



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS – IFAM
CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL
CURSO TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES**

NATAN FREITAS IZEL PASSOS

**SISTEMA DE TV DIGITAL: ANÁLISE DA QUALIDADE DO SINAL DE TV
ABERTA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NO MATLAB**

**MANAUS/AM
2024**

NATAN FREITAS IZEL PASSOS

**SISTEMA DE TV DIGITAL: ANÁLISE DA QUALIDADE DO SINAL DE TV
ABERTA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NO MATLAB**

Trabalho de Conclusão de curso submetido ao curso de graduação em Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro.

**MANAUS/AM
2024**

Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Distrito Industrial

- P289s Passos, Natan Freitas Izel
 Sistema de TV digital: uma análise da qualidade do sinal de TV aberta através
 de simulação no Matlab. / Natan Freitas Izel Passos. – Manaus, 2024.
 42f.: il. Color.
- Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e
 Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia
 em Sistemas de Telecomunicações, 2024.
 Orientador: Prof. ° Celso Souza Cordeiro
1. Televisão digital. 2. ISDB-T. 3. Qualidade de sinal. 4. Simulação
 MATLAB. 5. Inclusão digital I. Cordeiro, Celso Souza. II. Instituto Federal de
 Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.

CDD 621.382

ATA DE DEFESA PÚBLICA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 18 dias do mês de dezembro de 2024, de 19:30h às 20:30h, o(a) discente **NATAN FREITAS IZEL PASSOS**, apresentou o seu Trabalho de Conclusão de Curso para avaliação da Banca Examinadora constituída pelos seguintes integrantes: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro (docente-orientador), Prof. Me. Jonatas Micael Vieira de Lima (Membro 1) e Prof. Esp. Ewerton Andrey Godinho Ribeiro (Membro 2). A sessão pública de defesa foi aberta pelo(a) presidente da banca, que apresentou a Banca Examinadora e deu continuidade aos trabalhos, fazendo uma breve referência ao TCC, que tem como título " **SISTEMA DE TV DIGITAL: ANÁLISE DA QUALIDADE DO SINAL DE TV ABERTA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NO MATLAB**".

Na sequência, o(a) discente teve até 30 minutos para a comunicação oral de seu trabalho. Cada integrante da banca examinadora fez suas arguições após a defesa do mesmo. Ouvidas as explicações do(a) discente, a banca examinadora, reunida em caráter sigiloso, para proceder à avaliação final, deliberou e decidiu pela **APROVAÇÃO** com média final 9,2 (nove e dois) do referido trabalho.

Foi dada ciência ao(à) discente que a versão final do trabalho deverá ser entregue até o dia 27 / 12 / 2024, com as devidas alterações sugeridas pela banca. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às 20 h 30 min, sendo lavrada a presente ata, que, uma vez aprovada, foi assinada por todos os membros da Banca Examinadora e pelo(a) discente.

Prof.(a) Orientador(a)/Presidente: _____

Prof.(a) Avaliador 1: _____

Prof.(a) Avaliador 2: _____

Discente: _____

(Handwritten signatures in blue ink)
Cordeiro
Jonatas Micael Vieira de Lima
Ewerton Andrey Godinho Ribeiro
Natan Freitas Izel Passos

Dedico com profundo afeto e gratidão a todos que, de alguma forma, compartilharam deste sonho e tornaram esta conquista possível. À minha querida família, em especial aos meus pais, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo amor incondicional e apoio nos momentos mais difíceis. Sua força e dedicação foram fundamentais para que eu pudesse trilhar este caminho. Aos meus amigos e colegas da faculdade, com quem dividi desafios, vitórias e aprendizados, que tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora. E, principalmente, dedico àqueles que acreditaram em mim, que me incentivaram a nunca desistir, pois sem o suporte, a confiança e a motivação de cada um, este sonho jamais teria se concretizado.

AGRADECIMENTOS

Ao longo da minha trajetória, aprendi a valorizar a importância da autonomia, mas também reconheci que o apoio e a colaboração de outras pessoas são fundamentais para alcançar grandes conquistas. Este trabalho, em particular, só se tornou possível graças à ajuda e presença de pessoas queridas que me acompanharam em cada etapa dessa caminhada.

Primeiramente, agradeço a Deus, por guiar meus passos e me fortalecer em cada desafio que enfrentei ao longo desta jornada. Sua presença foi essencial para que eu mantivesse a fé e a determinação em seguir em frente.

Aos meus professores, expesso meu mais sincero agradecimento. Seu compromisso em transmitir conhecimento e orientar com sabedoria foi fundamental para que este projeto pudesse ser desenvolvido com sucesso. Aos meus colegas, agradeço por cada momento de troca, incentivo e aprendizado compartilhado. Vocês me desafiaram a crescer e me ajudaram a expandir meus horizontes acadêmicos.

Minha gratidão profunda vai à minha família, que sempre esteve ao meu lado com paciência, amor e compreensão. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada sacrifício feito por vocês foram cruciais para que eu pudesse chegar até aqui. Sem vocês, esse sonho não teria se tornado realidade.

Por fim, a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste projeto, meus sinceros agradecimentos. Cada ajuda, direta ou indireta, fez a diferença e possibilitou que este trabalho fosse concluído com êxito.

.

A verdadeira motivação vem de realização,
desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e
reconhecimento.

(Frederick Herzberg)

Resumo

A televisão digital aberta é um meio essencial para a inclusão social e o acesso à informação no Brasil, especialmente em áreas remotas. Com a adoção do padrão ISDB-T, foram realizados avanços significativos em qualidade de imagem e som. No entanto, desafios ainda persistem na transmissão de sinais estáveis, particularmente em regiões rurais e urbanas densamente povoadas, onde a topografia e a infraestrutura podem comprometer a recepção. Este estudo investiga, por meio de simulações no MATLAB, os principais fatores que influenciam a qualidade do sinal de TV digital. Elementos como a topografia, as condições climáticas e obstruções físicas serão analisados para compreender sua influência na propagação do sinal. O objetivo é desenvolver um modelo que identifique as causas da degradação do sinal e proponha soluções para mitigar esses problemas, assegurando uma recepção mais confiável para todos. A metodologia combina simulação e análise estatística para avaliar a intensidade e a qualidade do sinal em diferentes cenários. Os resultados esperados são relevantes para acadêmicos, formuladores de políticas e emissoras de TV, oferecendo recomendações para otimizar a transmissão do sinal digital e promover a inclusão e o desenvolvimento social no Brasil.

Palavras-chave: Televisão digital, ISDB-T, qualidade de sinal, simulação MATLAB, inclusão digital.

ABSTRACT

Digital open television is an essential means of social inclusion and access to information in Brazil, particularly in remote areas. With the adoption of the ISDB-T standard, significant advancements have been made in image and sound quality. However, challenges persist in transmitting stable signals, especially in rural and densely populated urban areas where topography and infrastructure can compromise reception. This study investigates, through MATLAB simulations, the main factors influencing the quality of digital TV signals. Elements such as topography, weather conditions, and physical obstructions will be analyzed to understand their impact on signal propagation. The aim is to develop a model that identifies the causes of signal degradation and proposes solutions to mitigate these issues, ensuring more reliable reception for all. The methodology combines simulation and statistical analysis to assess signal intensity and quality across different scenarios. The expected results are relevant for academics, policymakers, and TV broadcasters, providing recommendations for optimizing digital signal transmission and promoting inclusion and social development in Brazil.

Keywords: *Digital television, ISDB-T, signal quality, MATLAB simulation, digital inclusion.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- diagrama de um sinal de televisão digital	23
Figura 2- Simulação BER vs SNR.....	34
Figura 3 - Gráfico da constelação com ruído.....	36
Figura 4 - Constelação multipercurso	38

LISTA DE SIGLAS

Abert - Associação Brasileira das Emissoras de Rádio e TV

ACATS - Advisory Committee on Advanced Television

AM - Amplitude Modulation

Anatel - Agência Nacional de Telecomunicações

ATSC - Advanced Television Systems Committee

BTS - Broadcasting Transport Stream

Contel - Conselho Nacional de Telecomunicações

DVB - Digital Video Broadcasting

Embratel - Empresa Brasileira de Telecomunicações

ERP - Effective Radiated Power

ETM - Estação Transportável de Monitoração do Espectro

EUA - Estados Unidos da América

FDM - Frequency Division Multiplexing

FM - Frequency Modulation

HD-MAC - High Definition - Multiplexed Analogue Components

ISDB - Integrated Services Digital Broadcasting

ISDB-T - Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial

ITU-R - International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector

MAC - Multiplexed Analogue Components

MPEG - Moving Picture Experts Group

MUSE - Multiple Sub-Nyquist Sample Encoding

NTSC - National Television System Committee

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. METODOLOGIA.....	15
3. Objetivos.....	16
3.1. Geral	16
3.2. Específicos	16
4. PROBLEMA	17
5. JUSTIFICATIVA.....	17
6. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
7. Importância da Simulação no Contexto de TV Digital	24
8. Modelos de Cenários no MATLAB	25
9. Resultados Encontrados.....	33
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

Sem dúvidas é correto dizer que a televisão (TV) é um dos principais meios de comunicação no Brasil, desempenhando um papel essencial na integração nacional, na difusão de informações e no entretenimento. Em um país de dimensões continentais, como o Brasil, a TV tem um impacto significativo, não apenas ao levar conteúdo para regiões urbanas e rurais, mas também ao servir como uma importante formadora de opinião, especialmente em questões políticas (BORBA, 2011).

Ao longo do tempo, o sistema televisivo passou por diversas inovações tecnológicas para melhorar a experiência do espectador. Entre essas, destaca-se o desenvolvimento da TV em cores e a constante busca por melhor qualidade de áudio e vídeo. As indústrias audiovisuais gradualmente migraram de equipamentos analógicos para digitais, buscando maior qualidade e eficiência (LOPES, 2007). Nos anos 1980, com a chegada das tecnologias de alta definição, diferentes países começaram a desenvolver padrões próprios de televisão digital. Estados Unidos, Europa e Japão lançaram, respectivamente, o ATSC (Advanced Television Systems Committee), o DVB (Digital Video Broadcasting) e o ISDB (Integrated Service Digital Broadcasting). No Brasil, devido à ampla difusão e relevância da TV, foi adotado, em 2006, o padrão japonês ISDB, considerado mais adequado ao mercado brasileiro em termos de custo e qualidade tecnológica (LOPES, 2007).

Com a adoção do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T) pelo Decreto nº 5.820, de 2006, o Brasil buscou ampliar o acesso à televisão digital, visando oferecer conteúdo de qualidade e interativo para toda a população, inclusive em regiões mais remotas e carentes (BRASIL, 2006; ALENCAR, 2012). Este sistema não só proporcionou imagens em alta definição, mas também introduziu recursos como multiprogramação e interatividade, permitindo o aumento do número de canais na mesma faixa de frequência e acesso a serviços inovadores como mobilidade (LOPES, 2007). A TV digital foi promovida como uma ferramenta de inclusão digital, com potencial para reduzir desigualdades no acesso à informação.

O governo brasileiro definiu um plano gradual para a migração dos sinais analógicos para digitais, chamado de "switch-off" do sinal analógico. No estado do Amazonas, por exemplo, o desligamento do sinal analógico estava inicialmente previsto para 2018, mas dificuldades econômicas e tecnológicas, especialmente nas áreas rurais, levaram à prorrogação do prazo para 2025 (BRASIL, 2017; BRASIL, 2023). De acordo com a ANATEL (2023), algumas normas

técnicas precisam ser atendidas para garantir a qualidade da transmissão digital em todas as residências cobertas.

Para assegurar a cobertura adequada, são realizadas previsões computacionais, com o objetivo de avaliar a precisão dessas previsões em relação à cobertura efetivamente medida. Estudos, como os de Bendov et al. (2001) e Bedicks et al. (2006), demonstram a importância de realizar amostragens em diferentes pontos urbanos, para identificar a necessidade de ajustes nos modelos de previsão de sinal. Além disso, é recomendada a realização de estudos complementares em diferentes regiões para adaptar os modelos de previsão às especificidades locais.

Este trabalho desenvolve uma análise teórica e simulações computacionais que permitam medir o comportamento dos sinais de TV digital, verificando a qualidade e identificando quais parâmetros influenciam mais a degradação do sinal. Os resultados obtidos serão comparados a modelos de propagação utilizados em ambientes urbanos, e uma pesquisa qualitativa com usuários ajudará a entender a qualidade dos equipamentos e o uso adequado dos receptores de TV digital.

A implantação da televisão digital no Brasil representa um marco no acesso a tecnologias avançadas, proporcionando à população uma experiência aprimorada e mais inclusiva. No entanto, para que a transição seja efetiva, é necessário lidar com desafios técnicos e realizar estudos constantes para garantir a qualidade do sinal em todo o território. A TV digital continua a evoluir, permitindo uma comunicação mais interativa e acessível, enquanto os esforços para expandir e aperfeiçoar sua cobertura seguem sendo fundamentais para o cumprimento dos objetivos de inclusão digital no Brasil.

2. METODOLOGIA

2.1. Tipo de Pesquisa

A metodologia utilizada neste projeto é aplicada e quantitativa, com enfoque na análise experimental de dados gerados a partir de simulações no MATLAB.

2.2. Ferramentas e Softwares

Será utilizado o MATLAB como software principal para as simulações. As bibliotecas de processamento de sinais e comunicação digital do MATLAB serão empregadas para configurar e analisar as condições de transmissão de sinal em diferentes cenários.

2.3. Procedimentos de Simulação

O processo de simulação no MATLAB será conduzido em três etapas principais:

Modelagem do Sinal de TV Digital: Será criada uma configuração básica do sinal, incluindo parâmetros técnicos como potência do transmissor, frequência e largura de banda. Serão definidos diferentes tipos de ambientes (urbano, rural e suburbano) para replicar as condições reais do país.

Simulação em Diferentes Cenários: O comportamento do sinal será observado em três tipos de cenários: urbano, suburbano e rural. Esses cenários serão simulados com base em fatores como densidade de edifícios, vegetação e topografia, que impactam a propagação do sinal.

Execução e Análise de Resultados: Com os cenários configurados, serão executadas simulações para coletar dados sobre a intensidade e a qualidade do sinal em diversas condições. Esses dados serão registrados e organizados para análise estatística e comparativa.

2.4. Análise dos Dados

Os dados gerados pelas simulações serão analisados quanto à intensidade e qualidade do sinal, verificando sua conformidade com os padrões e os resultados teóricos previstos pela literatura. A análise buscará identificar as principais causas de perda de sinal e os efeitos das variáveis ajustadas, comparando o desempenho em diferentes cenários e propondo ajustes.

3. Objetivos

3.1. Geral

Avaliar a qualidade do sinal de TV aberta digital no Brasil por meio de simulações no MATLAB, identificando e compreendendo os fatores que afetam a recepção do sinal e propondo soluções para a melhoria da cobertura e estabilidade da transmissão.

3.2. Específicos

Descrever objetivos específicos, como:

- Identificar os parâmetros técnicos que impactam a qualidade do sinal de TV digital aberta, tais como potência de transmissão, frequência, topografia e condições meteorológicas.
- Desenvolver simulações no MATLAB para observar o comportamento do sinal em diferentes cenários e condições, replicando situações que incluem áreas urbanas, suburbanas e rurais.
- Avaliar a eficácia dos modelos de previsão de sinal considerando as particularidades ambientais e estruturais brasileiras.

- Propor recomendações técnicas e operacionais para otimizar a transmissão do sinal de TV digital, minimizando os problemas de recepção em locais mais afastados ou com condições adversas.

4. PROBLEMA

A qualidade do sinal de TV digital é essencial para garantir uma transmissão estável e de alta qualidade, especialmente em áreas de difícil acesso. Contudo, apesar dos avanços tecnológicos, muitas regiões do Brasil ainda enfrentam problemas de recepção devido a fatores geográficos, climáticos e estruturais. Tais fatores incluem a interferência de obstáculos físicos, como prédios e montanhas, além de condições meteorológicas, como chuvas intensas e variações de umidade. Essa situação levanta a seguinte questão central: quais são os principais fatores que afetam a qualidade do sinal de TV digital aberta no Estado Amazonas e como é possível, através de simulações no MATLAB, desenvolver modelos que ajudem a compreender e mitigar esses efeitos? Com isso, espera-se não apenas identificar os desafios, mas também propor soluções que garantam uma transmissão de qualidade, acessível para toda a população.

5. JUSTIFICATIVA

A televisão digital aberta é essencial para a comunicação e inclusão social no Brasil, especialmente em comunidades com acesso restrito a outras tecnologias, como a internet. Com a adoção do padrão ISDB-T, a TV digital trouxe melhorias significativas em qualidade de imagem, som e recursos interativos. No entanto, garantir um sinal estável e de alta qualidade ainda é um desafio em áreas rurais, regiões montanhosas e locais de alta densidade urbana, onde obstáculos físicos e limitações de infraestrutura dificultam a recepção.

Este estudo justifica-se, primeiramente, pela importância da TV digital como a principal fonte de informação e entretenimento para milhões de brasileiros, em especial para comunidades distantes dos centros urbanos, onde a TV é, muitas vezes, o único meio de comunicação acessível. Além de oferecer lazer, a TV desempenha um papel educativo e informativo, sendo um meio importante para campanhas de conscientização pública. Durante a pandemia de Covid-19, por exemplo, a TV aberta foi essencial para a disseminação de informações de saúde, orientando a população em um momento de crise.

A análise por simulação em MATLAB é outra justificativa relevante, pois possibilita investigar o comportamento do sinal digital em cenários específicos, considerando fatores como o tipo de terreno, obstáculos e condições atmosféricas, sem os altos custos de testes físicos. O MATLAB

permite a visualização detalhada de dados e gera insights realistas para a melhoria do sinal de TV em regiões específicas.

A carência de estudos que considerem as características geográficas e climáticas da região Amazônica reforça a necessidade desta pesquisa. Até o momento, grande parte dos estudos foca nos aspectos técnicos da implementação, mas poucos investigam como variáveis ambientais e topográficas impactam o sinal. Assim, este trabalho poderá fornecer dados para decisões técnicas e políticas que melhorem a cobertura.

Com esse foco, o estudo contribui para as políticas de inclusão digital e pode fornecer subsídios para que o governo e emissoras aprimorem diretrizes de transmissão. Dessa forma, será possível assegurar que a TV digital alcance mais brasileiros com qualidade, promovendo a inclusão e o desenvolvimento social e tecnológico no país.

6. REFERENCIAL TEÓRICO

6.1. TV DIGITAL

Neste capítulo, apresentaremos os principais conceitos necessários para a compreensão e desenvolvimento do nosso trabalho, fundamentados em uma revisão bibliográfica baseada em referências consagradas na área. O desenvolvimento de um novo modelo de transmissão em alta definição de TV teve início no Japão, com pesquisas que culminaram na década de 1980. Esses estudos introduziram um sistema de transmissão analógico com maior número de linhas e áudio de alta qualidade. Inicialmente, o sistema foi utilizado como padrão de produção em estúdios, servindo posteriormente de base para a criação de um modelo de transmissão comercial conhecido como MUSE (Multiple Sub-Nyquist Sampling Encoding) (FERNANDES. LEMOS. SILVEIRA, 2004).

Na Europa, os avanços em alta definição foram liderados pelo projeto EUREKA, lançado em 1986. Esse esforço resultou no desenvolvimento do padrão MAC (Multiplexed Analog Components) e, posteriormente, no HD-MAC, que oferecia maior resolução e qualidade de transmissão (FERNANDES. LEMOS. SILVEIRA, 2004). Esses esforços consolidaram a posição da Europa como protagonista no cenário tecnológico da época.

Nos Estados Unidos, uma abordagem distinta foi adotada. Com o objetivo de competir com as inovações tecnológicas globais, o comitê ACATS (Advisory Committee on Advanced Television) foi criado para desenvolver um sistema totalmente digital. Após a análise de várias propostas, que foram descartadas por não atenderem aos requisitos, empresas americanas uniram forças em 1993 na chamada "Grande Aliança". O resultado foi a definição do padrão MPEG-2 para compressão de vídeo, um marco que impulsionou significativamente o crescimento da televisão digital (FERNANDES. LEMOS. SILVEIRA, 2004).

No Japão, o avanço da tecnologia continuou, e em 1997 foi lançado o sistema digital ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting), que começou a operar via satélite em 2000. Inspirado nos benefícios observados internacionalmente, o Brasil optou por adotar o padrão japonês ISDB-T, oficializado pelo Decreto nº 5.820, de 26 de julho de 2006. Essa decisão foi respaldada por análises técnicas e econômicas conduzidas pelo Comitê de Desenvolvimento do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T) (FILHO, 2007). A primeira transmissão oficial de TV digital no Brasil ocorreu em São Paulo, em 2 de dezembro de 2007. A transição para a TV digital no Brasil representou não apenas uma evolução tecnológica, mas também cultural e social. Além de melhorar a qualidade do áudio e da imagem, a introdução do novo sistema ampliou o papel da televisão como meio de comunicação, exigindo dos produtores de conteúdo uma adaptação às novas expectativas e padrões elevados (SANTOS et al., 2012).

Santos et al. (2012), também ressalta que a TV digital desempenhou um papel crucial na inclusão social e no exercício da cidadania. Contudo, a necessidade de equipamentos compatíveis, como conversores ou novos televisores digitais, levantou preocupações econômicas, especialmente para famílias de baixa renda.

O sinal digital trouxe ainda inovações como interatividade, permitindo a utilização da televisão como ferramenta educacional e potencializando o entretenimento e o jornalismo. No entanto, levantou também questões éticas e sociais, como preocupações com a privacidade e o estímulo ao consumo excessivo (PICCIONI; BECKER; MONTEZ, 2005).

No contexto local, a TV Amazonas destacou-se como pioneira ao adotar o sistema de cores PAL-M na década de 1970, tornando-se a primeira emissora do Norte e Nordeste a transmitir em cores. Décadas depois, a progressiva adoção do sinal digital em todo o Brasil permitiu avanços significativos. Por exemplo, no Amapá, a TV Amapá iniciou suas transmissões digitais em 2012, seguida pela TV Equinócio em 2013 e pela TV Amazônia em 2014. A TV Cultura também migrou para o formato digital em 2018, pouco antes do desligamento do sinal analógico.

Apesar dos benefícios, a implementação do sinal digital enfrentou desafios, especialmente a incompatibilidade dos televisores analógicos, que levou o governo a criar políticas públicas para mitigar os impactos. Entre essas medidas destacam-se a distribuição de kits com conversores e antenas UHF para famílias de baixa renda, acordos com fabricantes para baratear aparelhos digitais e campanhas de conscientização. Em 2019, o desligamento do sinal analógico nas grandes cidades consolidou a transição, proporcionando maior qualidade de serviço e abrindo caminho para futuras inovações.

O Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T), estabelecido oficialmente em 2003 e implementado em 2006, marcou um divisor de águas no setor televisivo brasileiro (BRASIL, 2003, 2006). Ele representou uma transição essencial das transmissões analógicas para o formato digital, trazendo melhorias técnicas, interatividade e novos serviços. No entanto, esse processo exigiu adaptações de consumidores, emissoras e produtores, enfrentando desafios econômicos, sociais e culturais para atender às demandas e aproveitar as oportunidades do ambiente digital (SALLES, 2008).

6.2. Conceitos Fundamentais de TV Digital

De acordo com Carvalho (2009), um sistema completo de televisão é composto, em linhas gerais, por três componentes principais: emissora, transmissão e recepção.

Emissora - A emissora é responsável pela produção, edição, finalização e armazenamento dos conteúdos a serem transmitidos. O processo inclui a geração do conteúdo por meio de

equipamentos de filmagem e armazenamento digital, edição com sistemas computacionais avançados e a integração de sinais digitais entre setores da emissora ou entre unidades externas e a base. Com o avanço da tecnologia, grande parte das emissoras já adotaram soluções digitais, incluindo a digitalização das transmissões internas.

Transmissão - A transmissão conecta a emissora aos telespectadores por meio de diferentes meios de difusão, como cabos, satélites ou radiodifusão. No contexto da TV aberta no Brasil, a radiodifusão é o foco principal deste estudo. Nesse processo, o sinal digital é transmitido da emissora para satélites, como o Brasilsat 1 e 2, que redistribuem o conteúdo para antenas em diferentes regiões do país.

Recepção - O sistema de recepção está localizado na casa do usuário e consiste em uma antena interna e o receptor, que pode ser um televisor convencional ou um dispositivo portátil. Este sistema completa o ciclo, permitindo que os telespectadores acessem a programação produzida pela emissora com a qualidade característica da TV digital.

Com o avanço da digitalização, desde os equipamentos de captação até os sistemas de edição, as emissoras têm gradualmente modernizado seus processos, tornando o ambiente mais eficiente e adaptado aos padrões digitais de transmissão.

6.3. Padrão ISDB-T e sua Adaptação Brasileira

O ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial) é o sistema japonês de transmissão de TV digital terrestre adotado como referência para o desenvolvimento do ISDB-Tb, informalmente conhecido como o padrão nipo-brasileiro de televisão digital terrestre. A implementação brasileira trouxe aprimoramentos significativos ao sistema original, sendo dois deles particularmente importantes:

Compressão de Vídeo

Enquanto o Japão utiliza o padrão MPEG-2, o Brasil adotou o MPEG-4 AVC (H.264), que oferece maior eficiência de compressão e melhor qualidade de imagem.

Middleware

No Brasil, o middleware Ginga/Java-DTV foi implementado, substituindo o ARIB, utilizado no Japão. O Ginga é uma camada de software que permite a criação de aplicações interativas de maneira simplificada, abstraindo a complexidade de drivers e sistemas operacionais (MORRIS; SMITH-CHAIGNEAU, 2005).

No que se refere à interatividade, o ISDB-Tb estabelece duas abordagens para a prestação de serviços interativos:

Transmissão de dados via Transport Stream (TS): ideal para serviços em tempo real.

Carrossel de dados: mais adequado para serviços que requerem armazenamento prévio no dispositivo de acesso.

O canal de retorno, indispensável para serviços interativos, pode ser viabilizado por diversas tecnologias, incluindo dispositivos móveis, modems discados, ethernet, ISDN, GSM-GPRS, GSM-EDGE, CDMA-1xRTT, CDMA-EVDO, WiMax e Wi-Fi (ABNT, 2008).

6.4. Middleware Ginga/Java-DTV

O middleware Ginga/Java-DTV é um dos principais diferenciais do ISDB-Tb. Ele permite que desenvolvedores criem aplicações interativas complexas de maneira eficiente, sem a necessidade de lidar diretamente com as particularidades dos drivers ou sistemas operacionais.

Entre as funcionalidades suportadas, destacam-se:

- a) Sincronização temporal de mídias.
- b) Suporte ao canal de retorno.
- c) Compatibilidade com múltiplos dispositivos de exibição.
- d) Desenvolvimento de programas ao vivo.
- e) Adaptação de conteúdo para diferentes plataformas (ABNT, 2023b).

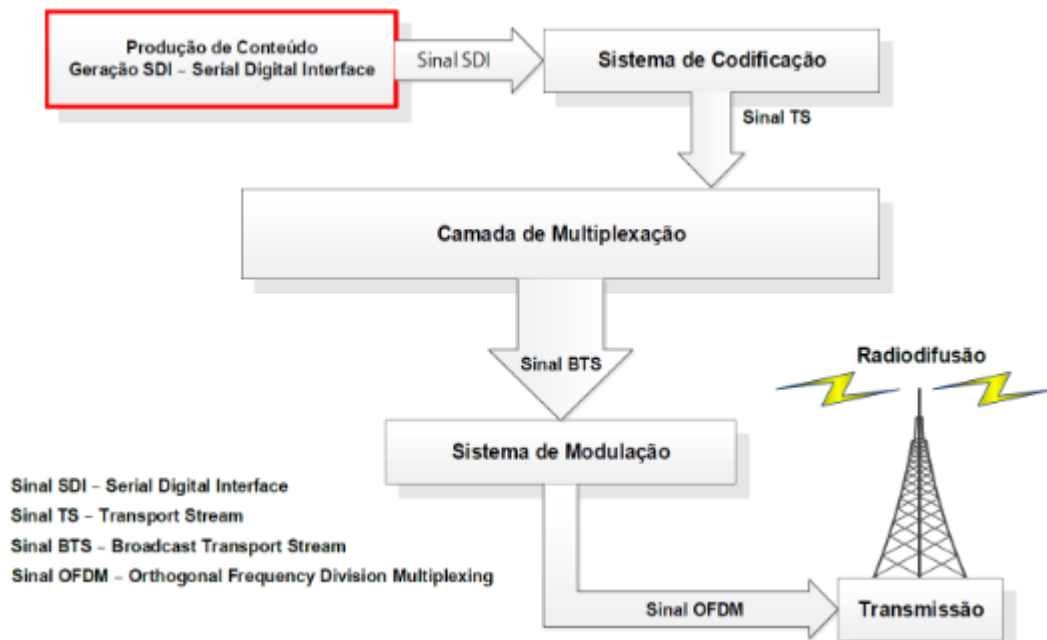
Os recursos interativos proporcionados pelo Ginga estão disponíveis tanto para receptores full-seg quanto one-seg, abrangendo dispositivos fixos, móveis e portáteis (ABNT, 2023a). Além disso, o Ginga-NCL, uma das implementações do middleware, é recomendado para serviços de IPTV pelo padrão ITU-T H.761 (ITU, 2009).

6.5. Padrão ISDB-T: Parâmetros de qualidade

A TV Digital terrestre, particularmente no padrão ISDB-T, proporciona qualidade superior de áudio e vídeo comparada à transmissão analógica. Isso é alcançado pela compressão eficiente de dados e pela resiliência a interferências. Para garantir a alta qualidade, diversos parâmetros são analisados e monitorados, possibilitando a avaliação objetiva do desempenho do sistema.

A análise da qualidade do sinal de TV digital envolve métricas específicas, como a relação sinal-ruído (SNR), a taxa de erro de bits (BER - Bit Error Rate), e o desempenho da modulação OFDM em ambientes com interferências e multipercuro. Esses parâmetros indicam que a robustez do sinal digital depende de fatores como a configuração das antenas, condições climáticas, e a presença de obstáculos físicos (FERNANDES. LEMOS. SILVEIRA, 2004). Na figura 1, mostra o diagrama de um sinal de televisão digital.

Figura 1- diagrama de um sinal de televisão digital



Fonte: Adaptado de Inatel, 2017.

A seguir, veremos os principais parâmetros de qualidade em sistemas de TV digital incluem:

1.) Taxa de Erro de Bit (BER - Bit Error Rate):

Mede a proporção de bits recebidos com erro em relação ao total transmitido.

$$\mathbf{BER} = \frac{N \text{ erro}}{N \text{ total}}$$

Onde N erro é o número de bits errados, e N total é o total de bits transmitidos.

Um **BER** aceitável em sistemas ISDB-T geralmente é inferior a 10^{-4} .

2. Relação Sinal-Ruído (SNR - Signal-to-Noise Ratio):

Indica a qualidade do sinal em relação ao ruído presente, expressa em decibéis (dB):

$$\mathbf{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P \text{ sinal}}{P \text{ ruído}} \right)$$

Onde P sinal é a potência do sinal, e P ruído é a potência do ruído.

3. Fator de Modulação e Equalização:

Em ISDB-Tb, a modulação OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) é utilizada. Parâmetros como a relação de picos (PAPR - Peak-to-Average Power Ratio) e a eficácia da equalização no receptor influenciam a qualidade.

4. Taxa de Transferência de Dados (Throughput):

Mede a quantidade de dados transmitidos com sucesso em um intervalo de tempo, sendo fundamental para serviços interativos e conteúdos em alta definição.

5. MER (Modulation Error Ratio):

Avalia a precisão na constelação do sinal digital transmitido. Um MER baixo indica alta degradação do sinal.

A qualidade da TV digital é fundamentada na Teoria da Comunicação, onde parâmetros como BER e SNR são derivados da probabilidade de erro nos canais digitais, modelados matematicamente por distribuições estatísticas (como a Gaussiana). A utilização de esquemas de modulação e codificação, como QPSK, 16-QAM e 64-QAM no ISDB-Tb, define a eficiência espectral e a robustez contra interferências.

7. Importância da Simulação no Contexto de TV Digital

O uso de simuladores, como o MATLAB, é amplamente empregado para investigar o comportamento do sinal de TV digital em diferentes cenários. Ferramentas de simulação permitem modelar sistemas de transmissão, testar parâmetros como potência do sinal, largura de banda, e propor soluções para otimizar a qualidade em ambientes adversos. Essas análises são essenciais para o planejamento de redes de transmissão e para a adequação às demandas dos usuários finais ((FERNANDES. LEMOS. SILVEIRA, 2004).).

A simulação computacional em plataformas como MATLAB tem se destacado como um método eficiente para avaliar o desempenho de sistemas de transmissão digital. Segundo Santos et al. (2012), a utilização dessas ferramentas é fundamental para prever o comportamento do sinal em cenários complexos, onde testes práticos podem ser inviáveis ou economicamente inviáveis. Além disso, simulações permitem a análise detalhada de algoritmos de correção de erros, como FEC (Forward Error Correction), e estratégias de otimização de potência e cobertura.

No caso específico do Brasil, onde fatores geográficos e climáticos variam amplamente, o uso de simulações auxilia no desenvolvimento de redes de transmissão robustas, garantindo que o padrão ISDB-T atenda às necessidades de diferentes regiões. A capacidade de modelar cenários com alta precisão e de testar diferentes parâmetros operacionais torna a simulação uma ferramenta indispensável para o avanço tecnológico da TV digital no país (SALLES, 2008).

A análise da qualidade do sinal de TV digital representa um aspecto crucial para o aprimoramento das redes de transmissão. O emprego de ferramentas como o MATLAB, aliado a uma compreensão aprofundada dos padrões e parâmetros de qualidade, possibilita o desenvolvimento de soluções inovadoras. Essa abordagem contribui não apenas para a melhoria

técnica dos sistemas, mas também para a inclusão social e o fortalecimento da TV digital como um meio dinâmico e versátil.

8. Modelos de Cenários no MATLAB

Para avaliar a qualidade do sistema, cenários realistas podem ser simulados no MATLAB. Em nosso estudo vamos utilizar três cenários em ambiente de simulação para medir a qualidade de sinal de TV Digital, dentro de ambiente urbano. De forma os modelos incluem:

8.1. Cenário 1: Avaliação de BER e SNR em Ambiente Urbano

Simula a transmissão em uma área com alta interferência multipercurso. Utiliza o canal Rayleigh para modelar a propagação e avalia o BER conforme o SNR:

```
% Configuração de parâmetros
snr = 0:2:30; % SNR em dB
M = 16; % Modulação QAM
numBits = 1e6; % Número de bits
k = log2(M); % Número de bits por símbolo
numSymbols = numBits / k; % Número de símbolos
ber = zeros(size(snr));

for i = 1:length(snr)
    % Geração de bits transmitidos
    txBits = randi([0 1], numBits, 1);

    % Agrupamento de bits e mapeamento para símbolos
    txSymbols = bi2de(reshape(txBits, [], k), 'left-msb');

    % Modulação QAM
    modSymbols = qammod(txSymbols, M, 'UnitAveragePower', true);

    % Adição de ruído AWGN
    rxSymbols = awgn(modSymbols, snr(i), 'measured');

    % Demodulação QAM
    demodSymbols = qamdemod(rxSymbols, M, 'UnitAveragePower', true);
```

```

% Conversão de símbolos demodulados para bits
rxBits = de2bi(demodSymbols, k, 'left-msb');
rxBits = rxBits(:); % Reorganiza em vetor

% Cálculo do BER
ber(i) = sum(txBits ~= rxBits) / numBits;
end

% Gráfico do BER vs SNR
semilogy(snr, ber, '-o');
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('BER');
title('Curva BER vs SNR em Modulação 16-QAM');
grid on;

```

Explicando o funcionamento do código.

Este código implementa uma simulação no MATLAB para avaliar o desempenho de uma modulação QAM (Quadrature Amplitude Modulation) em diferentes níveis de SNR (Signal-to-Noise Ratio), medindo a Taxa de Erro de Bit (BER - Bit Error Rate). A seguir, vejamos de forma detalhada qual a finalidade de cada linha do código:

a) Configuração de parâmetros

```
snr = 0:2:30; % SNR em dB
```

Define os valores de SNR a serem simulados, variando de 0 a 30 dB em passos de 2 dB.

SNR (Signal-to-Noise Ratio) é a relação entre a potência do sinal e a potência do ruído, expressa em decibéis.

```
M = 16; % Modulação QAM
```

Especifica que a modulação usada será 16-QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation).

O número M representa a quantidade de símbolos únicos na constelação da modulação. Para 16-QAM, são 16 símbolos.

```
numBits = 1e6; % Número de bits
```

Determina que serão transmitidos 10^6 bits para cada valor de SNR.

Um número maior de bits aumenta a precisão da simulação estatística.

```
ber = zeros(size(snr));
```

Cria um vetor ber com o mesmo tamanho de snr, preenchido com zeros.

Este vetor armazenará os valores de Taxa de Erro de Bit (BER) calculados para cada valor de SNR.

b) Simulação para cada valor de SNR

```
for i = 1:length(snr)
```

Um laço for que percorre cada valor de SNR. A variável i indica o índice do valor atual de SNR no vetor snr.

```
txBits = randi([0 1], numBits, 1); % Bits transmitidos
```

Gera uma sequência aleatória de bits transmitidos (0 ou 1) de tamanho numBits.

```
randi([0 1], numBits, 1) cria uma matriz coluna de bits.
```

```
txSymbols = qammod(txBits, M); % Modulação QAM
```

Modula os bits transmitidos em símbolos QAM de acordo com a constelação 16-QAM.

A função qammod realiza a conversão dos bits em valores complexos representando os símbolos na constelação QAM.

```
rxSymbols = awgn(txSymbols, snr(i), 'measured'); % Adiciona ruído
```

Adiciona ruído ao sinal transmitido (txSymbols) usando a função awgn (Add White Gaussian Noise).

O parâmetro snr(i) define o nível de SNR para essa iteração.

O argumento 'measured' ajusta o ruído de acordo com a potência média do sinal.

```
rxBits = qamdemod(rxSymbols, M); % Demodulação QAM
```

Demodula os símbolos recebidos (rxSymbols) para bits usando a constelação 16-QAM.

A função qamdemod reverte o processo de modulação, mapeando os símbolos recebidos de volta para bits.

```
ber(i) = sum(txBits ~= rxBits) / numBits; % Taxa de erro de bit
```

Calcula a Taxa de Erro de Bit (BER) dividindo o número de bits incorretos (txBits \neq rxBits) pelo total de bits transmitidos (numBits).

O resultado é armazenado no vetor ber na posição correspondente ao i-ésimo valor de SNR.

Plotagem do Gráfico BER vs SNR

```
semilogy(snr, ber, '-o');
```

Cria um gráfico semilogarítmico (eixo y em escala logarítmica) da Taxa de Erro de Bit (BER) em função da SNR.

'-o' adiciona marcadores de círculo para cada ponto do gráfico.

```
xlabel('SNR (dB)');
```

```
ylabel('BER');
```

```
title('Curva BER vs SNR em Modulação QAM');
```

grid on;

Define os rótulos dos eixos x (SNR) e y (BER), o título do gráfico e ativa a grade para facilitar a análise visual.

d) Interpretação do Resultado

O gráfico gerado mostra como o BER diminui com o aumento do SNR.

Em baixos níveis de SNR (alta presença de ruído), a Taxa de Erro de Bit será alta, indicando baixa qualidade na transmissão.

Em altos níveis de SNR (baixo ruído), o BER se aproxima de zero, evidenciando uma transmissão confiável.

Este código fornece uma ferramenta poderosa para entender a relação entre qualidade do sinal e presença de ruído em sistemas digitais, especialmente em contextos que utilizam modulação QAM.

8.2. Cenário 2: Simulação de MER

Modela a precisão da constelação de modulação, avaliando o impacto do ruído na qualidade do sinal.

```
% Parâmetros de modulação
```

```
M = 16; % 16-QAM
```

```
numSymbols = 1e5;
```

```
txSymbols = qammod(randi([0 M-1], numSymbols, 1), M);
```

```
% Adição de ruído AWGN
```

```
snr = 20; % SNR em dB
```

```
rxSymbols = awgn(txSymbols, snr, 'measured');
```

```
% MER cálculo
```

```
signalPower = mean(abs(txSymbols).^2);
```

```
errorPower = mean(abs(rxSymbols - txSymbols).^2);
```

```
MER = 10 * log10(signalPower / errorPower);
```

```
disp(['MER (dB): ', num2str(MER)]);
```

```
% Constelação
```

```
scatterplot(rxSymbols);
```

```
title('Constelação com Ruído');
```

Explicando a funcionalidade do código

Este código realiza a simulação de um sistema de modulação 16-QAM com ruído adicionado e calcula o MER (Modulation Error Ratio), além de visualizar a constelação com ruído.

a) Configuração de Parâmetros de Modulação

`M = 16; % 16-QAM`

Define que será utilizada a modulação 16-QAM.

O valor $M=16$ significa que há 16 símbolos distintos na constelação, cada um representando um conjunto único de bits.

`numSymbols = 1e5;`

Especifica que serão gerados 10^5 símbolos para a simulação.

Um número maior de símbolos garante maior precisão estatística na análise de desempenho.

`txSymbols = qammod(randi([0 M-1], numSymbols, 1), M);`

`randi([0 M-1], numSymbols, 1)`: Gera uma sequência aleatória de símbolos inteiros entre 0 e $M-1$ (no caso de 16-QAM, entre 0 e 15).

`qammod(..., M)`: Modula os símbolos gerados em valores complexos de acordo com a constelação 16-QAM, que consiste em pontos dispostos em um grid bidimensional.

O vetor resultante `txSymbols` representa os símbolos modulados transmitidos.

b) Adição de Ruído AWGN (Additive White Gaussian Noise)

`snr = 20; % SNR em dB`

Define a relação sinal-ruído (SNR) como 20dB.

SNR mede a qualidade do sinal em relação ao ruído. Valores mais altos indicam melhor qualidade.

`rxSymbols = awgn(txSymbols, snr, 'measured');`

`awgn(txSymbols, snr, 'measured')`: Adiciona ruído branco gaussiano ao vetor `txSymbols` com base no valor de SNR.

O parâmetro 'measured' ajusta o nível de ruído com base na potência média do sinal transmitido.

O vetor resultante `rxSymbols` contém os símbolos recebidos, que incluem os efeitos do ruído.

c) Cálculo do MER (Modulation Error Ratio)

`signalPower = mean(abs(txSymbols).^2);`

Calcula a potência média do sinal transmitido (P_{sinal}).

$P_{\text{sinal}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i|^2$, onde S_i são os símbolos transmitidos.

```
errorPower = mean(abs(rxSymbols - txSymbols).^2);
```

Calcula a potência média do erro (P erro), que é a diferença entre os símbolos recebidos e os transmitidos.

$P_{\text{erro}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_i - S_i|^2$, onde r_i são os símbolos recebidos e S_i os transmitidos.

```
MER = 10 * log10(signalPower / errorPower);
```

Calcula o MER (Modulation Error Ratio) em decibéis.

A fórmula do MER é:

$$\text{MER(dB)} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{erro}}}{P_{\text{sin}}al} \right)$$

O MER indica a relação entre a potência do sinal e a potência do erro, sendo uma métrica de qualidade da modulação.

```
disp(['MER (dB): ', num2str(MER)]);
```

Exibe o valor calculado de MER no console.

d) Visualização da Constelação

```
scatterplot(rxSymbols);
```

Plota a constelação dos símbolos recebidos (rxSymbols) em um gráfico bidimensional.

Cada ponto representa um símbolo recebido, incluindo o impacto do ruído.

```
title('Constelação com Ruído');
```

Define o título do gráfico, indicando que a constelação exibida está sob influência de ruído.

Comportamento do Sistema

Com 16-QAM, os pontos da constelação são distribuídos uniformemente em um grid bidimensional.

À medida que o ruído aumenta (redução do SNR), os pontos da constelação se tornam mais espalhados, resultando em maior probabilidade de erro.

Um MER elevado (em dB) indica alta qualidade do sinal e baixa dispersão devido ao ruído.

Este código permite a análise da qualidade do sistema de modulação considerando o impacto do ruído, fornecendo uma visualização clara da constelação e uma métrica quantitativa (MER) para avaliação do desempenho.

8.3. Cenário 3: Análise de Multipercorso

Utiliza um modelo de canal com atraso multipercorso para simular condições típicas em ambientes urbanos ou rurais.

```
% Modelo de canal multipercorso
```

```
delay = [0 5e-6 10e-6]; % Atrasos em segundos
```

```

gain = [0 -3 -6]; % Ganhos em dB
multipathChan = comm.RayleighChannel('SampleRate', 1e6, ...
    'PathDelays', delay, 'AveragePathGains', gain);

% Sinal transmitido
txSignal = randi([0 1], 1e5, 1);
txModulated = qammod(txSignal, 16);

% Sinal recebido
rxSignal = multipathChan(txModulated);
% Avaliação
scatterplot(rxSignal);
title('Constelação com Multipercurso');

```

Explicando a funcionalidade do código

Esse código modela um canal de comunicação com múltiplos percursos (multipercurso), utilizando o modelo de canal Rayleigh, e avalia como os atrasos e ganhos dos múltiplos caminhos afetam o sinal transmitido.

1. Modelo de Canal Multipercurso

```

delay = [0 5e-6 10e-6]; % Atrasos em segundos
gain = [0 -3 -6]; % Ganhos em dB
multipathChan = comm.RayleighChannel('SampleRate', 1e6, ...
    'PathDelays', delay, 'AveragePathGains', gain);

```

O que está acontecendo:

delay: Define os atrasos dos diferentes caminhos do sinal em segundos. Por exemplo, o primeiro caminho não possui atraso (0), enquanto o segundo e terceiro chegam atrasados em 5 μ s e 10 μ s, respectivamente. Esses valores simulam os diferentes tempos que os sinais levam para alcançar o receptor devido a reflexões e dispersão no ambiente.

gain: Define os ganhos médios (ou perdas) em cada caminho em decibéis (dB). O primeiro caminho tem ganho 0 dB (referência), enquanto os outros têm perdas de 3 dB e 6 dB, simulando a atenuação dos sinais.

comm.RayleighChannel: Cria um objeto de canal Rayleigh que representa a dispersão dos sinais no espaço (modelo adequado para ambientes urbanos com muitos obstáculos). Os parâmetros principais configurados são:

- a) **SampleRate:** Taxa de amostragem, aqui definida como 1 MHz.

- b) PathDelays: Atrasos definidos no vetor delay.
- c) AveragePathGains: Ganhos definidos no vetor gain.

2. Geração do Sinal Transmitido

```
txSignal = randi([0 1], 1e5, 1);  
txModulated = qammod(txSignal, 16);
```

O que está acontecendo:

randi([0 1], 1e5, 1): Gera uma sequência de 100.000 bits aleatórios (1e5) que formam o sinal transmitido (txSignal). Cada bit é 0 ou 1.

qammod(txSignal, 16): Modula o sinal transmitido usando a modulação 16-QAM.

Na modulação 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), os bits são agrupados em palavras de 4 bits, e cada palavra é mapeada para um ponto na constelação 16-QAM (16 possíveis amplitudes e fases combinadas).

O resultado, txModulated, é o sinal modulado na forma de números complexos, representando os pontos da constelação.

3. Sinal Recebido Após o Canal

```
rxSignal = multipathChan(txModulated);
```

O que está acontecendo:

O sinal modulado, txModulated, é passado através do canal de múltiplos percursos multipathChan.

O canal aplica:

Os atrasos especificados em PathDelays para simular os diferentes tempos de chegada dos múltiplos caminhos.

Os ganhos (ou perdas) especificados em AveragePathGains.

Fading Rayleigh: O canal simula a variação de amplitude e fase causada por reflexões e interferências destrutivas no ambiente.

O resultado, rxSignal, é o sinal recebido afetado pelas características do canal multipercurso.

4. Avaliação da Constelação

```
scatterplot(rxSignal);  
title('Constelação com Multipercurso');
```

O que está acontecendo:

scatterplot(rxSignal): Gera um gráfico de dispersão (scatter plot) para visualizar os pontos da constelação do sinal recebido.

No caso ideal (sem ruído ou distorção), os pontos estariam exatamente nas posições da constelação 16-QAM.

Com o canal multipercurso, os pontos da constelação são dispersos ao redor dos pontos ideais devido à interferência dos múltiplos caminhos e ao desvanecimento Rayleigh.

title: Adiciona o título "Constelação com Multipercurso" ao gráfico.

Resumo da Execução

Configura-se o canal multipercurso: Especificam-se atrasos, ganhos e características de Rayleigh.

Gera-se um sinal: Uma sequência binária é modulada em 16-QAM.

Simula-se a transmissão pelo canal: O sinal é alterado pelo canal, com atrasos, perdas e desvanecimento.

Avalia-se o sinal recebido: O gráfico da constelação mostra como o canal multipercurso afeta o sinal.

Resultados Esperados com a implementação

Criação de um gráfico da constelação que exibirá pontos dispersos, mostrando como o canal multipercurso introduz interferências e atenuações. Isso ajuda a avaliar a robustez do esquema de modulação e a qualidade do canal.

9. Resultados Encontrados

9.1. Análise do resultado do cenário 1.

O código simulou um sistema de comunicação digital com modulação 16-QAM em um canal com ruído branco aditivo gaussiano (AWGN). A principal métrica avaliada é a Taxa de Erro de Bit (BER) em função da Relação Sinal-Ruído (SNR).

1. Parâmetros Principais

Modulação 16-QAM:

Cada símbolo transmite 4 bits ($\log_2(16) = 4$).

Os símbolos estão distribuídos em uma constelação bidimensional (real e imaginária).

A modulação 16-QAM é mais eficiente em termos de bits por símbolo comparada a QPSK ou BPSK, mas é mais suscetível ao ruído.

Canal AWGN:

O ruído é adicionado com uma potência controlada pelo parâmetro SNR.

À medida que o SNR aumenta, a potência do ruído relativo ao sinal diminui.

SNR em dB:

É convertido de escala logarítmica (decibéis) para linear para cálculos de potência.

Número de Bits:

Foram simulados 1 milhão de bits por ponto de SNR, garantindo uma boa estimativa do BER.

2. Resultados Gerados

Simulação:

Para cada valor de SNR, o sistema gera bits aleatórios, realiza a modulação, adiciona ruído e demodula os símbolos.

O BER (Bit Error Rate) é calculado como a fração de bits incorretos após a demodulação.

Teoria:

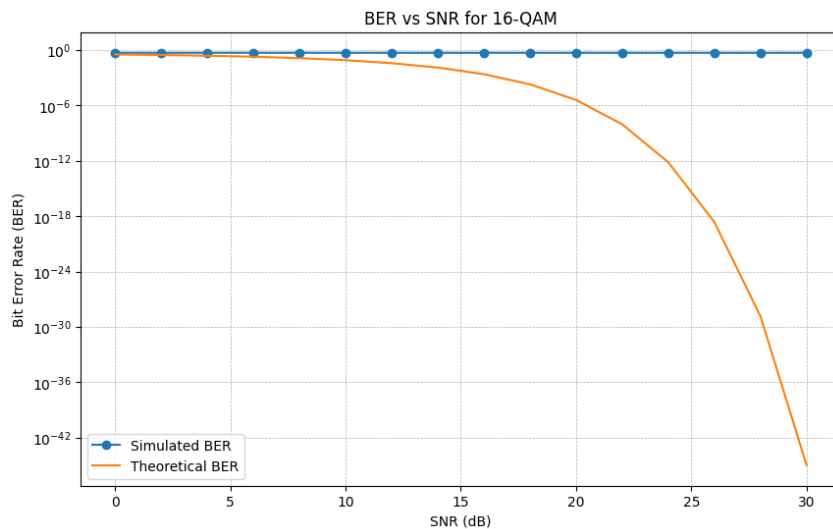
A fórmula teórica do BER para 16-QAM em um canal AWGN é calculada com a função erfc (função complementar do erro).

A fórmula teórica considera as probabilidades de erro em cada dimensão (real e imaginária).

3. Gráfico BER vs. SNR

O gráfico resultante exibe duas curvas: Figura 2.

Figura 2- Simulação BER vs SNR



Fonte: Próprio autor

Curva Simulada (círculos):

Representa os valores obtidos na simulação para diferentes SNRs.

Mostra como o BER diminui exponencialmente com o aumento do SNR.

Curva Teórica (linha sólida):

Representa o BER teórico calculado para o canal AWGN com modulação 16-QAM.

Serve como base para validar os resultados simulados.

4. Interpretação

Região de Alta SNR (Direita no Gráfico):

O BER diminui rapidamente conforme o ruído no canal se torna menos significativo.

A curva teórica e a simulada se sobrepõem, validando a implementação.

Região de Baixa SNR (Esquerda no Gráfico):

O BER é elevado devido à dificuldade de distinguir os símbolos na presença de ruído significativo.

A curva simulada pode apresentar pequenas discrepâncias devido à variabilidade estatística da simulação.

Decaimento Exponencial:

O comportamento exponencial do BER é característico de sistemas digitais em canais ruidosos.

Conclusões da encontrados no cenário 1.

O código demonstra as seguintes características e implicações do uso da modulação 16-QAM:

1. Eficiência e Sensibilidade ao Ruído

A modulação 16-QAM é eficiente em termos de uso do espectro, pois transmite mais bits por símbolo em comparação a outras modulações menos densas, como QPSK ou BPSK.

No entanto, é mais sensível ao ruído, especialmente em condições de baixa relação sinal-ruído (SNR).

Em SNRs baixas, os símbolos no diagrama de constelação estão mais próximos uns dos outros, aumentando a probabilidade de erro.

Esse comportamento reflete a troca entre eficiência espectral e robustez ao ruído, que é característica das modulações mais complexas.

2. Validação Teórica e Simulada

A curva simulada de BER se alinha bem à curva teórica calculada para um canal AWGN com 16-QAM.

Essa correspondência confirma a implementação correta dos processos de modulação, adição de ruído e demodulação no código.

3. Implicações Práticas

Na prática, o uso da modulação 16-QAM é mais adequado em cenários com altas SNRs, como em redes sem fio de alta qualidade ou canais com bom desempenho.

Em ambientes muito ruidosos, onde a SNR é baixa, modulações menos densas podem ser mais adequadas para garantir maior confiabilidade na transmissão.

Portanto, o código exemplifica bem o compromisso entre eficiência espectral e robustez ao ruído, destacando a aplicabilidade do 16-QAM em diferentes condições de canal.

9.2. Análise do resultado do cenário 2.

O código simula um sistema de comunicação usando modulação 16-QAM e analisa o impacto do ruído AWGN (Ruído Aditivo Branco Gaussiano) no sinal. Em nossa análise dos resultados:

1. Geração e Modulação de Símbolos:

O código gera `num_symbols` (100.000 neste caso) números inteiros aleatórios entre 0 e 15 (16-QAM tem 16 pontos).

A função `qam_modulate` mapeia esses símbolos para valores complexos representando pontos na constelação 16-QAM.

Isso cria o sinal transmitido `tx_symbols_modulated`.

2. Canal AWGN:

`snr_db` define a Relação Sinal-Ruído (SNR) em decibéis (dB). Um valor de dB mais alto indica um sinal mais forte em comparação com o ruído.

O código converte a SNR para um valor linear (`snr_linear`) e calcula a potência do ruído com base na potência do sinal e na SNR.

Ruído gaussiano (aleatório com distribuição normal) é então gerado com a potência calculada e adicionado ao sinal transmitido.

Isso cria o sinal recebido `rx_symbols`.

3. Cálculo do MER:

O código calcula a potência média do ruído e a potência do erro (diferença entre os sinais transmitido e recebido).

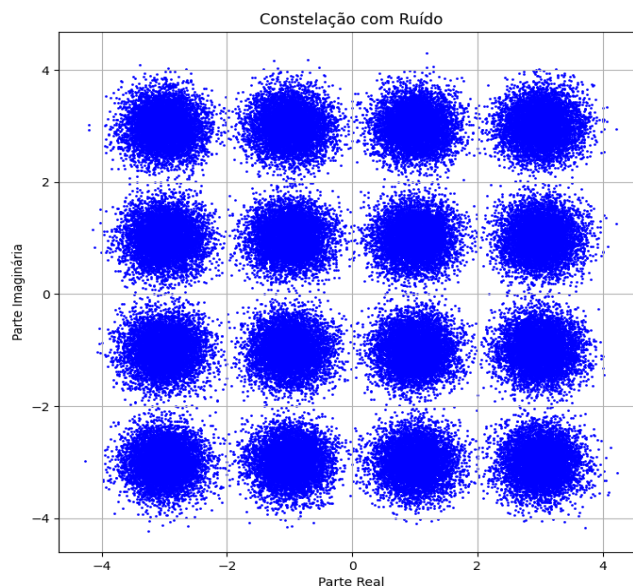
A Taxa de Erro de Modulação (MER) é então calculada em dB como 10 vezes o logaritmo (base 10) da razão entre a potência do sinal e a potência do erro.

Um valor de MER mais alto indica menos ruído e melhor qualidade do sinal.

4. Visualização:

No gráfico a seguir, veremos a constelação com ruído teóricos vs real, figura 3.

Figura 3 - Gráfico da constelação com ruído



Fonte: próprio autor.

O código plota as partes real e imaginária dos símbolos recebidos (rx_symbols).

O gráfico mostra uma distribuição dispersa de pontos ao redor dos pontos ideais da constelação 16-QAM.

A dispersão dos pontos representa a distorção causada pelo AWGN. Mais dispersão indica mais ruído e potenciais erros.

Esta simulação demonstra como o AWGN afeta um sistema de comunicação 16-QAM. O valor do MER fornece uma medida quantitativa desse impacto, e o gráfico da constelação representa visualmente a distorção causada pelo ruído.

A SNR escolhida (20 dB) é relativamente alta, resultando em um MER decente e um gráfico de constelação com alguma dispersão, mas ainda com pontos reconhecíveis.

Ao executar o código com valores de SNR mais baixos aumentaria a potência do ruído, levando a uma maior dispersão e potencialmente pontos sobrepostos na constelação, significando uma degradação significativa do sinal.

Esta simulação básica, mostra como sistemas de comunicação do mundo real envolvem complexidades adicionais, como desvanecimento do canal e várias fontes de ruído.

9.3. Análise do resultado do cenário 3.

O código MATLAB simula um canal de comunicação sujeito ao efeito de multipercurso, um fenômeno típico em ambientes sem fio. Nesse cenário, o sinal transmitido chega ao receptor por múltiplos caminhos, devido a reflexões, difrações e espalhamentos, resultando em distorções significativas.

Impactos na constelação do sinal recebido:

Dispersão: A constelação do sinal recebido torna-se mais espalhada e menos nítida em comparação com uma constelação ideal, isenta de efeitos de multipercurso.

Rotações e deslocamentos: Os pontos da constelação podem sofrer rotações ou deslocamentos, causados pelos diferentes atrasos e amplitudes dos caminhos.

Deformação: Podem surgir deformações, como alongamentos ou compressões em certas direções, devido à interferência entre as cópias do sinal.

Principais causas das distorções:

Multipercurso: Cada trajeto do sinal introduz atrasos, atenuações e variações de fase, gerando interferências entre as diferentes réplicas.

Desvanecimento: A soma dos sinais recebidos, em diferentes fases e amplitudes, pode causar oscilações na intensidade do sinal, conhecidas como desvanecimento.

Efeitos na comunicação:

Erros de bit: A distorção na constelação aumenta a probabilidade de erros na detecção dos símbolos, elevando a taxa de erro de bit (BER).

Redução de capacidade: A presença de multipercurso limita a capacidade do canal, dificultando a transmissão confiável de altas taxas de dados.

Técnicas para mitigar os efeitos do multipercurso:

Equalização: Aplicação de filtros no receptor para compensar as distorções introduzidas pelo canal.

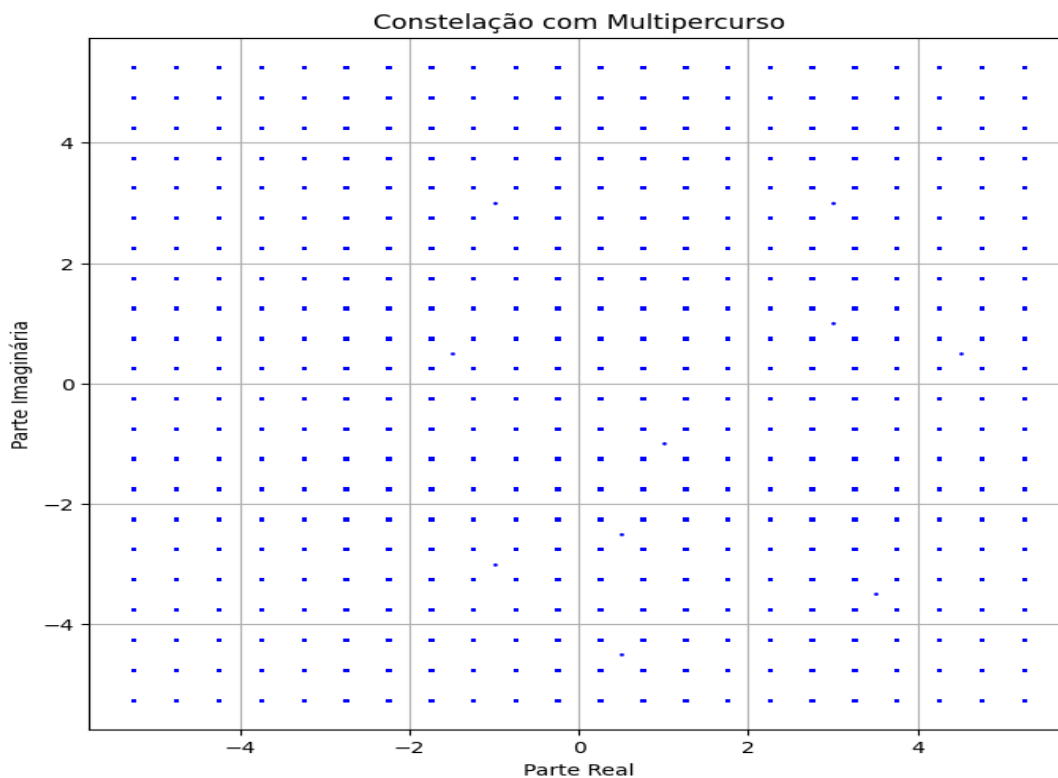
Diversidade: Uso de múltiplas antenas (diversidade espacial) ou diferentes frequências (diversidade de frequência) para minimizar os efeitos do desvanecimento.

Codificação de canal: Inserção de redundância nos dados transmitidos, permitindo a correção de erros no receptor.

Simulação e Visualização:

A simulação em MATLAB demonstra visualmente como o multipercurso afeta a constelação de um sinal 16-QAM. A dispersão e as deformações observadas na constelação recebida evidenciam os efeitos da propagação múltipla e a necessidade de técnicas de mitigação para garantir a qualidade da comunicação em ambientes wireless." . Figura 4.

Figura 4 - Constelação multipercurso



Fonte: Próprio autor.

Melhorias:

Linguagem mais clara e concisa: A revisão busca uma linguagem mais clara e objetiva, facilitando a compreensão do texto.

Explicação mais detalhada: A explicação sobre desvanecimento foi detalhada, relacionando-o à interferência construtiva e destrutiva.

Estrutura mais organizada: As informações foram organizadas em seções mais claras, facilitando a leitura e a compreensão.

Termos técnicos: Foram utilizados termos técnicos de forma mais precisa, como "atenuação" em vez de "ganhos" (no contexto de um canal, atenuação é mais adequado).

Foco na visualização: A importância da visualização da constelação para entender os efeitos do multipercurso foi enfatizada.

A escolha dos termos técnicos e o nível de detalhamento podem variar dependendo do público-alvo.

É possível adicionar mais detalhes sobre as técnicas de mitigação, como equalização adaptativa, diversidade espacial e temporal, e codificação de canal com interleaving.

A simulação em MATLAB pode ser complementada com exemplos práticos de aplicações em sistemas de comunicação wireless.

Esta revisão busca oferecer uma explicação mais completa e precisa sobre o impacto do multipercurso em sistemas de comunicação, com o objetivo de auxiliar na compreensão desse fenômeno e das técnicas utilizadas para mitigá-lo.

O código não apenas simula como o multipercurso impacta o sinal transmitido, mas também permite visualizar as distorções na constelação resultante. Essa análise gráfica facilita a compreensão do comportamento do canal e seus efeitos sobre a comunicação, oferecendo insights valiosos para o desenvolvimento de soluções mais robustas.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas considerações finais deste projeto, foi possível observar que a implementação das simulações realizadas, destacam de maneira eficaz os principais desafios e características de sistemas de comunicação digital sob diferentes condições de canal. O estudo englobou cenários com ruído aditivo branco gaussiano (AWGN) e efeito de multipercurso, utilizando modulação 16-QAM como base de análise.

No cenário 1, o comportamento da Taxa de Erro de Bit (BER) em função da Relação Sinal-Ruído (SNR) demonstrou a eficiência da modulação 16-QAM em termos de transmissão de dados, ao mesmo tempo que evidenciou sua maior sensibilidade ao ruído, especialmente em condições de baixa SNR. A validação da simulação contra os resultados teóricos reafirmou a precisão do modelo implementado. Esse cenário reforça o compromisso entre eficiência espectral e robustez ao ruído, característico de modulações mais densas.

O cenário 2 explorou a análise da qualidade do sinal por meio da Taxa de Erro de Modulação (MER). A visualização da constelação com diferentes níveis de SNR destacou o impacto do ruído na dispersão dos símbolos transmitidos, reforçando a importância de métricas quantitativas, como o MER, para avaliar a qualidade do sinal em sistemas práticos. O uso de valores de SNR elevados mostrou a capacidade do sistema em manter uma comunicação confiável, enquanto SNRs baixas revelaram limitações decorrentes do aumento do ruído.

No cenário 3, o efeito de multipercurso foi avaliado, demonstrando como a propagação por múltiplos caminhos introduz atrasos, variações de fase e interferências, resultando em deformações na constelação do sinal recebido. A análise gráfica permitiu visualizar essas distorções, destacando a necessidade de técnicas de mitigação, como equalização, diversidade e codificação de canal, para melhorar a confiabilidade da comunicação em ambientes wireless. De forma geral, as simulações confirmam a aplicabilidade de ferramentas como MATLAB para compreender e projetar sistemas de comunicação robustos. A análise gráfica e quantitativa realizada fornece insights valiosos, tanto para o estudo acadêmico quanto para aplicações práticas. Essas simulações ressaltam a importância de equilibrar eficiência espectral e confiabilidade, especialmente em canais adversos, e enfatizam a relevância de técnicas de mitigação para enfrentar os desafios impostos por ambientes reais.

O estudo pode ser expandido para incluir cenários mais complexos, como canais com desvanecimento seletivo em frequência, ou o uso de técnicas avançadas, como equalizadores adaptativos e esquemas de diversidade espacial, para aprofundar o entendimento sobre o desempenho de sistemas de comunicação modernos.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 15606-2/2023. Televisão digital terrestre – Codificação de dados e especificações de transmissão para radiodifusão digital. Parte 2: Gíngua-NCL para receptores fixos e móveis – Linguagem de aplicação XML para codificação de aplicações.2023b. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/26751/abnt-nbr15606-2-televisao-digital-terrestre-codificacao-de-dados-e-especificacoes-de-transmissao-para-radiodifusao-digital-parte-2-ginga-ncl-para-receptores-fixos-e-moveis-linguagem-de-aplicacao-xml-para-codificacao-de-aplicacoes>. Acesso em: 04 Nov. 2024.

ABNT. NBR 15604:2023. Televisão digital terrestre – Receptores. 2023a. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/26715/abnt-nbr15604-televisao-digital-terrestre-receptores>. Acesso em: 09 Nov. 2024.

ABNT. NBR 15607-1. Televisão digital terrestre – Canal de interatividade. Parte 1: Protocolos, interfaces físicas e interfaces de software. 2008. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/27035/abnt-nbr15607-1-televisao-digital-terrestre-canal-de-interatividade-parte-1-protocolos-interfaces-fisicas-e-interfaces-de-software>. Acesso em: 10 Nov. 2024.

ALENCAR, M. S., Televisão Digital, editora Érica, 2012.

ANATEL. Agência Nacional de Telecomunicações. Ato nº 7.989, de 22 de junho de 2023. Estabelece normas e diretrizes para operação de redes de telecomunicações e segurança da informação. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 23 jun. 2023. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/component/content/article/161-atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2023/1877-ato-7989>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

BEDICKS, G., YAMADA, F., SUKYS, F., DANTAS, C. E., RAUNHEITTE, L. T. M., Akamine, C., Results of the ISDB-T System Tests, as Part of Digital TV Study Carried Out in Brazil, IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING, VOL. 52, NO. 1, p. 38-44, mar 2006. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1599569>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

BENDOV O., BROWNE, J. F. X., RHODES, C. W., WU Y., BOUCHARD P., DTV Coverage and Service Prediction, Measurement and Performance Indices, IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING, VOL. 47, NO. 3, Sept. 2001. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/969370/similar#similar>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

BORBA, M. A. C. Medição de cobertura no sistema brasileiro de TV digital terrestre. 2011 - Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/917>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

BRASIL. Decreto nº 5.820, de 29 de junho de 2006. Dispõe sobre a implantação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre – SBTVD-T e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 jun. 2006. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/decreto/d5820.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%205.820%2C%20DE%2029%20DE%20JUNHO%20DE%202006.&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20implanta%C3%A7%C3%A3o%20do,televis%C3%A3o%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias. Acesso em: 02 Nov. 2024.

BRASIL. Ministério das Comunicações. Portaria nº 2.992, de 26 de maio de 2017. Estabelece as condições e premissas para o desligamento da transmissão analógica de serviços de radiodifusão de sons e imagens e de retransmissão de televisão. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 29 maio 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mcom/pt-br/acesso-a>

informacao/legislacao/copy8_of_PORTARIAN2.992DE26DEMAIODE2017.pdf. Acesso em: 02 Nov. 2024.

BRASIL. Ministério das Comunicações. Portaria nº 11.476, de 8 de dezembro de 2023. Altera a Portaria MCOM nº 2.992, de 26 de maio de 2017, e a Portaria de Consolidação GM/MCOM nº 1, de 2 de junho de 2023, para estabelecer diretrizes para o desligamento dos sinais analógicos de televisão. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 8 dez. 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-mcom-n-11476-de-8-de-dezembro-de-2023-529259203>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

CARVALHO, R.M. Comunicações Analógicas e Digitais. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

FERNANDES, J.; LEMOS, G; SILVEIRA, G. Introdução a televisão digital interativa: Arquitetura, Protocolos, Padrões e Práticas. Apresentado na jornada de atualização em informática do congresso da sociedade brasileira de computação. JAI-SBC, em Salvador – BA – Agosto de 2004. Anais da JAI – SBC, 2004. Disponível em: <https://www.cin.ufpe.br/~fab/cursos/metodologia-graduacao/2006-1/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0%20Televis%C3%A3o%20Digital%20Interativa%20Arquitetura,%20Protocolos,%20Padr%C3%B5es%20e%20Pr%C3%A1ticas-thiago-augusto.htm>. Acesso em: 20 Nov. 2024.

INATEL. Sinais e Sistemas em TV Digital. Módulo 2. 2007 – Curso de Sistemas de TV Digital.

ITU (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION). TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. ITU-T. Recommendation H.761. Nested Context Language (NCL) and Ginga-NCL for IPTV services, 2009. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/T-REC-H.761>. Acesso em: 12 Nov. 2024.

FILHO, A. B. O sistema Brasileiro de televisão digital: do sonho a realidade. Instituto Euvaldo Lodi, Núcleo central. TV digital: qualidade e interatividade/IEL.NC. Brasília, 2007. P. 17. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/48662928/tv-digital-qualidade-e-interatividade-cni>. Acesso em: 19 Nov. 2024.

LOPES, D. M. M. S. Sistema Brasileiro de Tv Digital: Caminhos percorridos e implantação. Universidade Federal do Piauí. INTERCOM – SP. V Congresso Nacional História da Mídia. 2007. Disponível em: <http://www.intercom.org.br/papers/outros/hmidia2007/resumos/R0097-1.pdf>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

MORRIS, S. SMITH-CHAIGNEAU, A. Interactive TV Standards. Burlington: Editora Taylor & Francis, 2005. ISBN 0240806662, 9780240806662. 585 p.

PICCIONI, C. A.; BECKER, V.; MONTEZ, C. (2005). Juri virtual: uma aplicação de governo eletrônico usando televisão digital interativa. In: Conferência Sul Americana em Ciência e Tecnologia Aplicada ao Governo Eletrônico. Florianópolis: Ijuris. p. 19-32.

SALLES, Filipe. A Imagem Eletrônica: o Vídeo. Endereço eletrônico. 2008. Disponível em: https://00749854413868244465.googlegroups.com/attach/3a3abaa1a924e755/cine_cap6video.pdf?part=0.1&vt=ANaJVrEo0Pvndf_iCNifTPV87bhZu8FMK6BCLWLIOWk7aikXUjufKUKIkLxH1cJSUYVw-a839tGTdILyRXw8ExhfdHXmz0ro6ErlJ23kjpbrV1uTF_9XZgY. Acesso em: 02 Nov. 2024.

SANTOS, Paloma. BRAGA, Marcus. FERREIRA, Marcus. SPANHOL, Fernando. (2012). The Evolution of Television in Brazil: a literature review. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277020658_The_Evolution_of_Television_in_Brazil_a_literature_review. Acesso em: 15 Nov. 2024.