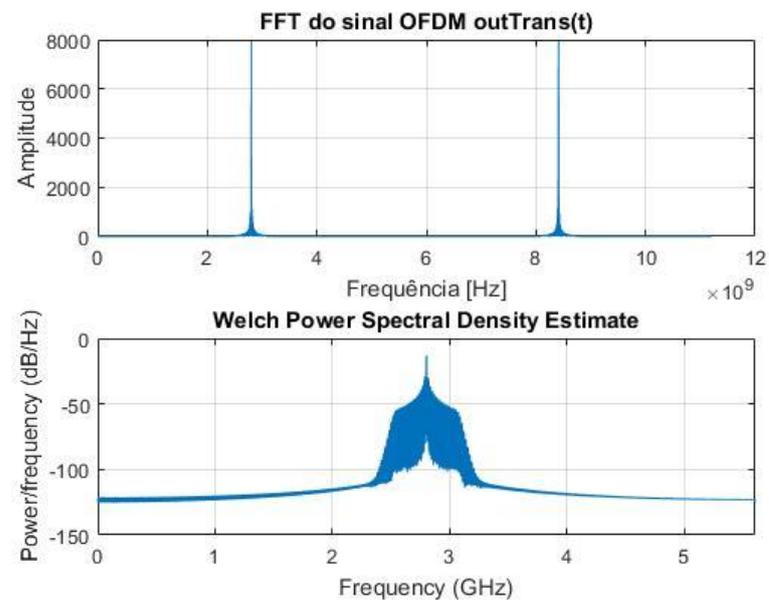


Figura 26. Resposta no tempo e densidade espectral de potência do sinal após a conversão para RF.

A ampliação da PSD na Figura 26 em torno de 2,8 GHz, resulta na banda de transmissão do sinal OFDM de aproximadamente 5 MHz, mostrada na Figura 27 abaixo.

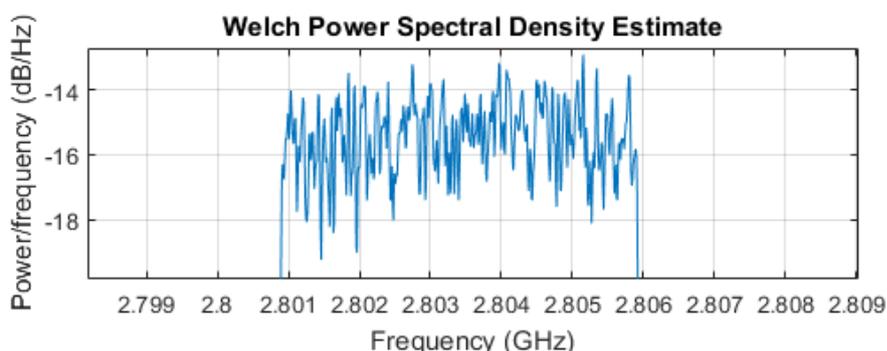


Figura 27. Banda de transmissão OFDM do sinal LDM.

Agora que o sinal LDM foi modulado e convertido para RF, ele está pronto para transmissão pela placa SDR. Dessa forma, nessa etapa é necessário fazer a configuração de alguns parâmetros principais da placa para que ela possa fazer a transmissão. Todas as funções e variáveis relativas à placa são da biblioteca *libbladeRF*.

A frequência de transmissão da placa é definida por meio da função *dev.tx.frequency*, a largura de banda de transmissão por meio da função *dev.tx.bandwidth*, a amplitude da parte real do sinal por meio da função *dev.tx.vga1*, e da parte imaginária por meio da *dev.tx.vga2*, para ambas as amplitudes considera-se o parâmetro a ser passado para a função na unidade dBm.

O comando que aciona a placa para transmissão é *dev.tx.start ()*, e o sinal é transmitido durante o tempo de símbolo OFDM por meio da função *dev.transmit ()*. Depois de todas as operações, a placa pode ser desligada por meio da função *dev.tx.stop*.

A PSD do sinal transmitido pelo *hardware* da plataforma *Blade RFX40* foi medida de duas formas. Na primeira, o sinal transmitido foi irradiado pela antena, e o sinal foi recebido por uma antena de mesmas características conectada no analisador de espectro. Para essa primeira forma de medição, a PSD medida pode ser vista na Figura 28. Na segunda forma, ao invés de uma antena para recepção, foi feita a conexão do cabo coaxial que veio no *kit* SDR, da placa até a entrada do analisador de espectro. A Figura 29 mostra a PSD medida para a transmissão usando cabo.

Importante ressaltar que com a transmissão feita via cabo coaxial, o sinal sofreu menos perdas e interferências, resultando em níveis de potência maiores quando comparados à transmissão feita via irradiação pela antena, se aproximando até da potência de transmissão de -25 dBm utilizada.

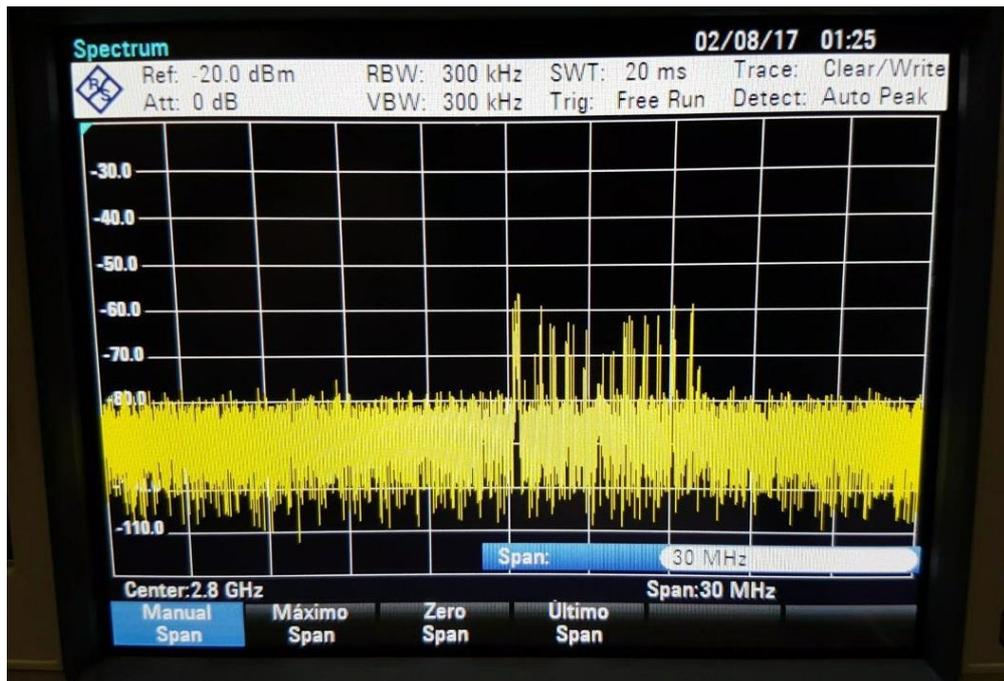


Figura 28. PSD do sinal transmitido via antena.

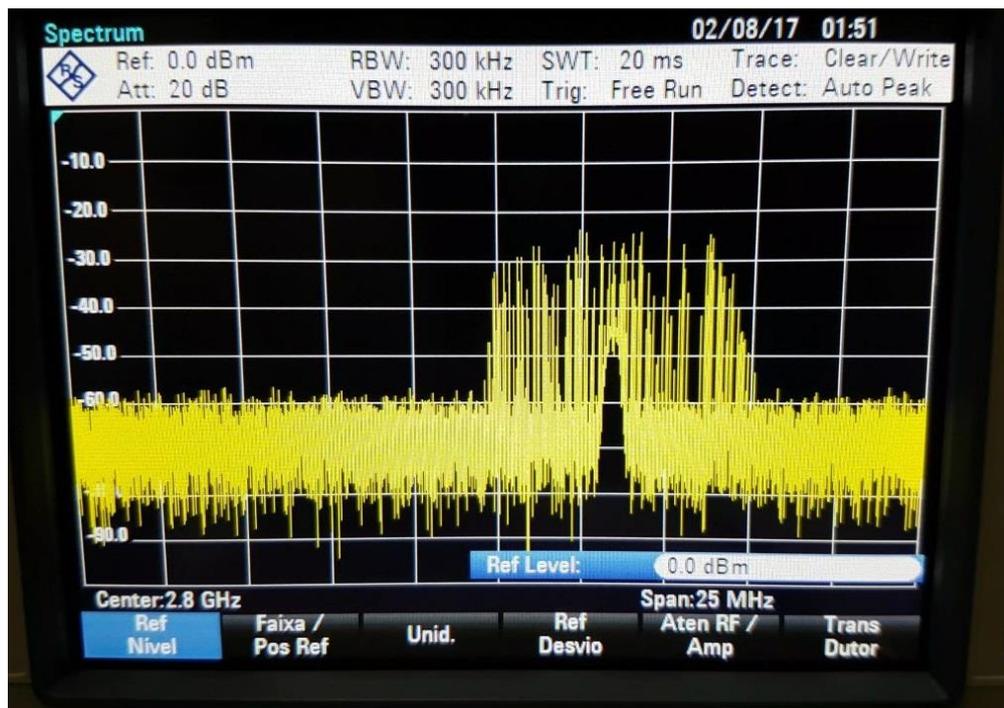


Figura 29. PSD do sinal transmitido via cabo coaxial.

Agora que todo subsistema transmissor foi discutido e o sinal LDM foi transmitido, a análise será feita do lado receptor. Para a recepção adequada do sinal pela placa, foram definidos alguns dos parâmetros principais de recepção do *hardware* SDR.

A frequência de recepção da placa é definida por meio da função *dev.rx.frequency*, e nesse caso deve ser igual à frequência de transmissão, assim como a banda de recepção. A placa é configurada para trabalhar com recepção por meio da função *dev.rx*, e a recepção é iniciada com a função *dev.rx.start*. As

amostras do sinal recebido são armazenadas em um vetor padrão chamado de *samples*. A função *dev.rx.stop ()* faz com que o processo de recepção se encerre.

Depois da aquisição do sinal, o espectro em UHF é transladado para banda base para posterior demodulação OFDM. Porém, antes da modulação em si, é feita uma filtragem para eliminar quaisquer componentes interferentes e uma amostragem para trabalhar com o sinal em tempo discreto.

Em seguida, é feita a FFT para converter o sinal do domínio temporal para o domínio da frequência, gerando os símbolos complexos LDM novamente. Como resultado, a constelação LDM do sinal recebido demodulado é mostrada na Figura 30 abaixo.

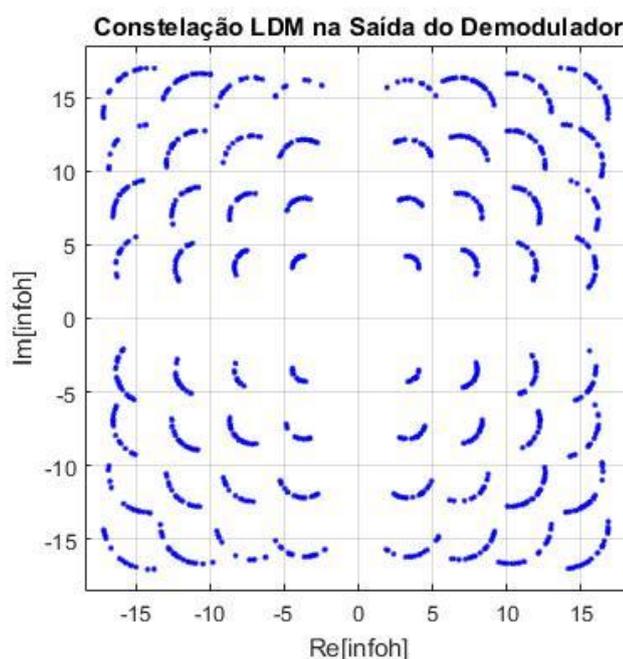


Figura 30. Constelação LDM na saída do demodulador OFDM.

Em comparação com a constelação LDM da Figura 23, que é a obtida no lado transmissor, é possível perceber que o sinal quando passou pelo meio sofreu os efeitos de um ruído de fase e de amplitude.

O sinal recebido e demodulado carrega informação de ambas as camadas LDM, então nesse momento é preciso fazer a divisão de informação para posterior desmapeamento e decodificação de canal.

De acordo com a teoria sobre LDM, a primeira camada a ser processada é a UL. Para isso, o sinal passa primeiramente por um processo de estimação feito pelo bloco estimador, onde dependendo do quadrante que o símbolo se encontrar na constelação, o valor do símbolo complexo mapeado em QPSK recebe o nível de amplitude original configurado no mapeador. Esse processo é feito símbolo a símbolo, e a constelação QPSK na saída do estimador pode ser vista na Figura 31 a seguir.

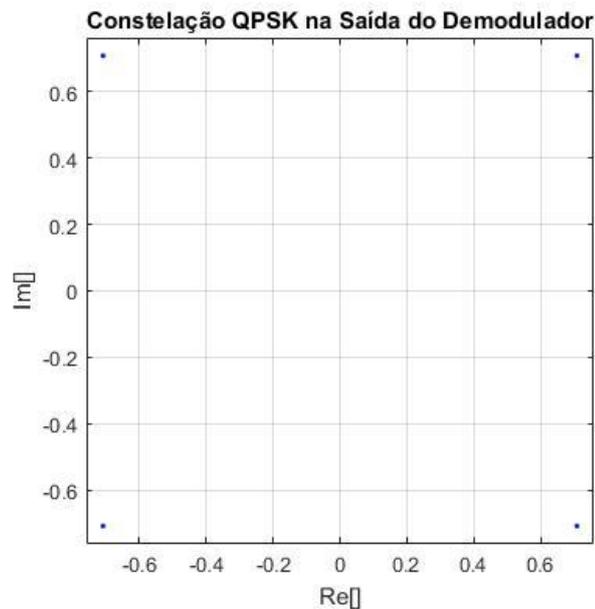


Figura 31. Constelação QPSK na saída do estimador.

Esses símbolos estimados são divididos em dois fluxos paralelos iguais. Um fluxo segue para o desmapeador QPSK e decodificadores de canal para que a informação da UL seja recuperada, com a maior fidelidade possível a informação original inserida na entrada do transmissor. O outro fluxo segue para o processo de cancelamento de sinal, onde esses símbolos são subtraídos do sinal LDM recuperado, resultando somente no sinal da LL. Os símbolos complexos da LL que estão mapeados em 16-QAM estão dispostos na constelação presente na Figura 32.

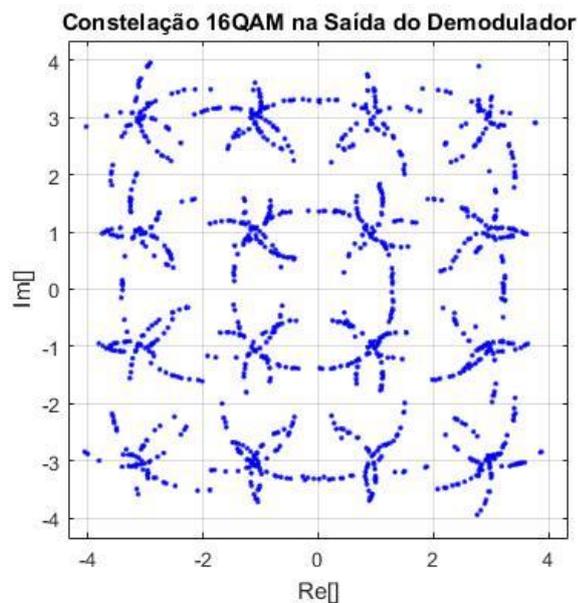


Figura 32. Constelação 16-QAM após o cancelamento de sinal.

Esses símbolos seguem agora para o desmapeamento e decodificação de canal regenerando o sinal da LL da mesma forma com o que foi feito para a UL.

Depois que os bits de informação da UL e LL foram recuperados, os dois vetores que os carregam são comparados com os vetores gerados lá no início para serem inseridos no transmissor, para análise de performance do sistema. Para isso, é utilizada a função *comm.ErrorRate*, que gera como resultados, a taxa de erro de bits, número de bits errados e total de bits analisados.

Então, os resultados da *performance* desse sistema implementado em SDR estão mostrados na Figura 33, para ambas as camadas LDM.

```
Command Window
Camada LDM superior:
Taxa de erro de bit:0.000000
Numeros de bits errados:0.000000
Numeros de bits analisados:1504.000000
Camada LDM inferior:
Taxa de erro de bit:0.000000
Numeros de bits errados:0.000000
fx Numeros de bits analisados:3008.000000>> |
```

Figura 33. Desempenho do sistema.

Como pode ser visto na *Command Window*, para ambas as camadas LDM, a BER resultante foi 0, em outras palavras, o número de bits errados foi 0.

Outra informação importante é que a LL transmitiu duas vezes mais bits que a UL, demonstrando um aumento considerável na capacidade do sistema quando comparado ao sistema convencional de uma camada de potência somente.

Assim sendo, foi provado que o sistema desenvolvido e implementado é mais eficiente em termos de uso do espectro, pois consegue transmitir muito mais informação dentro da mesma largura de banda.

12. CONCLUSÃO

Um grande diferencial do projeto é que a proposta de utilização de uma tecnologia recém-desenvolvida, que é a LDM, no ISDB-Tb, é uma das primeiras a fazer esse estudo e implementação. A ideia inicial dessa proposta foi dada pelo Professor Dr. Rangel Arthur.

Os resultados mostraram que a LDM é de fato uma tecnologia disruptiva para a transição para os sistemas NG-DTV. Foi demonstrado de acordo com os conceitos teóricos, que a aplicação da técnica LDM permite o uso mais eficiente do espectro, sem um aumento significativo na complexidade das arquiteturas dos subsistemas transmissor e receptor.

A implementação da LDM no padrão ISDB-Tb mostrou a aplicabilidade dessa técnica no padrão brasileiro, trazendo como avanço a abertura de novas possibilidades de serviços, que no caso desse trabalho as soluções consistiram em prover conteúdo em resolução UHD e uso de uma porção de uma camada para *link* em banda de distribuição sem fio para uso em redes SFN.

Outra importante conclusão que pode ser tirada é que as soluções podem ser implementadas juntas no sistema ISDB-Tb LDM de duas camadas implementado, ou seja, pode-se prover sinal em resolução *Full-HD* e em UHD, e pode-se ter um *link* em banda de distribuição para os retransmissores ao mesmo tempo, de modo

que as soluções não se excluem mas sim se completam na função de evoluir o sistema ISDB-Tb como um todo.

As mudanças e todo o sistema implementado provaram ser válidas, e além disso, provaram que as soluções propostas são aplicáveis e geram muito ganhos com poucas mudanças. Um receptor convencional em um dispositivo pode perfeitamente receber o sinal da UL, enquanto que a LL só é acessível aos receptores LDM. Isso demonstra que a aplicação da LDM no ISDB-Tb não torna os receptores convencionais já em uso obsoletos, uma vez que eles continuariam recebendo sinal, sendo isso uma importante característica decorrente dessa aplicação.

A extensão do sistema ISDB-Tb para um sistema LDM de mais de duas camadas expande ainda mais o cenário de DTV para novas possibilidades e novos serviços. Essa extensão é perfeitamente possível seguindo os conceitos teóricos já apresentados sobre o LDM. E aliado a isso, algoritmos de codificação de canal mais fortes como os LDPC, e constelações de maior ordem como 256-QAM, podem aumentar ainda mais a robustez e capacidade desse sistema.

Conclui-se então que os resultados dessas aplicações e soluções, que aumentam a performance e robustez do sistema, tornam a LDM umas das principais soluções para trabalhar em paralelo com problemas atuais de demanda sobre o uso do espectro, e com o aumento de capacidade dos sistemas de DTV.

13. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros que venham a seguir a mesma ideia, algumas considerações são necessárias.

A primeira consideração é implementar esse sistema de uma forma mais aprofundada, acrescentando os módulos removidos nesse trabalho, de modo que o sistema se torne o sistema mais robusto se aproximando da configuração do sistema ISDB-Tb real. Assim sendo, as simulações poderiam ser estendidas para campo, utilizando equipamentos mais potentes, demonstrando em maior escala a aplicabilidade, os ganhos, e até testes de desempenho em diferentes tipos de canal.

A segunda consideração é desenvolver esse sistema em *GNU Radio*, e apesar de ser algo que leva muito mais tempo e conhecimentos mais específicos, é algo mais profissional e mais fácil de ser modificado para o caso de mudanças ou melhorias na arquitetura.

Por fim, a última consideração é a implementação das duas soluções juntas operando em tempo real em um sistema real, transmitindo sinal em *Full-HD* e *UHD*, juntamente com o *STL* para os retransmissores, implementando todos os conceitos e ideias que aqui foram desenvolvidos e apresentados.

14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SAMPAIO DE ALENCAR, M. “Televisão Digital”. Editora Érica, São Paulo, 2007, 1º ed.

[2] LARROCA, F.; GURIDI, P. F.; SENA, G. G.; GONZÁLEZ, V.; BELZARENA, P.. “gr-isdbt: An ISDB-T 1-segment Receiver Implementation on GNU Radio” Elect. Eng. Inst., Univ. de la República, Montevideo, Uruguay, 2015. [Online]. Disponível em: <https://ie.fing.edu.uy/publicaciones/2015/LFGGB15/LFGGB15.pdf>. Data de acesso: Junho de 2017.

[3] WIKIPEDIA. “SBTVD”. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/SBTVD>. Data de Acesso: Julho de 2017.

[4] MACIEL, Y. P. Modulador 1-seg para SBTVD usando GNU Radio. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2014.

[5] WU, Y.; RONG, B.; SALEHIAN, K.; GAGNON, G.. “Cloud Transmission: A New Spectrum-Reuse Friendly Digital Terrestrial Broadcasting Transmission System,” IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 58, NO. 3, September 2012.

[6] ZHANG, L.; WU, Y.; LI, W.; SALEHIAN, K.; LAFLÈCHE, S.; HONG, Z.; PARK, S.; LEE, J.; KIM, H.; HUR, N.; WEISS, S.. “Wireless In-Band Distribution Link using LDM for SFN Transmitters and Gapfillers in ATSC 3.0”, Publicado no 2018 IEEE Broadcast Symposium, Arlington, VA, USA, 2018.

[7] D. LOUNG. LDM—Stacking Signals for Improved Performance. Disponível em: <http://www.tvtechnology.com/expertise/0003/lmstacking-signals-for-improvedperformance/274386>. Data de Acesso: Janeiro de 2016.

[8] ZHANG, L.; LI, W.; WU, Y.; WANG, X.; PARK, S.; KIM, H.; LEE, J.; ANGUEIRA, P.; MONTALBAN, J.. “Layered-Division-Multiplexing: Theory and Practice,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 62, no. 1, pp. 216–231, Mar. 2016.

[9] MONTALBAN, J.; ANGULO, I.; REGUEIRO, C.; ZHANG, L.; WU, Y.; PARK, S.; LEE, J.; KIM, H.; VELEZ, M.; ANGUEIRA, P.. “Performance Study of Layered Division Multiplexing Based on SDR Platform,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 61, no. 3, pp. 436–444, Sept. 2015.

[10] MONTALBAN, J.; ANGULO, I.; REGUEIRO, C.. (2015, February). Layered Division Multiplexing: a technique to make flexible use of broadcast spectrum. [Online]. Disponível em: <http://www.ldm-tech.com/index.php/documentation/technical-presentations/>. Data de Acesso: Junho de 2017.

[11] COMMUNICATIONS RESEARCH CENTRE CANADA. Layered Division Multiplexing (LDM) Summary. Disponível em: <http://www.transmitter.com/RF251/LDM.pdf>. Data de Acesso: Janeiro de 2016.

[12] MESSIAS DE CARVALHO, S. R.. Utilização da Rede SFN para Expansão da Rede de Retransmissão Regional de TV Digital Abeta Terrestre. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, UNICAMP, 2006.

[13] LIMA, V.; MACHADO, L. E.; BARCIA, F. A.. Redes de frequência única. Disponível em: <http://www.set.org.br/revista-da-set/redes-de-frequencia-unica/>. Data de Acesso: Março de 2019.

[14] REIS, A. L. G.; SELVA, A. F. B.; LENZI, K. G.; MELONI, L. G. P.; BARBIN, S. E. "A SOFTWARE DEFINED RADIO APPROACH FOR DIGITAL TELEVISION ISDB-T TRANSMITTERS". Proceedings of SDR'12-WInnComm-Europe, 27-29 de Junho de 2012.

[15] ADTHEC. "Predição de cobertura". Disponível em: <http://adthec.com.br/adthec/index.php/empresa/tv-digital/elaboracao-do-projeto-tecnico-para-ministerio-das-comunicacoes/cobertura/area-de-cobertura/>. Data de Acesso: Março de 2019.

[16] PINTO, E. L.; ALBUQUERQUE, C. P. d.. "A Técnica de Transmissão OFDM". Revista Científica Periódica – Telecomunicações. Vol. 5, Nº1, Junho de 2012.

[17] AKAMINE, C.; LUIZA DA SILVA, M. "OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)". Trabalho realizado para a disciplina IE344 – Tópicos em Comunicação III: Introdução a TV Digital do curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, 2006.

[18] MATLAB. "Getting Started with Communications System Toolbox". Disponível em: <http://www.mathworks.com/examples/matlab-communications/category/getting-started-withcommunications-system-toolbox>. Data de Acesso: Julho de 2017.

[19] WIRELESS INNOVATION FÓRUM. "What is Software Defined Radio". Disponível em: <http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>. Acesso em: Julho de 2017.

[20] Wendley S. Silva, Jefferson Rayneres S. Cordeiro, Daniel F. Macedo, Marcos A. M. Vieira, Luiz F. M. Vieira, José Marcos S. Nogueira. Introdução a Rádios Definidos por Software com aplicações em GNU Radio, cap. 5. Disponível em: <http://sbrc2015.ufes.br/wpcontent/uploads/Ch5.pdf>. Acesso em: Dezembro de 2015.

[21] "Main Page da Wiki do GNU Radio". Disponível em: http://wiki.gnuradio.org/index.php/Main_Page . Acesso em: Junho de 2017.

[22] NUAND. "bladeRF: USB 3.0 Software Defined Radio". Disponível em: <https://www.nuand.com/bladeRF-brief.pdf>. Acesso em: Julho de 2017.

[23] ACOSTA, G. "OFDM Simulation Using Matlab". Smart Antenna Research Laboratory. August, 2000.