



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO DE
TV DIGITAL EM AMBIENTES COM
DESVANECIMENTO**

Campina Grande, Paraíba

Setembro de 2017

ANDREI PIMENTEL DE CARVALHO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO DE
TV DIGITAL EM AMBIENTES COM
DESVANECIMENTO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador:

Professor José Ewerton Pombo de Farias

Campina Grande, Paraíba.

Setembro de 2017

ANDREI PIMENTEL DE CARVALHO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO DE TV DIGITAL EM AMBIENTES COM DESVANECIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor José Ewerton Pombo de Farias

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Para meus pais e minha irmã. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar nos caminhos corretos da vida e me dar luz e conforto em momentos de necessidade. Agradeço aos meus pais, Joabson e Rosiana, por me darem tanto amor e carinho, pelo aprendizado diário e por serem meu forte. À minha irmã, confidente e melhor amiga, Larissa, que está presente em todos os momentos da minha vida.

Agradeço também aos meus avós, tios e primos por acreditarem em mim ao longo de toda essa jornada e pelas muitas alegrias que aliviaram a tensão do curso. Aos muitos amigos que fiz durante toda minha graduação, que me acompanharam nos bons e maus momentos.

Agradeço a todos os professores e funcionários da Universidade Federal de Campina Grande por todos os ensinamentos que me ajudaram a construir todo conhecimento adquirido durante o curso. Obrigado a todos que fizeram parte dessa história!

“Posso não ter um centavo no bolso, mas tenho um sorriso no rosto e isso vale mais que todo dinheiro do mundo”.

Don Ramón

RESUMO

A televisão é um aparelho que entretém famílias inteiras ao redor do mundo. No Brasil, essa cultura não é diferente, porém um novo sistema de televisão vem substituindo a o antigo sistema de TV analógica. A TV digital promete melhorias consideráveis para o consumidor como melhor qualidade de imagem, além da compactação do sinal e ausência de interferência. Cabe então verificar como tal sistema se comportará em ambientes não favoráveis.

Este documento apresenta uma avaliação sobre a transmissão de TV digital em ambientes com desvanecimento. Para tanto, foram utilizados equipamentos que emulam um canal de TV no padrão brasileiro, permitindo colocar componentes de atraso de percurso, além de variações de velocidade para verificação do efeito Doppler. A avaliação da transmissão é então realizada a partir da constelação gerada, bem como também na análise da MER para valores diferentes da relação sinal-ruído para duas modulações utilizadas no sistema.

Palavras-chave: TV Digital, Multipercurso, Caminhos múltiplos, Deslocamento Doppler, Erro de frequência, Análise de transmissão, QAM, OFDM.

ABSTRACT

Televisions are devices that entertains entire families around the world. In Brazil, this culture is not so different, but a new television system has been replacing the old analog TV system. Digital TV promises to deliver considerable improvements for the consumer such as better image quality, signal compression and absence of interference. It is then necessary to verify how this system will behave in unfavorable environments.

This document presents an assessment of the Digital TV transmission in fading environments. In order to do so, equipment that emulate a TV channel in the Brazilian standard were used, in which it was possible to put components of delay and speed variations to verify the Doppler effect. The evaluation of the transmission is then made from the constellation generated, as well as in the analysis of the MER obtained for different values of the signal-to-noise ratio in the two proposed modulations.

Key words: Digital TV, Multipath, Multiple paths, Doppler shift, Frequency error, Transmission analysis, QAM, OFDM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama em blocos de um sistema de transmissão ISDB-Tb. (fonte: Mendes, 2007).....	4
Figura 2: Subportadoras OFDM (fonte: Vargas, 2007).....	5
Figura 3: Constelação 16QAM (fonte: Ganchar, 2011)	7
Figura 4: Divisão da banda de 6 MHz em 13 segmentos de 482,572 kHz (fonte: Ishini, 2009).....	8
Figura 5: Característica de atenuação uniforme (fonte: Rappaport, 2008).....	13
Figura 6: Característica de atenuação seletiva em frequência (fonte: Rappaport, 2008)	14
Figura 7: Emulador de canal PXB da Keysight, (fonte: Keysight).	16
Figura 8: Gerador de sinais EXG. (fonte: Keysight).	16
Figura 9: Analisador de modulação MXA. (fonte: Keysight).	17
Figura 10: Constelação 16QAM sem desvanecimento, (Elaborado pelo autor).	20
Figura 11: Espectro 16QAM sem desvanecimento, (Elaborado pelo autor).	20
Figura 12: Constelação 64QAM sem desvanecimento, (Elaborado pelo autor).	20
Figura 13: Espectro 64QAM sem desvanecimento, (Elaborado pelo autor).	20
Figura 14: Constelação 16QAM modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).	21
Figura 15: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).....	21
Figura 16: Constelação 64QAM modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).	21
Figura 17: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).....	21
Figura 18: Constelação 16QAM modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).	22
Figura 19: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).....	22
Figura 20: Constelação 64QAM modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).	22
Figura 21: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).....	22
Figura 22: Constelação 16QAM modelo Brasil C , (Elaborado pelo autor).	23

Figura 23: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).....	23
Figura 24: Constelação 64QAM modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).	23
Figura 25: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).....	23
Figura 26: Constelação 16QAM modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).	24
Figura 27: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).....	24
Figura 28: Constelação 64QAM modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).	24
Figura 29: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).....	24
Figura 30: Constelação 16QAM modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).....	25
Figura 31: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).....	25
Figura 32: Constelação 64QAM modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).....	25
Figura 33: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).....	25
Figura 34: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).	28
Figura 35: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).	28
Figura 36: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).	28
Figura 37: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).	28
Figura 38: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelo de Canal Brasil A, (ITU).....	17
Tabela 2: Modelo de Canal Brasil B, (ITU).	17
Tabela 3:Modelo de Canal Brasil C, (ITU)	18
Tabela 4: Modelo de Canal Brasil D, (ITU)	18
Tabela 5: Modelo de Canal Brasil E, (ITU)	18
Tabela 6: Erro de frequência para diferentes velocidades, (Elaborado pelo autor).....	30

LISTA DE ABREVIACÕES

ISDB-T	Transmissão de serviços digitais integrados (<i>Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial</i>)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ISDB-Tb	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
OFDM	Multiplexação por divisão de frequências ortogonais (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>)
QAM	Modulação por amplitude em quadratura (<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>)
ITU	União internacional de telecomunicações (<i>International Telecommunication Union</i>)
MER	Taxa de erro de modulação (<i>Modulation Error Ration</i>)
MPEG-4AVC	<i>Moving Picture Experts Group – 4 Advanced Video Coding</i>
PUC-RJ	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
BPSK	Chaveamento binário por deslocamento de fase (<i>Binary Phase Shift Keying</i>)
PSK	Chaveamento por deslocamento de fase (<i>Phase Shift Keying</i>)
ASK	Chaveamento por deslocamento de amplitude (<i>Amplitude Shift Keying</i>)
SD	Definição padrão (<i>Standard definition</i>)
HD	Alta definição (<i>High Definition</i>)
LDTV	Televisão em baixa definição (<i>Low Definition Television</i>)

SDTV	Televisão em definição padrão (<i>Standard Definition Television</i>)
HDTV	Televisão em alta definição (<i>High Definition Television</i>)
RMS	Raiz média quadrada (<i>Root Mean Square</i>)
BER	Taxa de erro de bit (<i>Bit Error Ratio</i>)

SUMÁRIO

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Abreviações	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Estrutura do trabalho.....	2
2 Fundamentação teórica.....	2
2.1 ISDB-Tb.....	2
2.1.1 Codificação de canal.....	3
2.1.2 Modulação	5
2.1.3 XQAM	6
2.1.4 Segmentação de banda.....	8
2.2 Efeitos de Propagação.....	8
2.2.1 Fatores que influenciam o desvanecimento.....	9
2.2.2 Efeito Doppler	10
2.2.3 Parâmetros dos canais de multipercurso.....	11
2.2.4 Tipos de desvanecimento.....	12
3 Materiais e métodos	15
4 Resultados	18
4.1 Análise do diagrama de constelação e espectro.....	19
4.2 Variação da velocidade	29
5 Conclusão.....	31
6 Bibliografia.....	33

1 INTRODUÇÃO

Desde a chegada ao Brasil na década de 50, a televisão se tornou um popular instrumento da cultura moderna. A evolução das tecnologias permitiu o desenvolvimento da TV digital, que no Brasil foi desenvolvida a partir do sistema japonês ISDB e transmitido pela primeira vez em 2007. Após um período de transição, algumas cidades já deram início ao desligamento do sinal analógico, como por exemplo, Brasília. Na Paraíba, está previsto que o desligamento na região que inclui a cidade de João Pessoa ocorra em maio de 2018, enquanto que em Campina Grande e demais cidades o desligamento ocorrerá em dezembro de 2018.

Em 2007, a ABNT homologou as normas brasileiras para o sistema de transmissão de TV digital, a ABNT NBR15601. Outras normas relacionadas ao sistema foram homologadas juntamente à NBR15601, reunindo as diretrizes para as codificações de vídeo, áudio e multiplexação na NBR15602-1/2/3, serviços de informação, sintaxes e definições do sistema de radiodifusão na NBR15603-1/2/3, receptores na NBR15604, codificação de dados e especificações de transmissão na NBR15606-1/2/3/5 e, por fim, a norma para os canais de interatividade na NBR15607-1.

O sistema ISDB-Tb transmite sinais digitais em diversas modulações com acesso OFDM. A transmissão digital é afetada pelos diversos aspectos do ambiente, produzindo efeitos como desvanecimentos gerados por caminhos múltiplos, alterações na frequência por efeito Doppler ou mesmo contaminação de ruído do ambiente, afetando o desempenho do sistema de transmissão. Este trabalho propõe o estudo do desempenho da transmissão digital no sistema ISDB-Tb em diversas situações de ruído, multipercurso produzidos pelo canal, além dos efeitos relacionados à mobilidade do receptor.

1.1 OBJETIVOS

Tendo em vista os problemas causados pelos efeitos dos caminhos múltiplos e deslocamento Doppler, este trabalho propõe avaliar o desempenho da transmissão de

TV digital no sistema ISDB-Tb usando as modulações 16QAM e 64QAM, ambas em OFDM. Para tanto, foram analisadas as constelações resultantes para cada caso, como também a MER obtida para uma variação da relação sinal-ruído. Para dar mais realismo à configuração, foram utilizados modelos de canais, propostos pelo ITU, que caracterizam diferentes regiões do Brasil.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para que se possa ter um entendimento da elaboração do presente trabalho, se faz necessário saber como funciona o padrão brasileiro de televisão digital ISDB-Tb e as causas e efeitos do desvanecimento em um canal. Assim, o capítulo 2 trata de um detalhamento sobre a codificação de sinais e fontes do padrão ISDB-Tb, bem como uma explicação geral sobre as modulações XQAM e a transmissão em OFDM. Serão abordados também os efeitos da propagação de sinais digitais, destacando a atenuação por caminhos múltiplos e os tipos de desvanecimentos. A seção seguinte trata dos materiais e métodos utilizados para a realização deste trabalho, detalhando as simulações realizadas no trabalho para obtenção dos resultados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a configuração mostrada no capítulo 3. Serão avaliados os efeitos sofridos pelo canal através da verificação de sua constelação e potência obtidas pelo analisador de modulação MXA. Uma análise sobre a MER obtida dada uma variação na relação sinal ruído também será mostrada para cada modelo de canal proposto. Para complementar, foi avaliado o erro de frequência dado pelo deslocamento Doppler para uma variação de velocidade. Por último, capítulo 5 se trata das conclusões a partir dos resultados, possíveis soluções e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ISDB-TB

O padrão brasileiro de televisão digital usou como base o ISDB-T, padrão utilizado no Japão, com diferenças apenas nas camadas de compressão e de *middleware*. Foi escolhida no Brasil uma técnica de compressão de vídeo mais eficiente, o H.264, baseado no MPEG-4 AVC, fazendo com que o espectro seja usado com mais eficiência e também aumentando a qualidade da imagem. Já o *middleware*, camada responsável por integrar o *hardware* da TV e os aplicativos da emissora, ficou por conta de pesquisadores da PUC-RJ e da UFPB, que projetaram o GINGA.

2.1.1 CODIFICAÇÃO DE CANAL

A Figura 1 apresenta o diagrama da camada física presente no ISDB-Tb. Pode-se observar que o padrão emprega um código Reed Solomon (RS) que insere redundâncias para reparar erros ocorridos no canal de comunicação. A cada pacote de 188 bytes são introduzidos 16 bytes de paridade, ficando assim com uma capacidade de correção de 8 bytes. Para proporcionar taxas de codificação de $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ ou $7/8$, é empregado um código convolucional puncionado como código interno.

O padrão também faz uso de um entrelaçador convolucional como entrelaçador externo, para evitar que rajadas de erros presentes no canal cheguem também como rajadas ao decodificador. Esses erros devem ser impedidos já que a capacidade de correção do bloco de codificação externa é limitada a 8 bytes. Com o uso do entrelaçador, mesmo que hajam erros, eles aparecerão distantes um do outro, possibilitando a correção e aumentando a eficiência do sistema.

Além disso, dois entrelaçadores de bits são usados como entrelaçadores internos, um responsável pelo domínio da frequência e outro pelo domínio do tempo. Eles são necessários pois, como no caso do entrelaçador externo, a eficácia na correção de erros é limitada, e os entrelaçadores internos entram para espalhar os erros no espectro, garantindo assim um funcionamento ainda mais satisfatório.

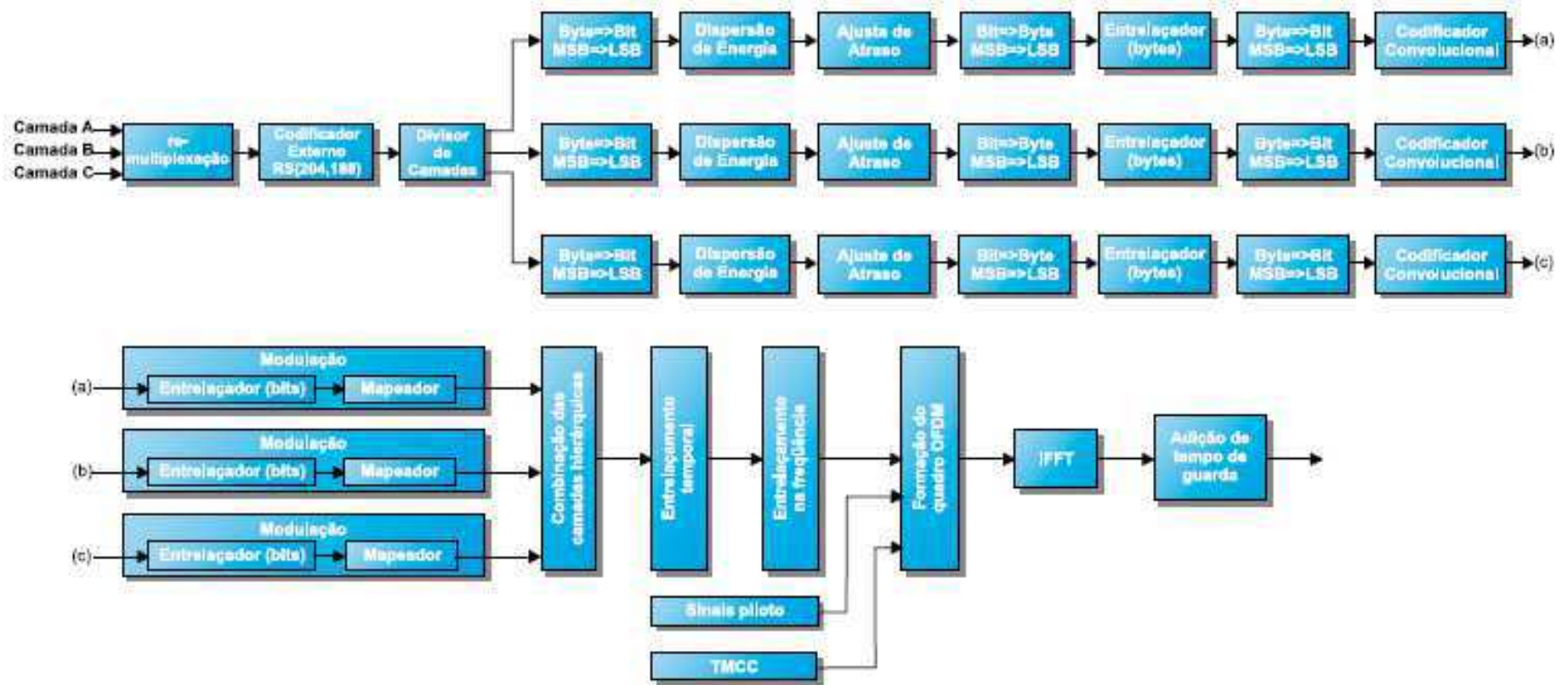


Figura 1: Diagrama em blocos de um sistema de transmissão ISDB-Tb. (fonte: Mendes, 2007)

2.1.2 MODULAÇÃO

Uma forma eficaz para transmissão é o sinal OFDM, que utiliza múltiplas portadoras para transformar um sinal serial que chega com alta velocidade em vários sinais paralelos de baixa velocidade. A modulação no padrão ISDB-Tb é feita utilizando moduladores OFDM, operando em três modos distintos, denominados modos 1, com 96 portadoras, modo 2, com 192 portadoras e o modo 3, com 384 portadoras. O modo a ser utilizado depende do tipo de recepção a ser utilizada, já que existe um comprometimento entre a quantidade de portadoras utilizadas no sistema e os efeitos de multipercurso e Doppler. No caso, o sistema aumentará sua robustez frente ao efeito de caminhos múltiplos de acordo com o aumento no número de portadoras, porém ficará mais sensível a variações de frequências, e conseqüentemente, ficará vulnerável ao efeito Doppler. A Figura 2 ilustra a modulação OFDM com múltiplas portadoras ortogonais.

Dessa forma, deve-se então utilizar o modo 1 para cenários em que o fator limitante do sistema é a mobilidade, já que este será o modo mais imune aos desvios de frequência Doppler. O modo 3 deve ser usado em casos em que o fator limitante seja a seletividade em frequência. O modo 2 é um intermediário entre um receptor se movendo em baixas velocidades, apresentando certa seletividade em frequência.

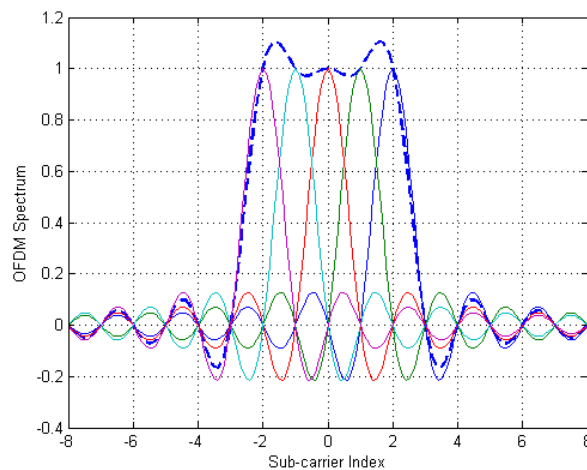


Figura 2: Subportadoras OFDM (fonte: Vargas, 2007)

Além das portadoras, sinais pilotos espalhados (SP), modulados em BPSK, são transmitidas no mesmo canal, para auxiliar na extração de informações necessárias para técnicas de estimação de canal, que diminuem ainda mais os efeitos de desvanecimento. Outras portadoras também são transmitidas, como é o caso das portadoras AC e TMCC. A portadora AC é encarregada de levar informações adicionais à transmissão, enquanto a TMCC é utilizada para auxiliar na decodificação e demodulação do sinal.

Uma característica importante do sistema OFDM é que o sinal é cíclico com um período de T segundos. Isso assegura que a última amostra é igual à primeira, e assim, parte do fim do símbolo é introduzido no início da amostra. Para finalizar o processo, insere-se um tempo de guarda entre os símbolos OFDM, que pode ser configurado para T/4, T/8, T/16 ou T/32. Quanto maior o tempo de guarda, mais robusto se torna o sistema com relação aos efeitos de multipercurso.

Uma vantagem preponderante do uso da modulação OFDM é a possibilidade de criar uma rede transmissora operando na mesma frequência, cobrindo assim áreas de sombra, e garantindo que a toda população tenha acesso às emissoras. Essa característica foi essencial no planejamento de canais brasileiros para que todas as emissoras pudessem transmitir o serviço de TV digital em paralelo com o sinal analógico de TV.

2.1.3 XQAM

Diferentes métodos de modulação digital podem ser empregados na área de telecomunicações, utilizando amplitude, frequência ou fase. O sistema ISDB-Tb utiliza OFDM como método de transmissão, em que são usadas multiportadoras moduladas em QPSK, 16QAM ou 64QAM.

QAM é um esquema de modulação que combina características das modulações PSK e ASK, em que são chaveadas amplitude e fase para transmissão de sinais. Para o caso de transmissão de sinais digitais, essas características são alteradas, criando símbolos que representam certa quantidade de bits. Esse número de bits está relacionado com a quantidade de símbolos disponíveis, dada por:

$$N = \frac{\log S_n}{\log 2} \quad (1)$$

Em que N é a quantidade de bits por símbolo, e S_n é a quantidade de símbolos utilizados.

Para que se tenha uma melhor noção da modulação QAM, um gráfico de constelações é mostrado na Figura 3. Os pontos do gráfico representam os símbolos, que estão dispostos dados às amplitudes e fases da configuração. Pode-se observar que se trata de uma configuração 16QAM, de 16 símbolos codificados em 4 bits. Erros de amplitude resultam em uma movimentação dos símbolos na direção do centro do gráfico, em que os símbolos podem se afastar ou se aproximar do centro, de acordo com o erro. Erros de fase resultam em uma movimentação circular dos símbolos.

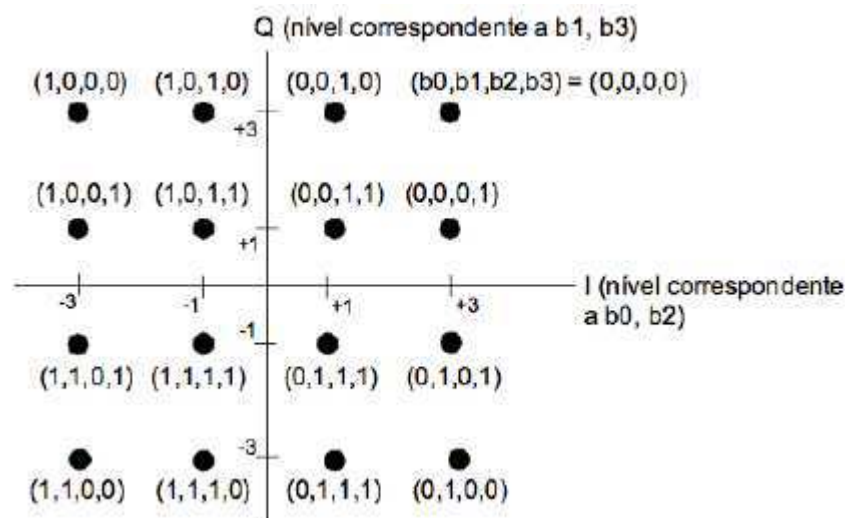


Figura 3: Constelação 16QAM (fonte: Ganchar, 2011)

Quanto maior o número de bits a serem utilizados, maior é o número de símbolos da configuração, aumentando assim a taxa de transmissão. Deve-se salientar que um grande número de símbolos em uma constelação torna a modulação mais sensível ao ruído, pois a distância entre um símbolo e outro é muito pequena, e qualquer erro de fase ou de amplitude pode ocasionar interferência entre os símbolos. A transmissão em TV digital pode ser feita então de acordo com o conteúdo a ser transmitido. A configuração 16QAM é geralmente usada para transmissões SD, enquanto a configuração 64QAM é mais frequente em transmissões HD.

2.1.4 SEGMENTAÇÃO DE BANDA

A divisão da banda de um sinal OFDM foi o que tornou o padrão ISDB-T mais flexível com relação aos outros padrões existentes. Cada subportadora contém uma banda de 6 MHz independente, dividida em 14 segmentos distintos, sendo um para banda de guarda e 13 para transmissão, usando uma técnica chamada “transmissão hierárquica”.

A transmissão hierárquica possibilita que os segmentos dentro da banda sejam usados em até três conjuntos de configurações distintas, denominadas camadas. As camadas podem conter programas diferentes, permitindo que sejam transmitidas diferentes informações dentro da mesma banda de 6 MHz. O segmento central, chamado também de camada A, é voltado para a transmissão em LDTV, para portáteis. Os outros 12 segmentos podem ser utilizados por até duas camadas, denominados camadas B, que transmitem programas em SDTV, e a camada C, transmitindo HDTV.

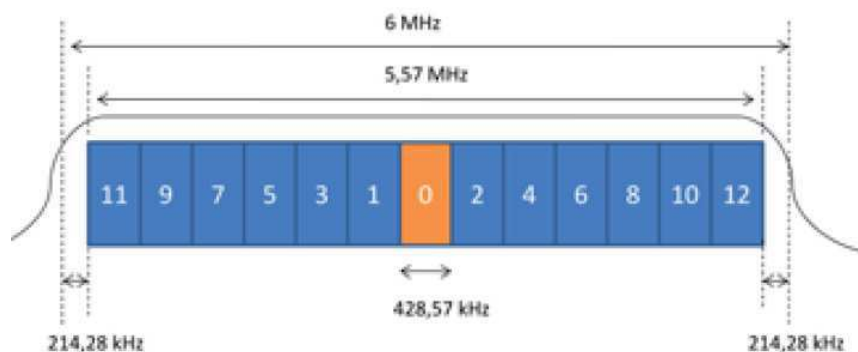


Figura 4: Divisão da banda de 6 MHz em 13 segmentos de 428,572 kHz (fonte: Ishini, 2009)

2.2 EFEITOS DE PROPAGAÇÃO

O termo desvanecimento é usado para descrever variações rápidas em algum parâmetro da onda eletromagnética, em um curto período de tempo ou distância, fazendo com que os efeitos da atenuação de pequena escala sejam ignorados. O desvanecimento é basicamente causado devido ao multipercurso, ou seja, interferências de duas ou mais parcelas de um sinal transmitido, que chegam em diferentes instantes

no receptor. As cópias das ondas se combinam no receptor e resultam em um sinal que varia tanto em amplitude como em fase.

Alguns efeitos são causados devido aos caminhos múltiplos no canal, entre eles destacam-se as variações rápidas de intensidade em uma curta distância ou período de tempo, mudanças Doppler e ecos, causados pelos atrasos de propagação. Um dos motivos para que todos esses efeitos ocorram é que as alturas das antenas que recebem o sinal está abaixo das estruturas nos arredores, como casas e prédios, fazendo com que não haja uma linha de visada direta entre a estação base e a antena receptora.

Caso o movimento se der apenas por parte da estação móvel, considera-se então que a atenuação é espacial, sendo estas vistas como variações temporais para o receptor enquanto o mesmo se movimenta pelo campo de caminhos múltiplos. Como há um efeito construtivo ou destrutivo das ondas no receptor, pela soma de várias componentes em diferentes pontos do espaço, um receptor em alta velocidade passa por várias mudanças de atenuações em um período de tempo extremamente curto.

2.2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESVANECIMENTO

Dentre os fatores que influenciam o desvanecimento, destacam-se a existência de objetos refletoras e dispersores no ambiente, onde há uma constante mudança que dispersa a energia do sinal. A natureza aleatória da fase e da amplitude das várias componentes do multipercurso geram flutuações na intensidade do sinal, induzindo distorções e desvanecimento. O tempo exigido para a propagação em multipercurso é geralmente aumentado para que a banda básica do receptor possa alcançar o receptor, causando assim interferências entre os símbolos, e conseqüentemente, dificuldades na recepção do sinal.

Outro fator de grande influência é o movimento relativo entre as estações transmissora e receptora, o que resulta em uma modulação de frequência aleatória devido ao efeito Doppler. Esse efeito também é causado quando os objetos no canal estão em movimento, com a diferença de que o efeito Doppler será variável com o tempo sobre as componentes multipercurso. Caso os objetos estejam se movendo mais rápido que a estação receptora, o efeito desta será dominante. Se a estação móvel é mais rápida, o efeito Doppler dos objetos pode ser ignorado, pois não causará grande impacto no sinal.

Caso a largura de banda do sinal seja maior que a capacidade do canal de multipercurso, o sinal que será recebido pelo receptor terá uma distorção notável, mas seu desvanecimento não será significativo. Pode-se quantificar a capacidade do canal pela largura de banda de coerência, que está diretamente relacionada com a estrutura específica dos caminhos multipercurso. A largura de banda de coerência pode ser definida como uma medida de diferença da maior frequência em que os sinais ainda se encontram correlacionados em amplitude. Caso o sinal enviado tenha largura de banda estreita, a amplitude do sinal mudará rapidamente, mas não haverá distorção no tempo. O diagrama abaixo indica alguns tipos de desvanecimento encontrados.



2.2.2 EFEITO DOPPLER

Devido ao movimento relativo da estação base e a estação móvel, existem mudanças diferentes na frequência para cada caminho múltiplo criado. Quando a mudança ocorre na frequência do sinal, dado pelo movimento, essa variação é denominada deslocamento Doppler, sendo este diretamente proporcional à velocidade e a direção do movimento.

Considerando o receptor em movimento com relação ao transmissor. Se a linha direta entre as estações transmissora e receptora faz um ângulo θ com a direção de movimentação do receptor, A mudança de fase no sinal recebido por uma antena

receptora, devido a diferenças nos comprimentos dos caminhos é dada pela Equação (2):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v\Delta t}{\lambda} \cos\theta \quad (2)$$

Em que v é a velocidade de deslocamento. Assim, o deslocamento Doppler pode ser encontrado pela Equação (3):

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos\theta \quad (3)$$

A Equação (3) relaciona a velocidade de uma estação móvel com o deslocamento Doppler. Observa-se pela Equação 3 que caso a estação móvel realize movimentos em direção da chegada da onda, a consequência é um deslocamento Doppler positivo, aumentando assim a frequência aparente, caso a mesma estação estiver se afastando da onda, o deslocamento Doppler é negativo, causando o efeito contrário.

2.2.3 PARÂMETROS DOS CANAIS DE MULTIPERCURSO

Para que se possa haver uma comparação entre os mais diversos canais de multipercurso, foram criados alguns parâmetros que quantificam diferentes características desse tipo de canal.

➤ **Dispersão no tempo**

No tempo, as propriedades dos canais multipercurso podem se limitar ao atraso em excesso e ao espalhamento do atraso, que são parâmetros determinados para um perfil de atraso característico. A média de atraso é dada pela Equação (4):

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (4)$$

Em que $P(\tau_k)$ é o nível de potência absoluto, enquanto que τ_k são os tempos, começando a partir de $\tau_0 = 0$. O espalhamento do atraso RMS é definido pela Equação (5).

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (5)$$

É possível ainda determinar um equivalente no domínio da frequência por meio da transformada de Fourier. A largura de banda de coerência é utilizada para fazer essa

caracterização em frequência, de forma que o espalhamento de atraso rms e a largura de banda de coerência são inversamente proporcionais. A largura de banda de coerência, B_c , pode ser definida como uma medida de faixa de frequências em que o canal possui componentes espectrais uniformes, ou seja, com ganho constante e fase linear.

➤ **Espalhamento Doppler**

Visto que o espalhamento de atraso e a largura de banda de coerência caracterizam a natureza dispersiva do canal no tempo, resta saber informações sobre o que acontece com o canal devido ao movimento relativo entre a antena receptora e a antena transmissora. Este papel é cumprido pelo espalhamento Doppler e o tempo de coerência, responsáveis por detalhar a natureza variável no tempo do canal.

O espalhamento Doppler, B_d , é definido como uma medida da expansão espectral causada pela taxa de variação temporal da mudança do canal, e é determinado como a faixa de frequências na qual o espectro Doppler é diferente de zero. Já o tempo de coerência é o recíproco do espalhamento Doppler no domínio do tempo, sendo utilizado para detalhar a natureza variante com o tempo da dispersividade de frequências do canal no domínio do tempo. O espalhamento Doppler e o tempo de coerência são inversamente proporcionais entre si.

$$T_c = \frac{1}{f_m} \quad (6)$$

Em que T_c é o tempo de coerência, e f_m é o espalhamento Doppler máximo.

2.2.4 TIPOS DE DESVANECIMENTO

Combinando os vários parâmetros do canal com os diferentes parâmetros de sinais, pode-se chegar a diferentes tipos de desvanecimento. Os efeitos do espalhamento de atraso devido ao multipercurso são responsáveis pela atenuação uniforme e atenuação seletiva em frequência, enquanto que o espalhamento Doppler leva a dispersão em frequência e atenuação seletiva no tempo. O espalhamento de atraso e espalhamento Doppler são independentes um do outro e seus efeitos serão detalhados nas sessões que seguem.

➤ **Atenuação Uniforme**

Para um canal de ganho constante e fase linear, com largura de banda maior que a largura de banda do sinal transmitido, é dito que o sinal a ser recebido sofrerá uma atenuação uniforme. Nesse tipo de atenuação, as características espectrais do sinal são preservadas ao chegarem no receptor, entretanto, a intensidade é variável com o tempo. A Figura 5 mostra uma característica de atenuação uniforme.

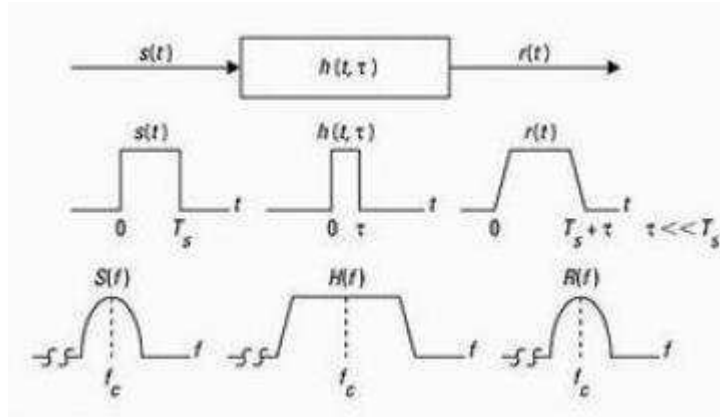


Figura 5: Característica de atenuação uniforme (fonte: Rappaport, 2008)

Como o ganho é variável com o tempo, há uma mudança de amplitude no sinal recebido, porém o espectro é conservado. Para esse tipo de atenuação, pode-se afirmar que:

$$B_s \ll B_c$$

$$T_s \gg \sigma_\tau$$

Em que T_s é a largura de banda recíproca, B_s é a largura de banda, σ_τ é o espalhamento de atraso rms e B_c é a largura de banda de coerência.

➤ Atenuação seletiva em frequência

Quando a largura de banda de banda do canal é menor que a largura de banda do sinal a ser transmitido, ocorre a atenuação seletiva em frequência. Com isso, há um espalhamento de atraso em multipercurso na resposta ao impulso do canal que é maior que a largura de banda recíproca da forma de onda transmitida. Esse efeito faz com que haja várias cópias da forma de onda enviada, atenuadas e atrasadas no tempo, distorcendo assim o sinal no receptor.

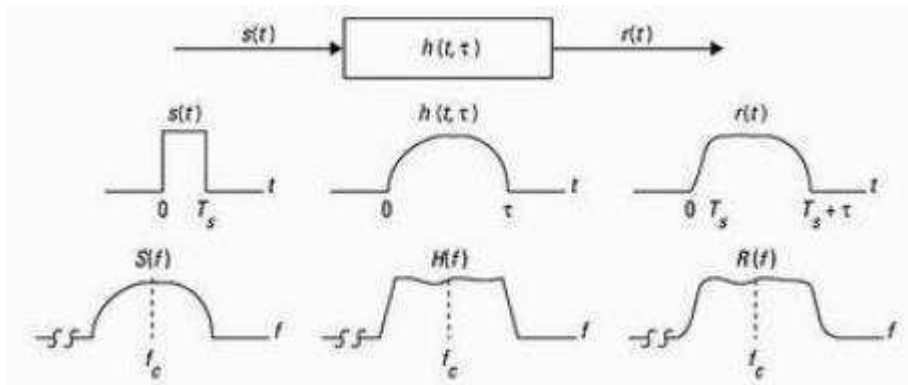


Figura 6: Característica de atenuação seletiva em frequência (fonte: Rappaport, 2008)

O canal que sofre com atenuação seletiva em frequência tem seu ganho e fase variando com o tempo, dentro do espectro, resultando numa distorção com o tempo no sinal visto pelo receptor. Nesse tipo de atenuação têm-se:

$$B_s > B_c$$

$$T_s < \sigma_\tau$$

➤ Atenuação rápida

Um canal pode ser ainda classificado como de atenuação rápida ou lenta, de acordo com a taxa de variação que o sinal de banda base se altera quando comparado com a taxa de mudança do canal. Para atenuação rápida, a resposta do impulso do canal muda rapidamente dentro da duração do símbolo. Isso significa que o período de símbolo do sinal enviado é maior que o tempo de coerência do canal, causando então dispersão em frequência devido ao espalhamento Doppler. Pode-se resumir a atenuação rápida por:

$$T_s > T_c$$

$$B_s < B_D$$

Em que T_c é o tempo de coerência e B_D é a largura de banda Doppler.

➤ Atenuação lenta

Ao contrário da atenuação rápida, há uma mudança mais lenta da resposta ao impulso do canal, face à banda base do canal transmitido. O canal pode ser tido então

como estático em alguns intervalos de largura de banda recíproca. Para o domínio da frequência, o espalhamento Doppler do canal é muito menor que a largura de banda do sinal de banda base. Resumindo, pode-se dizer que:

$$T_s \ll T_c$$

$$B_s \gg B_D$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar os objetivos do presente trabalho, foram conduzidos experimentos no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do Instituto Federal da Paraíba, campus João Pessoa. Para produzir o sinal de TV no padrão ISDB-TB, foi utilizado o software Virtual Studio, da Keysight. Este software permite alterar os diversos parâmetros do padrão ISDB-TB, a partir de um arquivo de imagem no padrão JPEG, além de escolher o canal de RF, nível de potência e configuração dos segmentos do sistema. O arquivo de saída é utilizado no emulador de canal e gerador de banda básica PXB, mostrado na Figura 7, que permite simular a degradação o sinal da maneira que o usuário deseja.

O emulador PXB permite emular diversas situações consideradas como ruído na transmissão, e funciona com diversas configurações de transmissão, que incluem uma entrada e uma saída (SISO), uma entrada e duas saídas (SIMO), duas entradas e uma saída (MISO) e duas entradas e duas saídas (MIMO). Em todas as configurações é possível incluir efeitos de propagação, como variação da Relação Sinal Ruído – RSR, caminhos múltiplos, efeito Doppler ou ainda utilizar alguns modelos de canal pré-existentes. O equipamento utilizado possui licença para geração de sinais do sistema ISDB-Tb, WCDMA e LTE. Ressalta-se que este equipamento não possui saída de RF. Toda emulação é realizada em banda básica.

Os parâmetros escolhidos pelo usuário no PXB são entregues ao gerador de sinais EXG, mostrado na Figura 8, que produz na saída o sinal na frequência selecionada e contaminado pelo ruído programado pelo emulador. Os casos estudados envolvem a variação da relação sinal-ruído, variação de velocidade para verificação do efeito Doppler, no caso dos receptores em deslocamento e, por fim, foi estudado o efeito

de multipercursos, considerando o espalhamento Rayleigh (onde não há visada entre Tx e Rx) para os atrasos de percursos definidos pelo IUT para o sistema ISDB-Tb.



Figura 7: Emulador de canal PXB da Keysight, (fonte: Keysight).

O sinal emulado no PXB, e produzido no gerador EXG, com uma antena ligada à sua saída, pode ser observado num receptor de TV digital, sintonizado no mesmo canal de transmissão. Dessa forma, é possível observar a qualidade da imagem em função dos parâmetros que podem ser variados no software, como por exemplo, o tipo de modulação, que pode ser 64QAM, 32QAM, dentre outras.



Figura 8: Gerador de sinais EXG. (fonte: Keysight).

Além da qualidade visual, é possível medir os parâmetros da transmissão com o uso do analisador de modulação MXA, que pode funcionar no modo de Analisador de Espectro ou de Constelação. Dessa forma parâmetros como BER, MER, erro de fase, dentre outros podem ser medidos diretamente no equipamento, além de visualizar o espectro ou a constelação da modulação transmitida pelo gerador de sinais. O analisador MXA pode ser visto na Figura 7.



Figura 9: Analisador de modulação MXA. (fonte: Keysight).

Usando todo o setup mostrado acima, foram realizados diversos experimentos a fim de analisar o desempenho da transmissão de TV digital nas modulações 16QAM e 64QAM. Para dar mais realismo ao experimento conduzido, foram utilizados modelos de canais brasileiros descritos nas Tabelas de 1 a 5, especificados pelo ITU.

Tabela 1: Modelo de Canal Brasil A, (ITU).

Atraso (μs)	Amplitude (dB)	Doppler (Hz)
0	0	0
0,15	-13,8	0 (100)
2,22	-16,2	0
3,05	-14,9	0
5,86	-13,6	0
5,93	-16,4	0

Tabela 2: Modelo de Canal Brasil B, (ITU).

Atraso (μs)	Amplitude (dB)	Doppler (Hz)
0	0	0
0,3	-12	0
3,50	-4	0 (10)

4,4	-7	0
9,50	-15	0
12,7	-22	0

Tabela 3: Modelo de Canal Brasil C, (ITU)

Atraso (μs)	Amplitude (dB)	Doppler (Hz)
0	-2,8	0
0,089	0	0
0,419	-3,8	0
1,506	-0,1	0
2,322	-2,5	0
2,799	-1,3	0

Tabela 4: Modelo de Canal Brasil D, (ITU)

Atraso (μs)	Amplitude (dB)	Doppler (Hz)
0,15	-0,1	0 (10)
0,63	-3,8	0
2,22	-2,6	0
3,05	-1,3	0
5,86	0	0
5,93	-2,8	0

Tabela 5: Modelo de Canal Brasil E, (ITU)

Atraso (μs)	Amplitude (dB)	Doppler (Hz)
0	0	0
1	0	0
2	0	0

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DO DIAGRAMA DE CONSTELAÇÃO E ESPECTRO.

Como um primeiro resultado, os perfis de atrasos apresentados na seção anterior foram inseridos no emulador de canal PXB, obtendo o espectro do sinal e o diagrama de constelação para cada um dos modelos de canal brasileiro, sendo estas analisadas no analisador de modulação MXA. Para efeitos de comparação, foram medidos inicialmente a constelação e o espectro para cada modulação sem os efeitos de desvanecimento no canal. Os resultados para a constelação 16QAM, espectro 16QAM, constelação 64QAM e espectro 64QAM são mostrados nas Figuras 10, 11, 12 e 13 respectivamente. Para cada sinal gerado o vídeo é transmitido em duas modulações (QPSK e XQAM), além dos pilotos de sincronismo. Em seguida, são apresentados os resultados do diagrama de constelação e espectro para cada um dos perfis de atraso apresentados na seção anterior, considerando as modulações 16QAM e 64QAM. Os resultados são mostrados a seguir nas Figuras de 14 a 33.

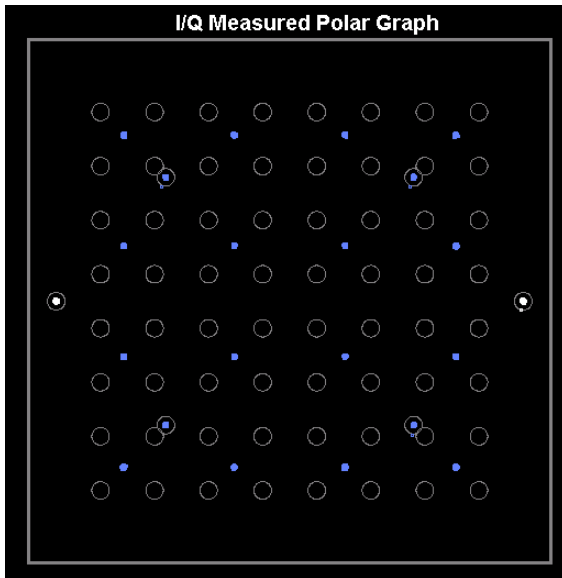


Figura 10: Constelação 16QAM sem desvanecimento, (Elaborado pelo autor).

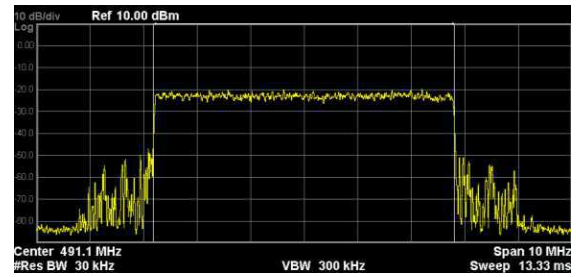


Figura 11: Espectro 16QAM sem desvanecimento, (Elaborado pelo autor).

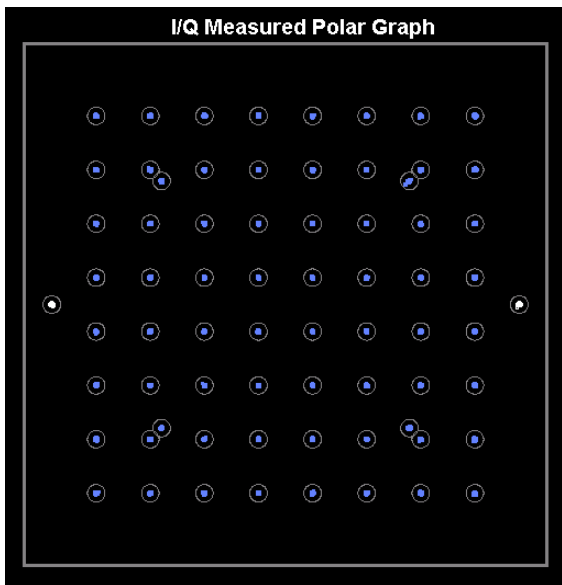


Figura 12: Constelação 64QAM sem desvanecimento, (Elaborado pelo autor).

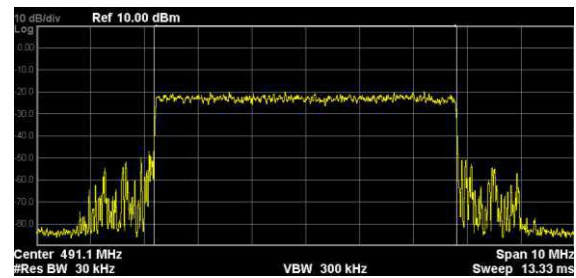


Figura 13: Espectro 64QAM sem desvanecimento, (Elaborado pelo autor).

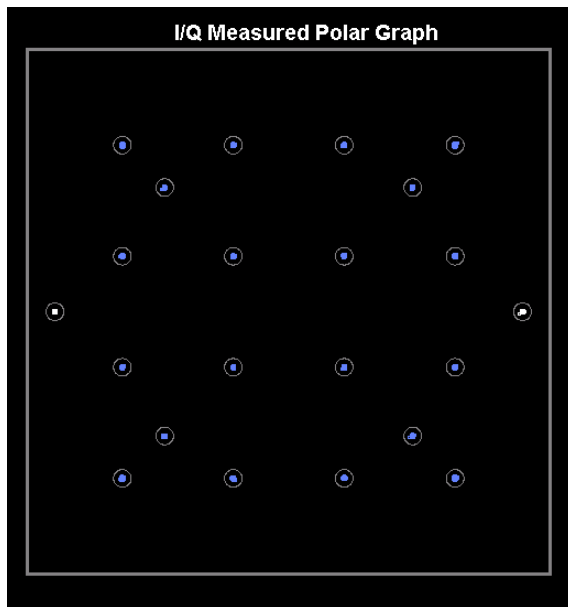


Figura 14: Constelação 16QAM modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).

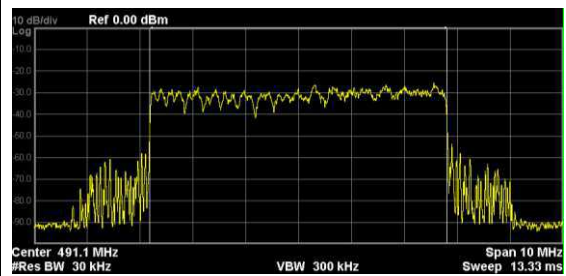


Figura 15: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).

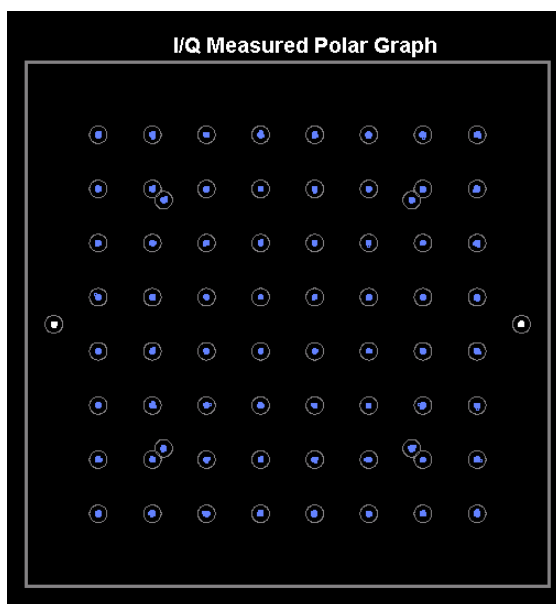


Figura 16: Constelação 64QAM modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).

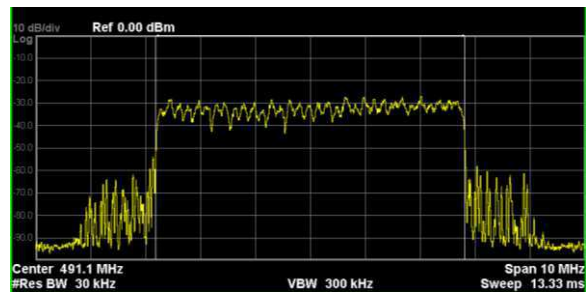


Figura 17: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).

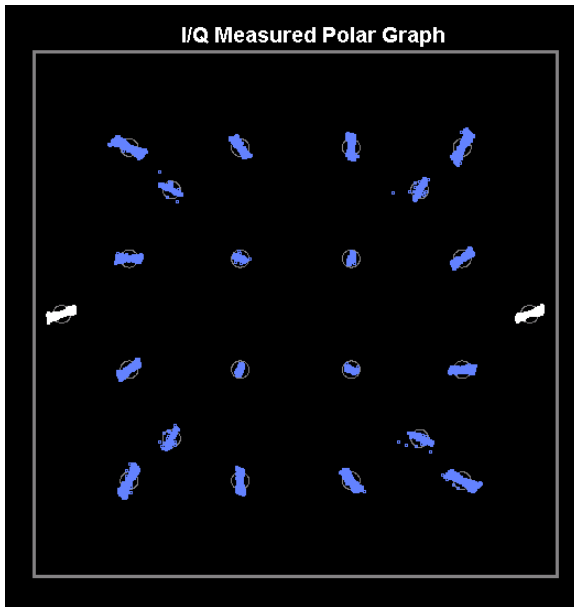


Figura 18: Constelação 16QAM modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).

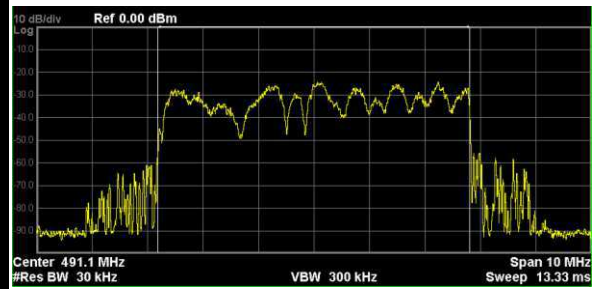


Figura 19: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).

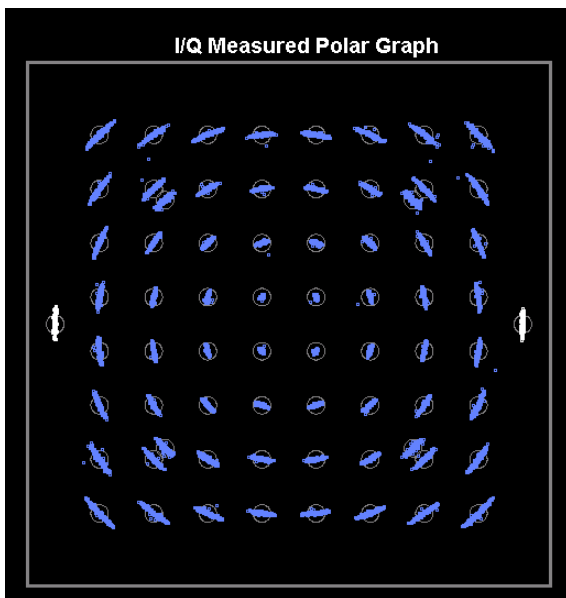


Figura 20: Constelação 64QAM modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).

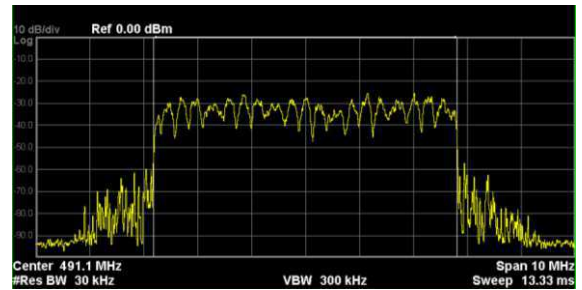


Figura 21: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).

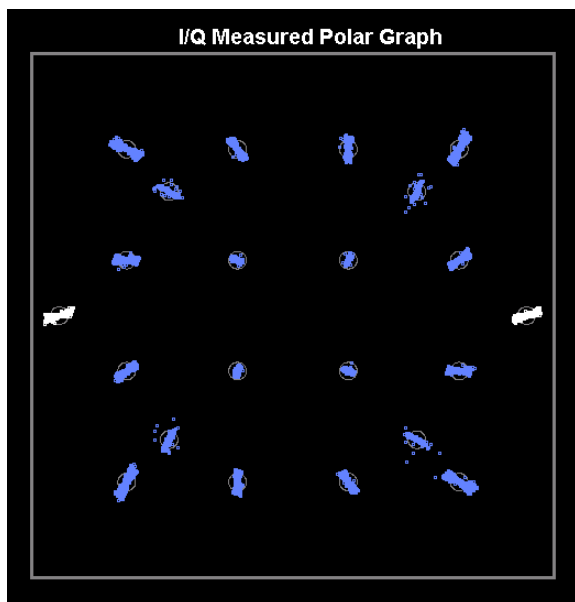


Figura 22: Constelação 16QAM modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).

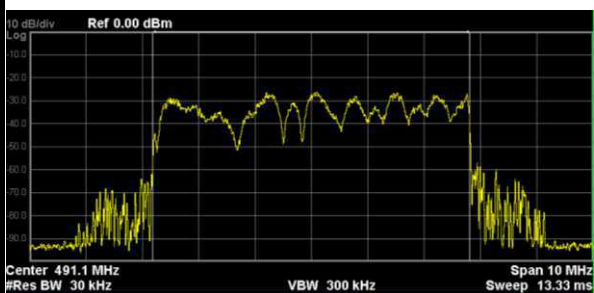


Figura 23: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).

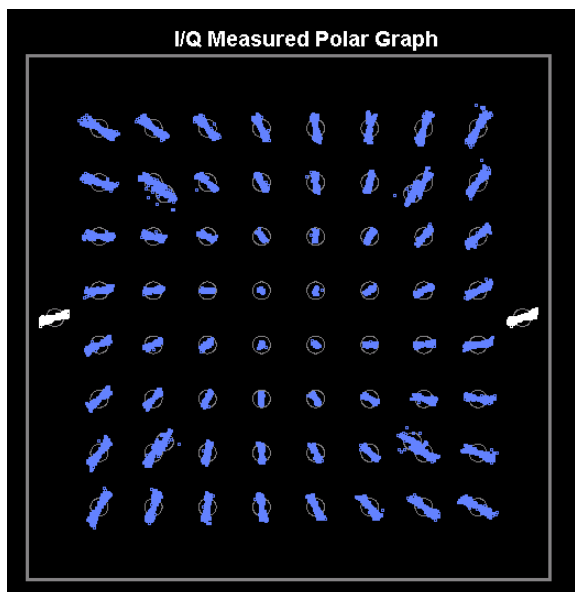


Figura 24: Constelação 64QAM modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).

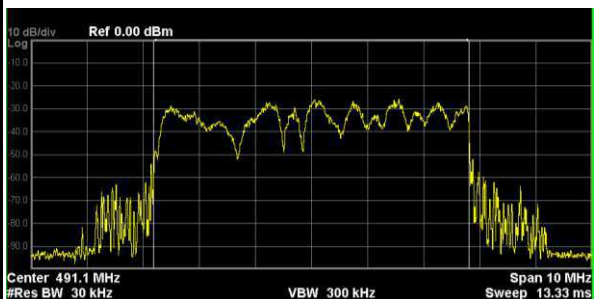


Figura 25: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).

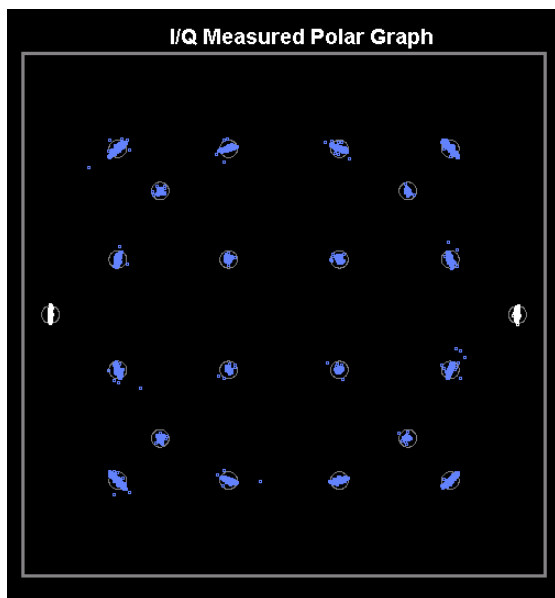


Figura 26: Constelação 16QAM modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).

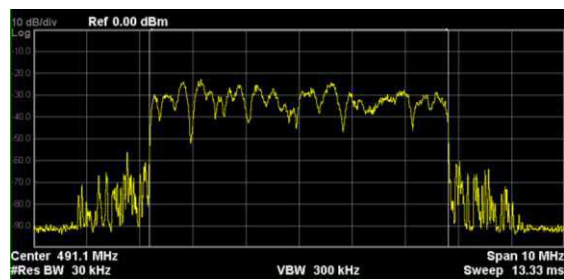


Figura 27: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).

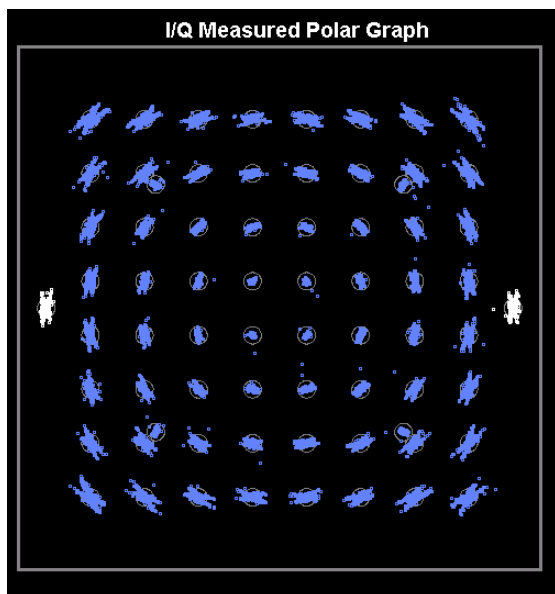


Figura 28: Constelação 64QAM modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).

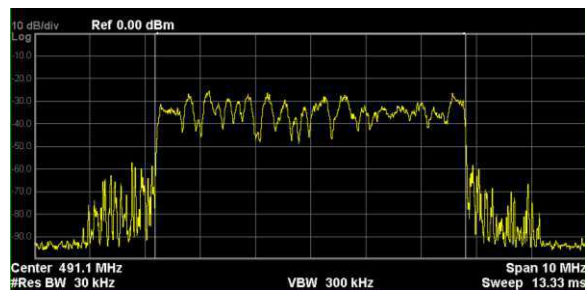


Figura 29: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).

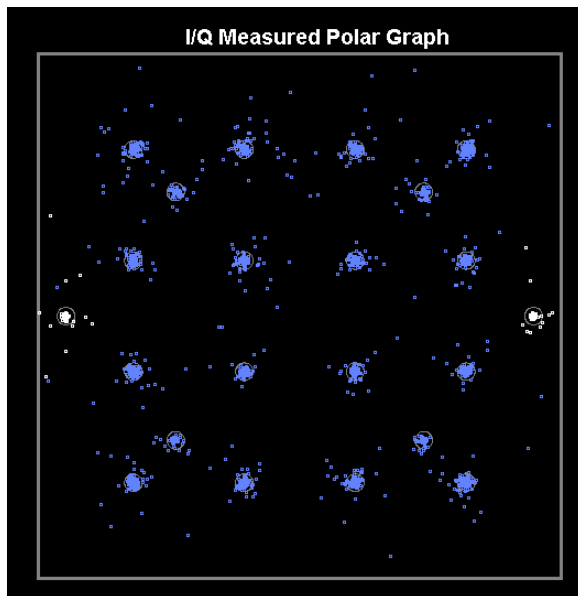


Figura 30: Constelação 16QAM modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).

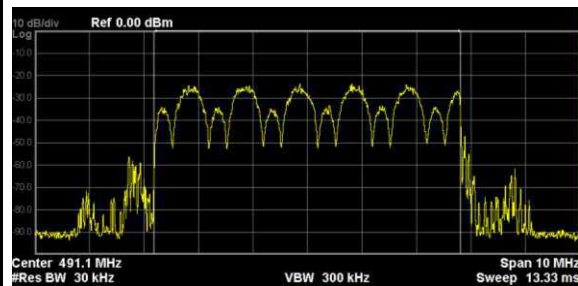


Figura 31: Espectro de potência para modulação 16QAM modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).

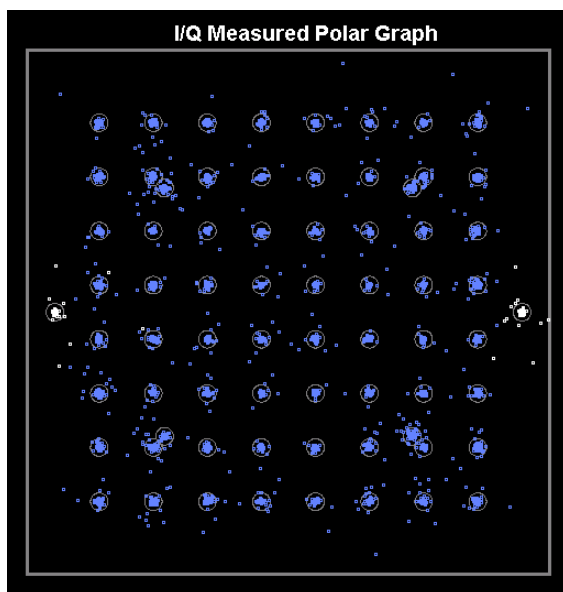


Figura 32: Constelação 64QAM modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).

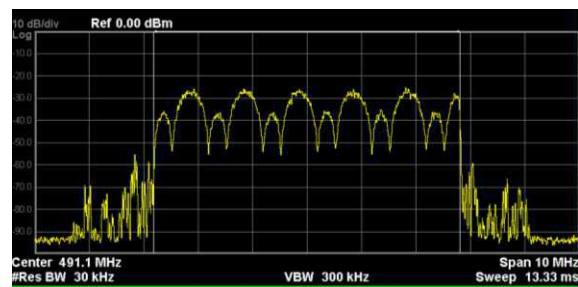


Figura 33: Espectro de potência para modulação 64QAM modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).

Observa-se pelas duas constelações do modelo Brasil A, apresentadas nas Figuras 14 e 16, que a modulação conseguiu superar os efeitos de desvanecimento colocados no emulador de canal. Os espectros mostrados nas Figuras 15 e 17 também apresentam pouca variação nas amplitudes das portadoras quando comparadas com o modelo sem desvanecimento, que representa que o desvanecimento tem uma pequena variação em função da frequência. Mesmo assim, a transmissão foi satisfatória, com um mínimo de interferência intersimbólica. Isso se deve principalmente devido a método de transmissão com multiportadoras OFDM, significando que o número de portadoras utilizado foi suficiente para ter uma transmissão satisfatória. O efeito Doppler agiu no canal de forma desprezível.

Diferente do que acontece no primeiro modelo apresentado, a transmissão feita no modelo Brasil B não obteve o mesmo sucesso. Pode-se observar um erro de amplitude e fase na modulação 16QAM, da Figura 18, e um erro de fase predominante na modulação 64QAM, da Figura 20. Também pode ser observada uma considerável dependência da amplitude das diversas portadoras OFDM em função da frequência (desvanecimento seletivo) como apresentados nas Figuras 19 e 21, quando comparado com o espectro sem desvanecimento, nas Figuras 11 e 13, o que sugere o uso de equalização na transmissão em canais com esse perfil.

A constelação para a modulação da Figura 22, no modelo Brasil C, se mostra muito parecida com a mesma configuração para o canal do modelo B, apresentando apenas alguns erros de símbolos. Já a constelação para modulação 64QAM, apresentada na Figura 24, demonstra, além do erro de fase apresentado no modelo B, um erro de amplitude. Observa-se também que o comportamento do espectro da modulação 16QAM, na Figura 23, é muito semelhante ao espectro apresentado no modelo Brasil B, na figura 19, indicando que os dois sofrem os mesmos efeitos. O mesmo não ocorre no espectro da modulação 64QAM, apresentada na Figura 25, que repete os efeitos mostrados na Figura 23, do mesmo modelo Brasil C, porém em 16QAM.

O modelo Brasil D apresenta na Figura 26, com modulação 16QAM, um comportamento estável, mas com alguns símbolos espalhados pela constelação, além de um leve erro de fase. O mesmo não acontece para a modulação 64QAM, mostrada na Figura 28, que apresenta um erro de fase acentuado, porém sem erros de amplitude. Os espectros apresentados nas Figuras 27 e 29 possuem ruídos semelhantes.

Observa-se nas duas constelações mostradas nas Figuras 30 e 32, para o modelo Brasil E, que não há erros de amplitude ou de fase evidente, porém há um espalhamento de símbolos por toda constelação, aumentando a taxa de colisão de símbolos. Os espectros mostrados nas Figuras 31 e 33 indicam que as transmissões sofrem de um desvanecimento seletivo em frequência. Esse resultado é esperado, tendo em vista as elevadas amplitudes de cada componente em atraso que caracteriza esse perfil.

Depois de avaliadas as constelações e espectros para cada modelo, foi realizada uma comparação da MER para diferentes valores da relação sinal ruído, considerando as duas modulações. Os gráficos são apresentados nas Figuras de 34 a 38.

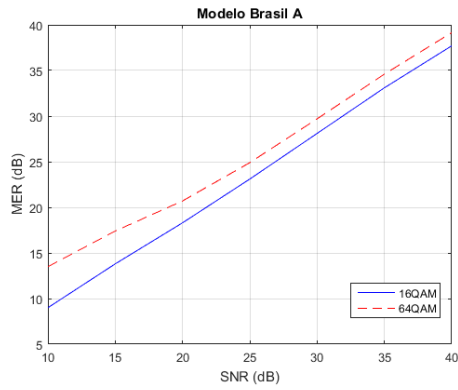


Figura 34: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil A, (Elaborado pelo autor).

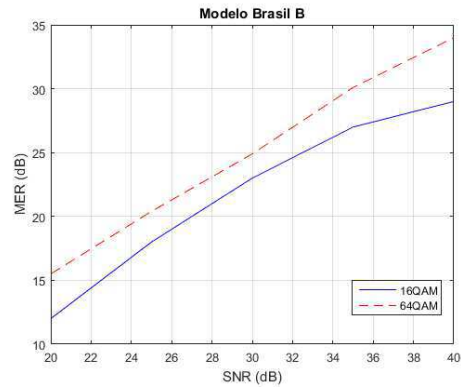


Figura 35: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil B, (Elaborado pelo autor).

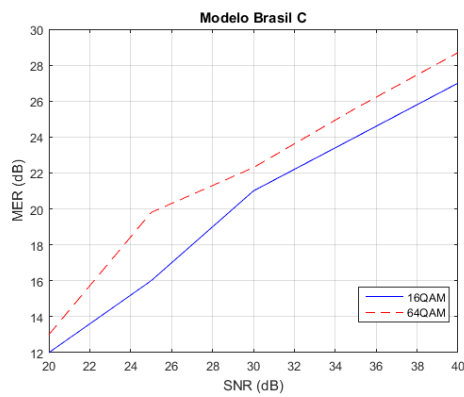


Figura 36: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil C, (Elaborado pelo autor).

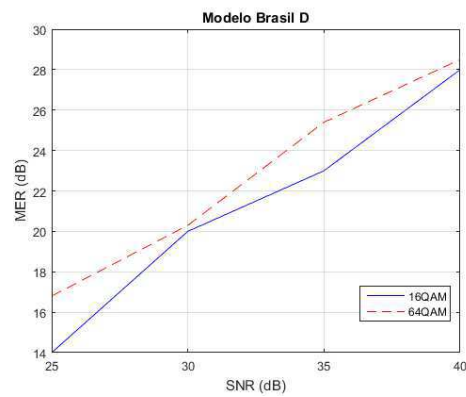


Figura 37: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil D, (Elaborado pelo autor).

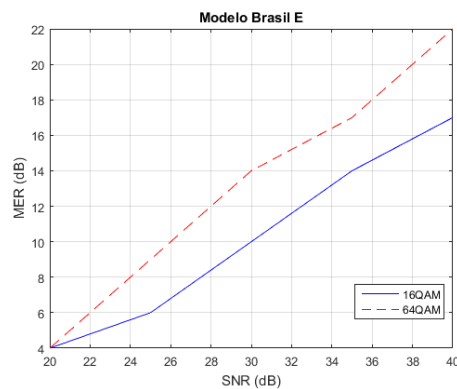


Figura 38: MER obtida pela variação da relação sinal ruído para o modelo Brasil E, (Elaborado pelo autor).

Pelo gráfico mostrado na Figura 34, é possível observar que ambas as modulações possuem um comportamento quase linear. Como era esperada, a modulação 16QAM apresenta menor erro de modulação (maior robustez) para uma mesma relação sinal ruído.

A Figura 35 apresenta um comportamento atípico da modulação 16QAM, em que a MER apresenta um comportamento não linear após 35 dB. Os valores obtidos para o modelo B se encontram abaixo dos valores da MER do modelo Brasil A. Esse resultado também pode ser verificado devido a diferença no comportamento da variação das amplitudes em função da frequência para cada amplitude para este caso, mostradas nas Figuras 19 e 21.

Para o modelo Brasil C, mostrado na Figura 36, podem-se observar curvas bem mais não lineares que os dois modelos apresentados anteriormente. A modulação 64QAM mostra uma suavização na curva após 25 dB, enquanto que o mesmo acontece para a modulação 16QAM somente após 30 dB.

A Figura 27 apresenta o comportamento mais instável entre a relação MER x RSR dentre os gráficos mostrados. Nota-se que em alguns pontos a MER chega a ser quase a mesma para uma mesma relação sinal-ruído.

O gráfico da figura 32 apresenta resultados bem diferentes para as duas modulações, em que a modulação 64QAM mostra resultados melhores para uma mesma relação sinal-ruído.

De toda forma, em todos os casos foi obtido um maior valor da MER para a modulação 64 QAM, indicando que a amplitude média dos símbolos é maior que a média dos erros de símbolo para este tipo de modulação.

4.2 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Também foi verificado a robustez do ISBD-Tb para o caso da transmissão considerando que o receptor se move com determinada velocidade. Neste caso, foram anulados os efeitos de multipercuso e considerada apenas uma componente em visada, com variação da velocidade, resultando num erro de frequência recebida. O resultado para esta variação é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Erro de frequência para diferentes velocidades, (Elaborado pelo autor).

Velocidade (Km/h)	Erro de frequência (Hz)	
	16QAM	64QAM
0,00	-8,3	-7,64
20,00	0,9	1,4
40,00	10,1	10,49
60,00	19,1	19,53
80,00	28,3	28,73
100,00	37,4	37,81
120,00	46,48	46,88
140,00	55,6	56,05
160,00	64,7	65,14
180,00	73,8	74,2
200,00	82,9	83,39

Como esperado, observando a Equação (3), um aumento na velocidade relativa do receptor aumenta o desvio de frequência do sinal recebido em qualquer uma das modulações. A tabela 6 mostra que o aumento da velocidade aumenta o deslocamento Doppler e conseqüentemente, há um aumento do erro de frequência no receptor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma verificação da qualidade da transmissão da TV digital em ambientes com desvanecimento, considerando diferentes características de canais existentes no Brasil. Para isso, foram revistos alguns conceitos, iniciando o capítulo dois com uma apresentação sobre o padrão ISDB-Tb utilizado no Brasil, mostrando um diagrama de camada física para codificação de canal e o sistema OFDM com multiportadoras e seus diferentes modos. Alguns conceitos de modulação QAM foram mostrados posteriormente, apresentando um exemplo de diagrama de constelação resultante quando se usa esse tipo de modulação. Por último, foram apresentados os efeitos de propagação passíveis de acontecer em transmissões digitais, mostrando os tipos comuns de atenuação e algumas causas para tal efeito.

Após a base teórica, foi mostrado o *setup* empregado para realização dos experimentos. A configuração consiste no software Digital Studio conectado a um emulador de canal PXB, um gerador de sinais EXG e um analisador de modulação MXA para análise dos diagramas de constelação. Foram então emulados os modelos de canais brasileiros caracterizado pelo ITU no PXB, para dar mais realismo ao experimento.

Nos resultados apresentados no capítulo 4, pôde-se observar que o modelo Brasil A não foi tão afetado pelas componentes de atraso, apresentando um diagrama de constelação muito semelhante à constelação sem efeitos de desvanecimento. O modelo Brasil B apresentou erro de fase e amplitude nos diagramas apresentados, além de um espectro onde era visível o desvanecimento seletivo. O modelo Brasil C se assemelha muito com o modelo Brasil B, porém a modulação 64QAM segue os mesmos efeitos da modulação 16QAM. O modelo Brasil D se apresenta de forma estável para modulação 16QAM, no entanto exibe um erro de fase acentuado para modulação 64QAM. Não há erros evidentes de fase e amplitude no modelo Brasil E, porém, o espalhamento de símbolos no diagrama de constelação indica que há um erro de codificação. Os espectros indicam claramente um desvanecimento seletivo em frequência.

O próximo resultado apresentado no capítulo 4 consiste em uma série de gráficos exibindo diferentes valores da MER considerando uma variação da relação

sinal-ruído para cada modelo proposto. Observa-se que de forma geral, a modulação 64QAM desenvolve melhores valores da MER, indicando que a intensidade média dos símbolos é maior que a média dos erros para essa modulação. Finalmente, foi avaliada a robustez do padrão brasileiro de TV digital para variações de velocidade. Verifica-se que o aumento da velocidade aumenta o erro de frequência para ambas às modulações consideradas, o que é um resultado esperado já que o deslocamento Doppler é proporcional à velocidade relativa.

Considerando todos os resultados descritos acima, nota-se que o padrão brasileiro de TV digital, ISDB-Tb, é um sistema robusto e capaz de superar grande parte dos efeitos de canal mostrados neste trabalho. Uma sugestão para que se obtenha uma transmissão de qualidade é a equalização diferencial para cada componente de frequência no transmissor, visto que a maioria dos modelos de canais apresentados sofrem desvanecimento seletivo em frequência.

A continuação dessa linha de pesquisa é sugerida devido aos bons resultados apresentados no presente trabalho. Como sugestão de trabalho, pode-se observar qual o limiar da relação sinal-ruído para transmissão de TV digital, tendo em conta cada modelo de canal brasileiro.

6 Bibliografia

- [1] L. L. Mendes, “SBTVD - Uma Visão Sobre a TV Digital no Brasil,” *T&C Amazônia*, vol. V, nº 12, pp. 48-58, 2007.
- [2] M. Andrade, Utilização do Analisador de Sinais MXA N9020A, João Pessoa - PB: Estágio supervisionado realizado no Instituto Federal da Paraíba, 2016.
- [3] M. Andrade, Utilização do Emulador de Canais e Gerador em Banda Básica PXB N5106A, João Pessoa - PB: Estágio Supervisionado realizado no Instituto Federal da Paraíba, 2016.
- [4] T. S. Rappaport, Comunicações sem fio: princípios e práticas, Prentice Hall Brasil, 2009.
- [5] C. A. Alexandre Kioshi Ishini, “Técnicas de Estimação de Canal para o Sistema ISDB-Tb,” *Revista de Radiodifusão*, vol. 03, nº 03, pp. 151-157, 2009.
- [6] PUC-Rio, “Sistema Brasileiro de TV Digital - SBTVD / ISDB-T,” *PUC Rio - Certificação Digital Nº 0912883/CA*.
- [7] J. S. Seybold, Introduction to RF Propagation, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [8] L. F. A. T. R. G. H. d. S. Luis Augusto Santin Ganchar, “Linhas para Criação de uma Emissora de TV Digital,” Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- [9] D. M. M. d. S. Lopes, “Sistema Brasileiro de TV Digital: Caminhos Percorridos e Implantação,” *Intercom - Sociedade Brasileira de Estudos Interdisciplinares da Comunicação*, 2007.
- [10] R. I.-R. BT.2035, “Guidelines and techniques for the evaluation of digital terrestrial television broadcasting systems,” 2003.
- [11] W. E. L. C. F. d. R. Cesar V. Vargas, “Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO - OFDM,” *ActaNova*, vol. 3, nº 4, 2007.
- [12] A. Megrich, Televisão Digital, São Paulo: Editora Érica Ltda, 2009.