

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



MARCUS VINICIUS OLIVEIRA CONCEIÇÃO

**TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DOS SISTEMAS 4G LTE E
SBTVD-T NA BANDA DOS 700 MHZ**

VITÓRIA – ES
MARÇO/2016

MARCUS VINICIUS OLIVEIRA CONCEIÇÃO

TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DOS SISTEMAS 4G LTE E SBTVD-T NA BANDA DOS 700 MHZ

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Marcus Vinicius Oliveira Conceição**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção de grau de Engenheiro Eletricista.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Adriano Lima e Silva
Orientador

Msc. Esequiel da Veiga Pereira
Coorientador

Prof. Dr. Evandro Ottoni Teatini Salles
Examinador

Msc. Carlos Alberto Dalarmelina
Examinador

RESUMO

Este trabalho compila muitas informações e conceitos envolvidos a respeito da implantação do sistema de telefonia 4G Long Term Evolution para a faixa dos 700 MHz, nas vizinhanças da banda pertencente ao Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre, o SBTVD-T. A princípio, são apresentados os históricos da TV digital no Brasil e das gerações de telefonia predecessoras ao 4G LTE. As especificações do SBTVD-T e do 4G LTE com foco na técnica de modulação OFDM também são apresentadas. Ao final, é proposta uma simulação no software Matlab, que descreve um processo de transmissão e recepção dos sinais de ambos os sistemas citados, com uma análise de uma possível interferência entre eles, além de avaliações de desempenho.

Palavras-chave: SBTVD-T, 4G LTE, OFDM, Interferências.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arquitetura em blocos do sistema de TV digital	20
Figura 2 - Padrão básico de transmissão da TV digital	21
Figura 3 - Padrão básico de recepção da TV digital	21
Figura 4 - Comparação de respostas de tempo versus frequência entre sistemas uniportadora e multiportadora.....	23
Figura 5 - a) Modulação multiportadora sem sobreposição; (b) Modulação multiportadora com sobreposição ou ortogonal	24
Figura 6 - Modelo simplificado de um transceptor OFDM.....	25
Figura 7 - Comparação entre as transmissões sem e com extensão cíclica	26
Figura 8 - Ambiente com multipercurso.....	27
Figura 9 - Distorção introduzida pelo canal no sinal OFDM	30
Figura 10 - Posicionamento das subportadoras piloto no tempo e na frequência	31
Figura 11 - a) Arranjo em bloco das subportadoras piloto; (b) Arranjo combinado das subportadoras piloto.....	32
Figura 12 - Modelo de um transceptor OFDM com subportadoras piloto	33
Figura 13 - BST-OFDM: configuração em camadas.....	34
Figura 14 - Misturador ou conversor de frequências.....	37
Figura 15 - Receptor super-heteródino	38
Figura 16 - Curvas de resposta de um receptor sintonizado em 25 MHz.....	40
Figura 17 - Filtro de 700 MHz.....	41
Figura 18 - Máscara do filtro de 700 MHz	42
Figura 19 - <i>Cluster</i> de sete células.....	44
Figura 20 - Coberturas para comunicações móveis: (a) convencional e (b) celular.....	44
Figura 21 - Rede celular com PSTN interligada.....	46
Figura 22 - Portadoras na técnica FDMA.....	48
Figura 23 - Portadoras na técnica FDMA.....	49
Figura 24 - Portadoras na técnica CDMA	50
Figura 25 - Evolução das gerações de telefonia celular	53
Figura 26 - Estrutura de <i>frame</i> do tipo 1 (<i>Frame</i> FDD)	55
Figura 27 - Estrutura de símbolo	56
Figura 28 - Bloco de recursos para o caso de prefixo cíclico normal.....	58
Figura 29 - Bloco de recursos com símbolos de referência para o caso de CP normal.....	59

Figura 30 - Diagrama de blocos do sistema simulado em Matlab.....	66
Figura 31- Arranjo de canais utilizados para os testes de canal adjacente e canal imagem ...	68
Figura 32 - Curva de distribuição gaussiana.....	70
Figura 33 - Processo de filtragem digital.....	76
Figura 34 - Janela de Hamming para $M = 12$	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Canal com distribuição de amplitude do tipo Rayleigh	28
Gráfico 2 - Distribuição de amplitude do tipo AWGN.....	29
Gráfico 3 - Sinais e espectros do SBTVD e 4G LTE em banda base (filtro gaussiano)	70
Gráfico 4 - Sinais e espectros do SBTVD e 4G LTE em banda passante (filtro gaussiano)..	71
Gráfico 5 - Sinais e espectros do SBTVD-T e 4G LTE multiplexados (filtro gaussiano)	71
Gráfico 6 - Diagrama de constelação do sinal SBTVD-T (com filtro gaussiano).....	73
Gráfico 7 - Diagrama de constelação do sinal 4G LTE (com filtro gaussiano)	73
Gráfico 8 - Curva BER vs. SNR do sinal SBTVD-T (com filtro gaussiano)	74
Gráfico 9 - Curva EVM vs. SNR do sinal SBTVD-T (com filtro gaussiano).....	75
Gráfico 10 - Sinais e espectros do SBTVD e 4G LTE em banda base (filtro FIR).....	78
Gráfico 11 - Sinais e espectros do SBTVD e 4G LTE em banda passante (filtro FIR)	79
Gráfico 12 - Sinais e espectros do SBTVD-T e 4G LTE multiplexados (filtro FIR).....	79
Gráfico 13 - Diagrama de constelação do sinal SBTVD-T (com filtro FIR)	80
Gráfico 14 - Diagrama de constelação do sinal 4G LTE (com filtro FIR)	80
Gráfico 15 - Curva BER vs. SNR do sinal SBTVD-T (caso de filtro FIR).....	81
Gráfico 16 - Curva EVM vs. SNR do sinal SBTVD-T (caso de filtro FIR).....	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cronograma do desligamento da TV analógica	17
Quadro 2 - Resumo dos parâmetros do SBTVD.	35
Quadro 3 - Parâmetros da camada física do LTE (downlink).	57
Quadro 4 - Espectro de frequências e alguns dos serviços atribuídos.	65
Quadro 5 - Canais do SBTVD-T e 4G LTE utilizados nos testes de interferência.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira Geração
1xEV-DO	<i>Evolution Data-Only</i>
2,5G	Segunda Geração e Meia
2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
AAC	<i>Advanced Audio Coding</i>
ABERT	Associação Brasileira de Emissoras de Rádio e Televisão
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACK	<i>Acknowledge</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ATSC	<i>Advanced Television System Committee</i>
AVC/ H.264	<i>Advanced Video Coding</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i>
BCH	<i>Broadcast Channel</i>
BER	<i>Bit Error Ratio</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BST-OFDM	<i>Band Segmented Transmission - Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CCC	Central de Comutação e Controle
CCCH	<i>Common Control Channel</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i>
DL-SCH	<i>Downlink Shared Channel</i>
DM-RS	<i>Demodulation Reference Signals</i>
DTCH	<i>Dedicated Traffic Channel</i>
DTMB	<i>Digital Terrestrial Multimedia Broadcast</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>

DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
DVB-T2	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial Second Generation</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for Global Evolution</i>
EM	Estação Móvel
eNodeB	<i>Enhanced NodeB</i>
ERB	Estação Rádio Base
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FI	Frequência Intermediária
GPRS	<i>General Purpose Radio Services</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
ICI	<i>Inter-Carrier Interference</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IMTS	<i>Improved Mobile Telephone Systems</i>
INATEL	Instituto Nacional de Telecomunicações
ISDB-T	<i>Integrated Service Digital Broadcasting Terrestrial</i>
ISDB-T/B	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial/version B</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
Matlab	<i>Matrix Laboratory</i>
MCCH	<i>Multicast Control Channel</i>
MCH	<i>Multicast Channel</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MPEG-4	<i>Motion Picture Expert Group 4</i>
MSC	<i>Mobile Services Switching Center</i>
MTCH	<i>Multicast Traffic Channel</i>
MTS	<i>Mobile Telephone Service</i>

NAK	<i>Negative Acknowledge</i>
NAS	<i>Non Access Stratum</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PCCH	<i>Paging Control Channel</i>
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
PCH	<i>Paging Channel</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PHICH	<i>Physical Hybrid Indicator Channel</i>
PMCH	<i>Physical Multicast Channel</i>
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
PSS	<i>Primary Synchronization Sequence</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RACH	<i>Random Access Channel</i>
RDSI	Rede Digital de Serviços Interligados
RE	<i>Ressource Element</i>
RF	Radio Frequência
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
SBTVD-T	Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SET	Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão
SHF	<i>Super High Frequency</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> ou Relação Sinal Ruído

SRS	<i>Sounding Reference Signal</i>
SSS	<i>Secondary Synchronization Sequence</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
Telerj	Telecomunicações do Estado do Rio de Janeiro
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UL-SCH	<i>Uplink Shared Channel</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WAP	<i>Wireless Application Protocol</i>
WCDMA	<i>Wide-Band Code Division Multiple Access</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Número de subcanais
NT_s	Período de símbolo de subcanal
τ_{\max}	Atraso por multipercurso
$h(t)$	Canal de comunicação
R_b	Taxa de dados codificados (bitstream)
R_N	Taxa de subseqüências de dados
m	Número de bits
s_i	Símbolo complexo
a_i	Parte real do símbolo complexo
jb_i	Parte imaginária do símbolo complexo
M	Índice de modulação
B_N	Largura de banda de símbolo modulado
T_g	Duração de intervalo de guarda
N_0	Potência de ruído
B_d	Espalhamento doppler
τ_m	Atraso de subportadoras piloto
N_p^t	Espaçamento entre subportadoras piloto
$T_{\text{símbolo}}$	Período de símbolo OFDM
Δf	Largura de banda da subportadora piloto
f_{LO}	Frequência do oscilador local
f_c	Frequência da portadora
f_{FI}	Frequência intermediária
f_i	Frequência imagem
ω_{mix}	Frequência angular do misturador
ω_c	Frequência angular da portadora
MHz	Megahertz
dB	Decibel
Q	Ordem de filtro
T_s	Unidade básica de tempo para camada física do LTE
T_{frame}	Duração de um frame LTE
T_{subframe}	Duração de um frame LTE

T_{slot}	Duração de um subframe LTE
T_u	Duração útil de um símbolo LTE
T_{CP}	Duração de prefixo cíclico normal em LTE
$T_{\text{CP-e}}$	Duração de prefixo cíclico estendido em LTE
f_s	Taxa de amostragem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	O SISTEMA BRASILEIRO DE TV DIGITAL	19
2.1	A Técnica de Transmissão e Modulação OFDM	22
2.1.1	O prefixo cíclico	26
2.1.2	O canal de comunicação	27
2.1.2.1	O canal Rayleigh	27
2.1.2.2	O canal AWGN	28
2.1.3	Estimação de Canal	29
2.1.3.1	Detecção coerente	30
2.2	A modulação BST-OFDM	33
2.3	Sintonizadores	36
2.3.1	Sintonizadores <i>Can Tuners</i>	36
2.3.1.1	Sintonizadores super-heteródinos	36
2.3.1.2	Misturador ou <i>mixer</i> de frequências	36
2.3.2	Sintonizadores <i>Silicon Tuners</i>	41
2.4	O filtro de 700 MHz para mitigação de interferência	41
3	O SISTEMA DE TELEFONIA MÓVEL.....	43
3.1	Estrutura celular	44
3.1.1	O sistema móvel celular	45
3.1.1.1	Estação rádio base (ERB)	45
3.1.1.2	Estação móvel (EM)	46
3.1.1.3	Estação de comutação móvel	46
3.2	Técnicas de múltiplo acesso	47
3.2.1	A tecnologia FDMA	47
3.2.2	A técnica TDMA	48
3.2.3	A técnica CDMA	49
3.3	Evolução das tecnologias de telefonia celular	50
3.3.1	A primeira geração (1G)	50
3.3.2	A segunda geração (2G)	50
3.3.2.1	A geração 2,5 G	51
3.3.3	A terceira geração (3G)	52
3.4	Long Term Evolution (LTE)	53

3.4.1	Parâmetros da camada física	54
3.4.2	Sinais de referência	58
3.4.2.1	Sinais de referência de <i>downlink</i>	58
3.4.2.2	Sinais de referência de <i>uplink</i>	59
3.4.3	Sequências de sincronização	60
3.4.4	Canais lógicos, canais físicos e sinais físicos	60
3.4.4.1	Canais e sinais físicos	61
3.4.4.2	Canais de transporte	62
3.4.4.3	Canais lógicos	62
4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DO	
	SBTVD-T E DO 4G LTE	64
4.1	Espectro de Frequências	64
4.2	Metodologia da simulação	66
4.3	Resultados da simulação	69
4.3.1	Filtro Gaussiano	69
4.3.1.1	Diagramas de constelação	72
4.3.1.2	Taxa de erro de bit versus relação sinal-ruído (BER vs. SNR)	74
4.3.1.3	Medição da magnitude do vetor de erro versus relação sinal-ruído (EVM vs. SNR)	75
4.3.2	Filtro Digital FIR	76
4.3.2.1	Diagramas de constelação	80
4.3.2.2	Taxa de erro de bit versus relação sinal-ruído (BER vs. SNR)	81
4.3.2.3	Medição da magnitude do vetor de erro versus relação sinal-ruído (EVM vs. SNR)	82
5	CONCLUSÕES	83
6	BIBLIOGRAFIA	84

1 INTRODUÇÃO

O processo de implantação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T) teve início no ano de 1998, com testes de desempenho dos dois sistemas de televisão digital que entraram em vigor naquele mesmo ano: o europeu *Digital Video Broadcasting* (DVB) e o americano *Advanced Television System Committee* (ATSC). Os testes foram realizados pela Universidade Presbiteriana Mackenzie em conjunto com a Associação Brasileira de Emissoras de Rádio e Televisão (ABERT) e a Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão (SET). Os resultados dos testes foram encaminhados para a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) e serviram de subsídio para a elaboração de um sistema de televisão digital a ser adotado pelo governo brasileiro (YAMADA *et al.*, 2006).

No início do ano 2000, o sistema de televisão digital japonês *Integrated Service Digital Broadcasting Terrestrial* (ISDB-T) que estava em fase final de desenvolvimento, foi também objeto de teste enquanto os anteriores estavam praticamente concluídos. E nos anos de 2003 a 2005, novas avaliações atualizadas dos três sistemas foram feitas e comparadas com suas antecessoras (YAMADA *et al.*, 2006).

Os resultados dos testes demonstraram que o padrão japonês ISDB-T e a técnica de modulação *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (COFDM) apresentaram os melhores desempenhos de robustez e flexibilidade quanto à mobilidade do receptor, e assim, formaram a base para o padrão SBTVD-T (CRAUS, 2008).

Quando comparado ao sistema analógico de TV, O SBTVD-T oferece melhor qualidade de som e imagem, otimização do uso do espectro de frequência e portabilidade. O sistema de TV digital também oferece recursos de interatividade, onde o telespectador tem acesso a serviços de programação personalizada, correio eletrônico, participação de aulas, etc. (CRAUS, 2008).

Por meio do decreto nº 5.820, de 29 de junho de 2006, o SBTVD-T foi implantado no Brasil e sua primeira transmissão ocorreu na capital do Estado de São Paulo em dois de dezembro de 2007 (CRAUS, 2008).

Desde 2006, As emissoras de TV aberta estão empenhadas em levar o sinal de TV digital aberta às cidades brasileiras. Mais de 700 cidades no país já foram atendidas e este número aumenta todos os meses (DTV, 2015).

Atualmente no Brasil, os sistemas de televisão analógica e digital são transmitidos simultaneamente para que a população e as emissoras possam se preparar para a transmissão inteiramente digital. O Governo Brasileiro estabeleceu pelo decreto nº 8.061, de 29 de julho de 2013, um calendário para o desligamento completo do sinal analógico, com início no ano de 2015 e encerramento previsto para 31 de dezembro de 2018 (CRAUS, 2008) (DTV, 2015).

Em setembro de 2014, a Anatel licitou a faixa de frequências que varia de 698 a 806 MHz, popularmente conhecida no Brasil como faixa dos 700 MHz, para a implantação do sistema de telefonia móvel de quarta geração (4G) *Long Term Evolution* (LTE), que será liberada com o fim da transmissão do sinal de TV analógica. As frequências foram adquiridas pelas empresas Vivo, Tim, Claro e Algar. A banda adjacente com faixa de 470 a 698 MHz continua destinada no Brasil à TV aberta (SET, 2014) (TELECO, 2014).

A escolha da faixa dos 700 MHz tem importância estratégica, pois a frequência permite, entre outras características, um menor número de estações rádio base (ERB's ou eNodeB's), adequado para países com grandes áreas e densidade populacional pequena. Além disso, características eletromagnéticas da faixa dos 700 MHz permitem ondas com maior raio de cobertura e maior robustez do sinal, quando comparado com frequências mais elevadas (a faixa atual do LTE é a de 2500 MHz) (IZARIO; AKAMINE, 2015).

A interferência do LTE operando em faixa adjacente à TV digital vem preocupando o setor de telecomunicações nos últimos anos. Em fevereiro de 2014, a Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão (SET) apresentou um estudo feito juntamente com a Universidade Presbiteriana Mackenzie e submetido ao Ministério das Comunicações e à Anatel, onde afirmou que a interferência prejudicial na recepção de TV digital implicará em interrupções, imagens congeladas ou tela negra. Os resultados obtidos no estudo mostraram que para assegurar a qualidade de recepção do sinal de TV, são necessárias diversas medidas de mitigação, como alterações em antenas, adição de filtros nos televisores e nos transmissores LTE (SET, 2014).

A SET recomenda que a Anatel crie requisitos técnicos e imposição de obrigações às operadoras de telecomunicações para que as mesmas executem as medidas de mitigação. A revisão dos sistemas domésticos de recepção de TV que são fracos e obsoletos também representa uma medida de mitigação, além do desenvolvimento de profissionais capacitados e especificação de equipamentos adequados (SET, 2014).

O Quadro 1 apresenta o cronograma de desligamento gradativo da TV analógica em algumas cidades brasileiras até o desligamento completo.

Quadro 1 - Cronograma do desligamento da TV analógica

Ano	Data	Localidades
2015	29 de novembro	Rio Verde/GO (Piloto)
2016	3 de abril	Brasília
	15 de maio	São Paulo
	26 de junho	Belo Horizonte
	28 de agosto	Goiânia
	27 de novembro	Rio de Janeiro
2017	25 de junho	Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre
	30 de julho	Salvador, Fortaleza e Recife
	27 de agosto	Campinas e Ribeirão Preto
	24 de setembro	Vale do Paraíba e Santos
	29 de outubro	Interior do RJ e Vitória
	26 de novembro	São José do Rio Preto e Presidente Prudente
2018	1.º de julho	Manaus, Belém e São Luís
	29 de julho	Natal, João Pessoa, Maceió, Aracajú e Teresina
	26 de agosto	Campo Grande, Cuiabá e Palmas
	25 de novembro	Porto Velho, Macapá, Rio Branco e Boa Vista
	25 de novembro	Demais cidades

Fonte: LINHARES, (2015)

Este trabalho tem como objetivo geral a simulação no software *Matrix Laboratory* (Matlab) de um sistema de telecomunicações e os possíveis efeitos interferentes do sinal de telefonia de banda larga móvel 4G LTE na faixa de 700 MHz, adjacente à faixa de frequências utilizada

no Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre SBTVD-T. Propõem-se, então, os seguintes objetivos específicos:

- Geração dos sinais de SBTVD-T e 4G/LTE, dadas as suas respectivas parametrizações baseadas na técnica de modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM);
- Modulação dos sinais em banda base para a banda passante, a multiplexação e transmissão dos mesmos em um canal de comunicação;
- Demultiplexação dos sinais com o auxílio de filtros para análise de desempenho.

O objeto de pesquisa é a análise da interferência do sinal 4G LTE em canal adjacente ao sinal SBTVD-T. O Trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, com um histórico que descreve a ascensão da televisão digital brasileira e o processo de licitação da faixa dos 700 MHz para a telefonia móvel. Também é mencionado o problema da possível interferência do sinal de telefonia móvel no sistema de TV digital. No final do capítulo, descrevem-se os objetivos geral e específicos do trabalho, bem como o objeto de pesquisa.

No capítulo 2 é apresentado o Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre, suas características gerais e particularidades sobre a técnica de modulação OFDM.

O capítulo 3 aborda os conceitos básicos sobre telefonia móvel, trazendo um breve histórico das gerações de tecnologia em ordem cronológica. A tecnologia de 4G LTE, por ser parte relevante do objeto de pesquisa, é vista com mais detalhes.

O capítulo 4 mostra o espectro de radiodifusão e a disposição dos canais mais importantes ao propósito de simulação. A metodologia e os resultados da simulação também são apresentados. A simulação tem como propósito analisar o desempenho do sistema, além de especificar um filtro adequado que permita a concomitância de funcionamento dos sistemas de TV digital e de telefonia de quarta geração, sem que haja interferências.

Por fim, o capítulo 5 conclui o trabalho, enfatizando a importância das ações de mitigação para que a transferência de banda do serviço de telefonia móvel seja feita de forma cautelosa, sem impactos dispendiosos significativos para as operadoras e os consumidores finais.

2 O SISTEMA BRASILEIRO DE TV DIGITAL

Um sistema de televisão digital é composto por um conjunto de padrões de codificação de áudio e vídeo, que comparado ao sistema analógico, oferece melhorias de som e imagem, maior robustez a ruídos ou interferências e otimização do uso do espectro eletromagnético (devido ao aumento da taxa de transmissão de dados na banda de frequências disponíveis). O sistema também permite o armazenamento e processamento de informações, garantindo serviços de mobilidade e interatividade (IZÁRIO; AKAMINE, 2015).

Existem cinco padrões de TV digital terrestre em operação no mundo:

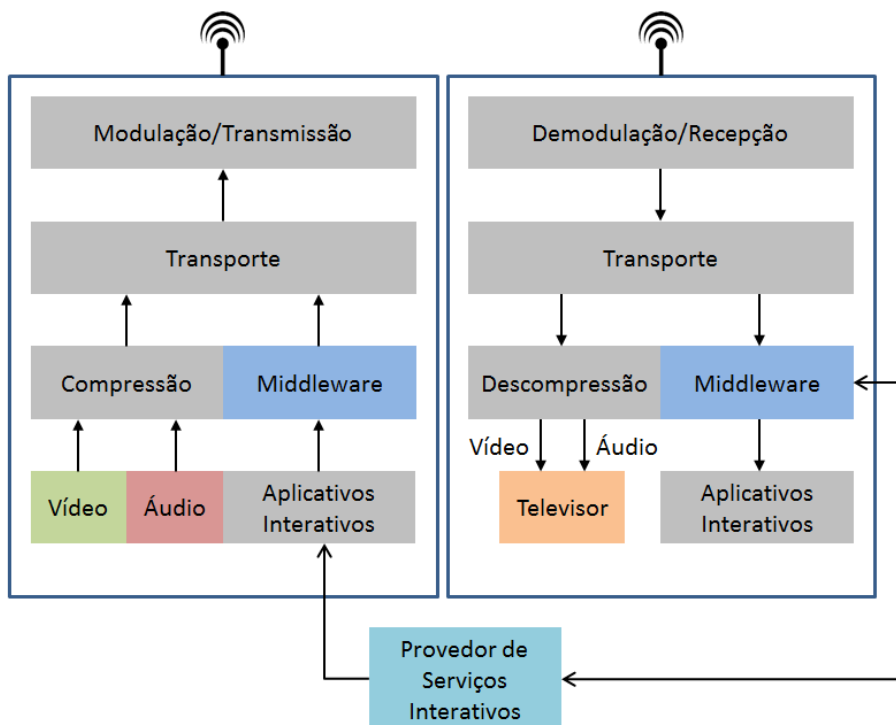
- *Advanced Television System Committee (ATSC)*;
- *Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T)*;
- *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial/version B (ISDB-T/B)*;
- *Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB)*;
- *Digital Video Broadcasting - Terrestrial Second Generation (DVB-T2)*.

O Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre (SBTVD-T) foi desenvolvido a partir do padrão japonês ISDB-T e é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15601-15608. Seus sinais são transmitidos por meio da técnica *Band Segmented Transmission - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (BST-OFDM)*, que possui a característica de banda segmentada, permitindo flexibilidade de diferentes tipos de serviços em um canal de 6 MHz. Para a compressão de áudio e vídeo são usados respectivamente, os padrões *Motion Picture Expert Group 4 (MPEG-4)*, *Advanced Audio Coding (AAC)* e *Advanced Video Coding (H.264/AVC)* (IZÁRIO; AKAMINE, 2015).

De forma análoga ao modelo *Open System Interconnection (OSI)* para redes de computadores, o modelo de arquitetura de um sistema de TV digital é dividido em camadas autônomas que prestam ou recebem serviços entre suas vizinhas (PAES, 2005).

A Figura 1 apresenta o modelo de arquitetura da TV digital, com funções de modulação e demodulação comuns à TV analógica convencional, além das funções de compressão, descompressão e middleware.

Figura 1 - Arquitetura em blocos do sistema de TV digital

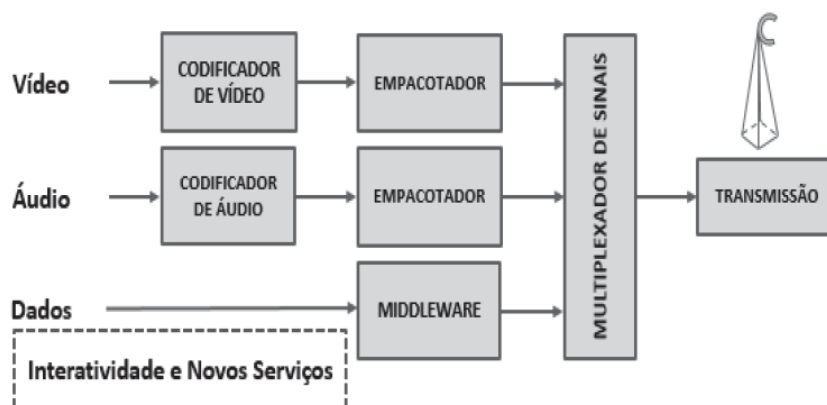


Fonte: Produção do próprio autor.

O middleware ocupa uma posição entre a camada de transporte e os aplicativos interativos. Com o recurso da interatividade, o telespectador pode ver informações detalhadas de uma atração, responder perguntas, conhecer melhor produtos e serviços que deseja comprar e ter acesso a informações sobre serviços do governo e de utilidade pública (PAES, 2005).

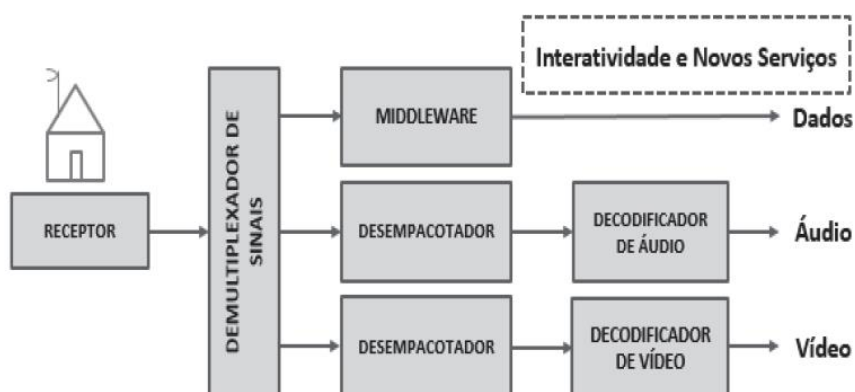
As Figuras 2 e 3 apresentam respectivamente, os diagramas de blocos funcionais básicos dos processos de transmissão e recepção de um sinal de TV digital.

Figura 2 - Padrão básico de transmissão da TV digital



Fonte: IZÁRIO; AKAMINE, (2015).

Figura 3 - Padrão básico de recepção da TV digital



Fonte: IZÁRIO; AKAMINE, (2015).

2.1 A Técnica de Transmissão e Modulação OFDM

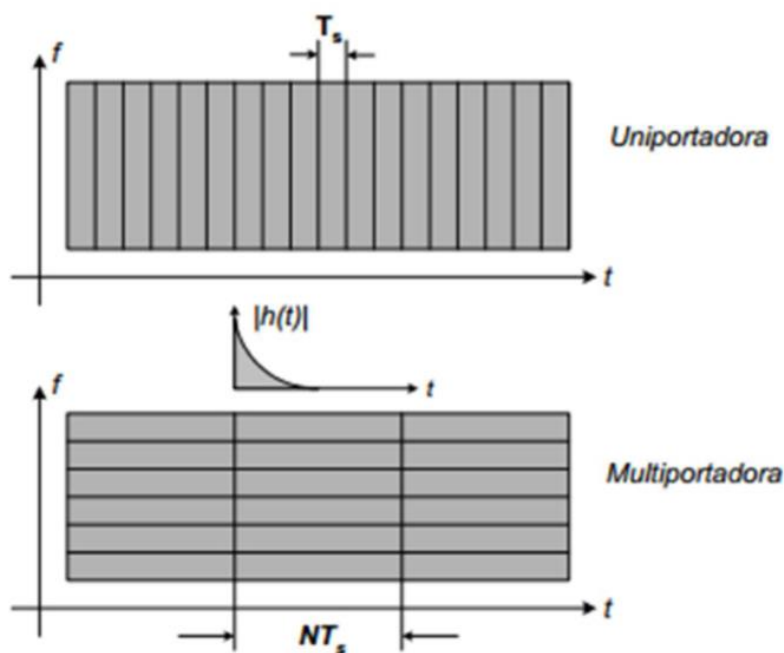
O padrão de comunicação para redes sem fio do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) 802.11a apresentou como novidade, no ano de 1999, uma nova tecnologia de transmissão e modulação conhecida como *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM). Dessa forma, foi possível obter melhorias significativas no aproveitamento da largura de banda disponível com o aumento das taxas de transmissão de dados (ROCHOL, 2012).

A técnica OFDM consiste de um sistema de modulação multiportadora feito de maneira digital, onde dados sequenciais a serem transmitidos são divididos em várias subsequências, que são moduladas paralelamente em igual número de portadoras e transmitidas simultaneamente em subcanais idealmente ortogonais (SILVA, 2006).

A modulação multiportadora se apresenta como uma alternativa eficiente no combate ao fenômeno denominado de multipercurso, típico de transmissões sem fio e que consiste na sobreposição de várias réplicas com diferentes atrasos entre si do sinal original. Quando tais atrasos são maiores do que o período de símbolo transmitido, ocorre a chamada interferência intersimbólica, no Inglês, *Inter-Symbol Interference* (ISI), que por sua vez, provoca o aumento da taxa de erros de bit (BER) na recepção, podendo inviabilizar a transmissão de dados (SILVA, 2006).

Na técnica de modulação multiportadora, o número de subcanais N é escolhido de forma que o período de símbolo de cada subcanal, NT_s , seja maior do que o espalhamento ou atraso por multipercursos, τ_{max} do canal $h(t)$, como mostra a Figura 4 (SILVA, 2006), (SILVA, 2004).

Figura 4 - Comparação de respostas de tempo versus frequência entre sistemas uniportadora e multiportadora



Fonte: SILVA, (2006).

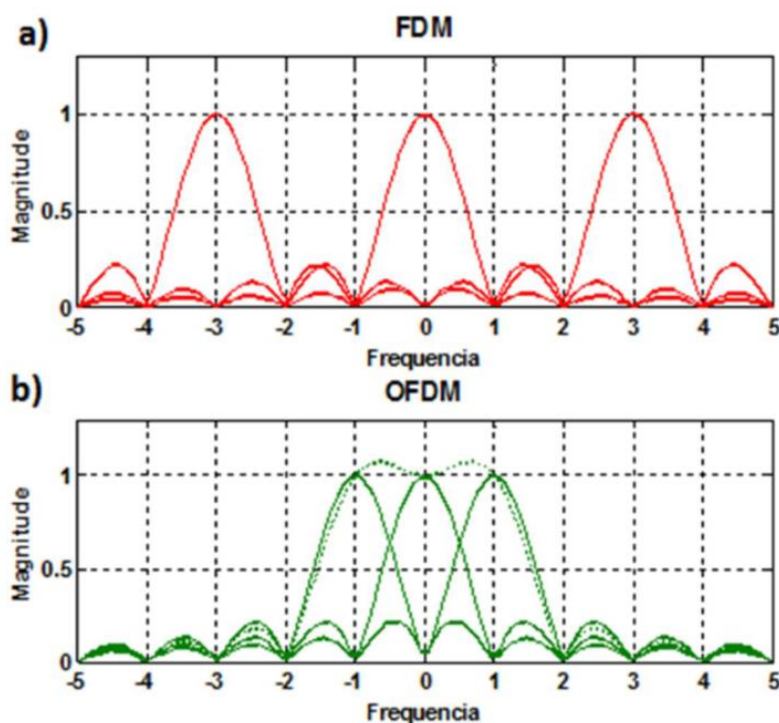
A Figura 4 evidencia que a duração de símbolo NT_s do sistema multiportadora é maior do que o atraso provocado pelo canal, garantindo maior robustez à ISI. O mesmo não ocorre com o sistema uniportadora.

Mesmo com a notável robustez e eficiência, a modulação multiportadora apresentou até certo tempo, inviabilidades de aplicação por ser de alto custo e de alto consumo de potência, pois para cada N portadoras são necessários os respectivos N moduladores e demoduladores. A técnica OFDM veio solucionar esses problemas com a realização dos algoritmos de multiplexação e demultiplexação das subportadoras via transformadas discretas de Fourier inversa e direta, respectivamente. O algoritmo que processa a transformada discreta inversa de Fourier é denominado pelo termo *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), ou Transformada Rápida Inversa de Fourier, enquanto que o algoritmo da transformada discreta de Fourier

direta é chamado de *Fast Fourier Transform* (FFT), ou Transformada Rápida de Fourier (SILVA, 2006), (SILVA, 2004).

Na técnica de modulação multiportadora OFDM, as N portadoras (subportadoras) se sobrepõem de modo que não ocorra interferência entre as mesmas. Tal condição é possível com a relação matemática de ortogonalidade, ou seja, cada subportadora possui um espectro no formato da função $\text{sen}(x)/x$ e é disposta de modo que seu máximo esteja centrado nos zeros das subportadoras adjacentes. Assim, a técnica OFDM facilita a recepção do sinal e apresenta melhor eficiência espectral quando comparada a outras técnicas multiportadoras, como a *Frequency Division Multiplexing* (FDM), por exemplo. Nesta última técnica citada não ocorre sobreposição de subportadoras. A Figura 5 traz um comparativo entre as técnicas de modulação multiportadora com e sem sobreposição de subportadoras (SILVA, 2006), (SILVA, 2004), (DUTRA, 2010).

Figura 5 - a) Modulação multiportadora sem sobreposição; (b) Modulação multiportadora com sobreposição ou ortogonal

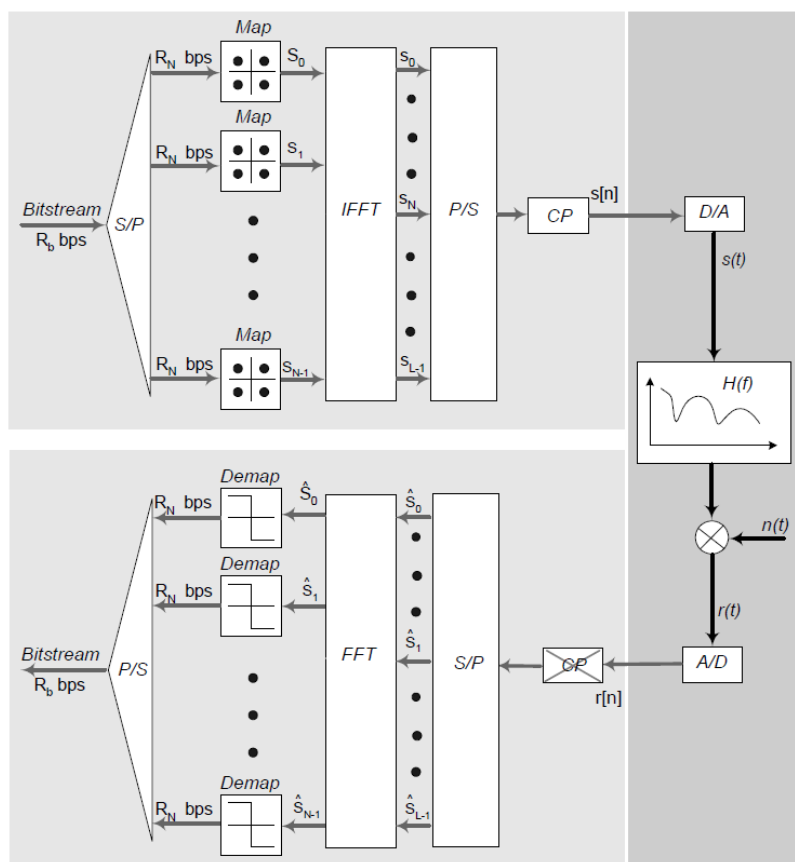


Fonte: SILVA, (2006).

Na Figura 5, é notório que o emprego da técnica OFDM reduz de forma significativa a largura de banda ocupada pelo sinal, garantindo assim, melhor eficiência espectral.

A Figura 6 mostra o diagrama de blocos básico do processo de modulação OFDM. A transmissão multiportadora é feita em banda base, onde uma sequência de dados codificados, ou o *bitstream*, é gerada à taxa R_b e dividida em N subseqüências de taxa R_N através do bloco conversor serial para paralelo (*S/P*). Contendo m bits, cada subseqüência é mapeada em um símbolo complexo $s_i = a_i + jb_i$, conforme constelação desejada formada de $M = 2^m$ pontos (bloco *Map*). Os símbolos mapeados são enviados ao bloco *IFFT*, onde são modulados e convertidos do domínio discreto para o domínio de tempo contínuo. Cada símbolo modulado passa a ocupar uma largura de banda $B_N = B/N$, sendo B a largura de banda do sinal original. Somados, tais símbolos formam o sinal multiportadora a ser transmitido no canal após a conversão paralelo para serial (bloco *P/S*) (SILVA, 2006).

Figura 6 - Modelo simplificado de um transceptor OFDM



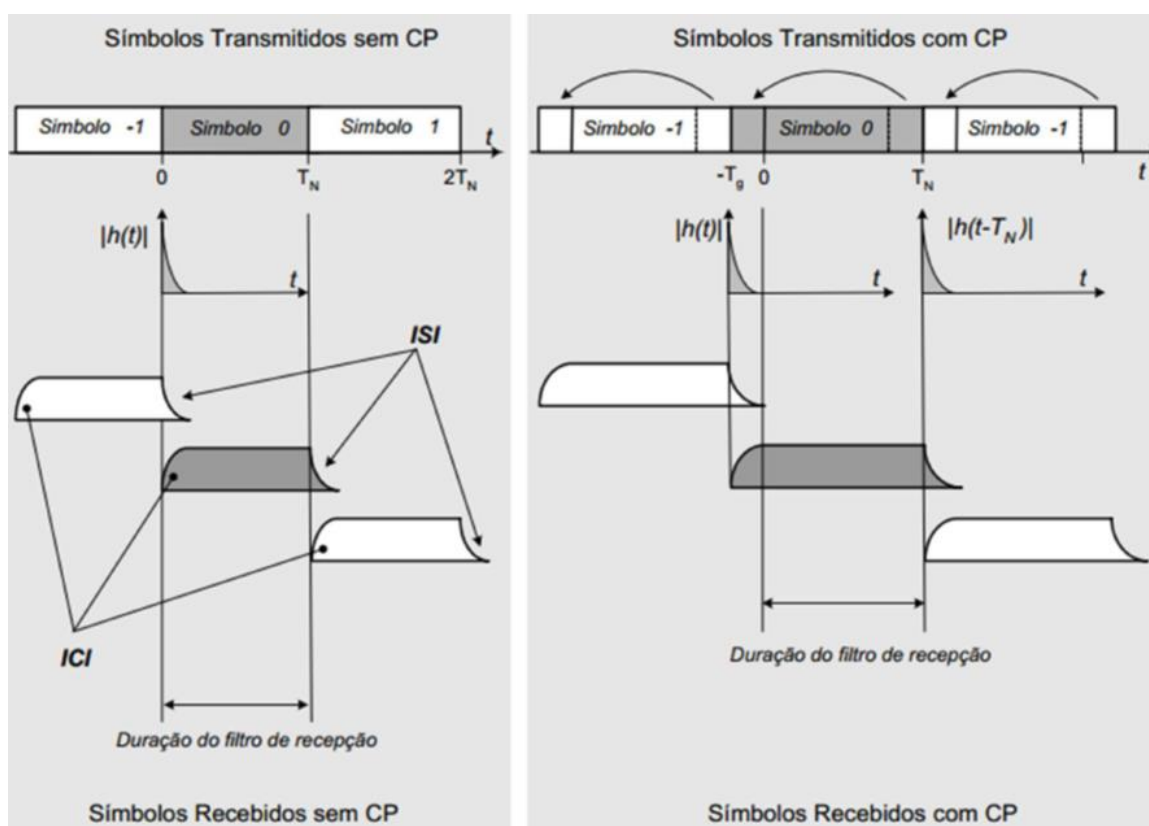
Fonte: Silva, (2006).

Na recepção ocorre basicamente o processo inverso da transmissão. Detalhes sobre o canal de comunicação serão explicados posteriormente à seção seguinte do texto. Antes da sequência serial disponibilizada na saída do transmissor se propagar no canal de RF, a ela são adicionados os prefixos cíclicos em intervalos de guarda.

2.1.1 O prefixo cíclico

Para o combate aos efeitos da ISI, provenientes do espalhamento causado pelos múltiplos percursos da comunicação sem fio, são usados, em sistemas de comunicação multiportadora, intervalos de guarda entre os símbolos OFDM consecutivos. Tais intervalos são preenchidos por redundâncias de símbolos OFDM, pois o contrário dessa condição (ausência ou silêncio de transmissão) acarretaria em interferências entre portadoras, as chamadas *Inter-Carrier Interference* (ICI). A Figura 7 ilustra a utilidade das redundâncias de sinal, denominadas de *cyclic prefix* (CP), ou prefixo cíclico (SILVA, 2006).

Figura 7 - Comparação entre as transmissões sem e com extensão cíclica



Fonte: SILVA, (2006).

Pode ser observado na Figura 4 que a inserção de CP faz com que as interferências ISI e ICI caiam dentro dos intervalos de guarda, que são removidos na recepção. A duração T_g de um intervalo de guarda deve ser no mínimo igual ao atraso máximo τ_{\max} do canal, de forma a impedir que parte da energia de um símbolo OFDM precedente seja “captada” pelo símbolo OFDM corrente (SILVA, 2006).

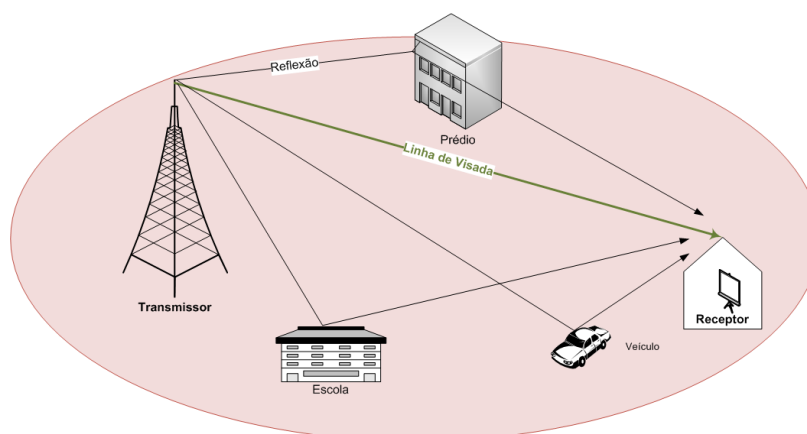
2.1.2 O canal de comunicação

Em comunicações móveis sem fio, os sinais de informação sofrem distorções causadas por reflexões e difrações na interação com obstáculos. As distorções incluem atraso de propagação, ruído térmico, atenuação na potência do sinal, desvanecimento por multipercurso e efeito Doppler. Os modelos de canal utilizados neste trabalho são os do tipo Rayleigh e *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), que serão descritos brevemente abaixo.

2.1.2.1 O canal Rayleigh

Em um canal de rádio móvel, os vários obstáculos presentes entre a transmissão e recepção de um sinal enviado funcionam como espalhadores, que ocasionam na entrada do receptor, a disposição de diversas cópias do sinal transmitido com amplitudes e fases aleatórias. Um ambiente de propagação com tal característica é denominado de canal com multipercurso e é ilustrado na Figura 8.

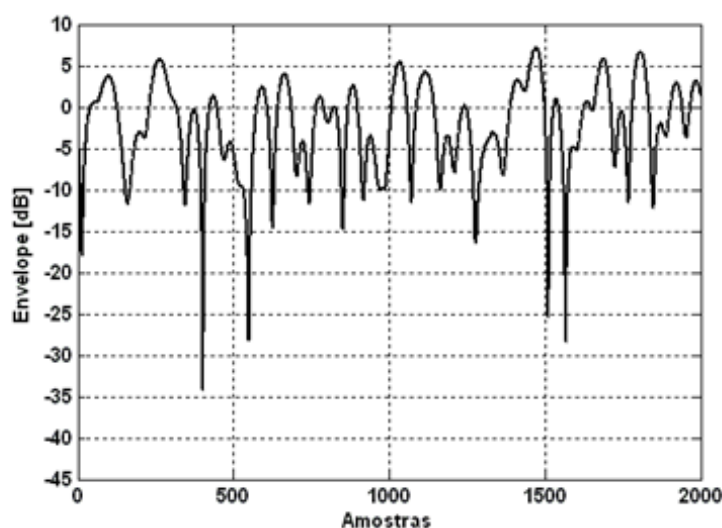
Figura 8 - Ambiente com multipercurso



Fonte: CRAUS, (2008).

Teoricamente, tanto o número de cópias do sinal que formam uma componente multipercurso quanto o número de componentes são considerados infinitos. Para o receptor essas quantidades são finitas, devido a sua capacidade limitada de discernir atrasos e de detectar componentes com amplitudes pequenas. Assume-se, portanto, que a distribuição de amplitude do canal seja do tipo Rayleigh, conforme apresentada no Gráfico 1 (CRAUS, 2008).

Gráfico 1- Canal com distribuição de amplitude do tipo Rayleigh



Fonte: Craus, (2008).

No domínio da frequência, a propagação de um sinal pode apresentar dois tipos de desvanecimento: o plano e o seletivo.

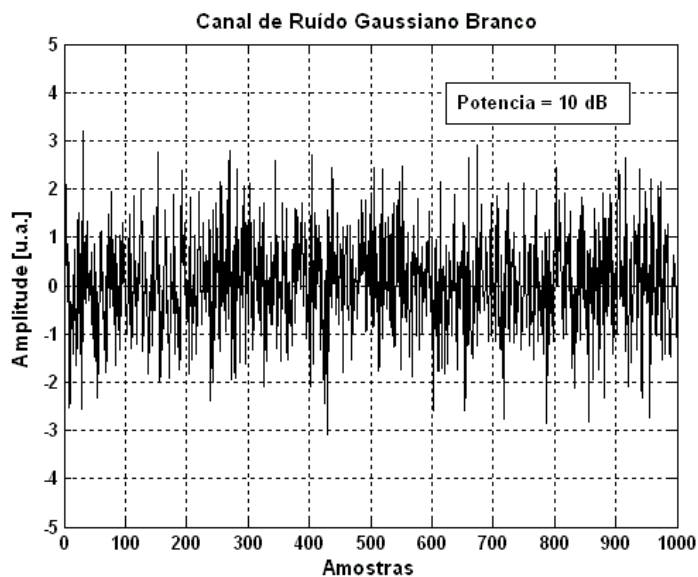
- Um sinal na recepção sofre um desvanecimento plano quando o canal de rádio móvel tem ganho constante e fase linear sobre uma largura de banda maior do que a largura de banda do sinal transmitido;
- Um sinal na recepção sofre um desvanecimento seletivo quando o canal de rádio móvel tem ganho constante e fase linear sobre uma largura de banda menor do que a largura de banda do sinal transmitido.

2.1.2.2 O canal AWGN

Na ausência de multipercurso e interferências, o ruído térmico é predominante em locais de recepção distantes. O ruído térmico pode ser considerado do tipo Branco Aditivo e Gaussiano (AWGN), ou seja, um ruído aditivo com distribuição gaussiana, largura de banda infinita e

densidade espectral de potência de $N_0/2$ [W/Hz], onde N_0 é a potência do ruído. O Gráfico 2 ilustra a distribuição de amplitude de um ruído AWGN com 10 dB de potência.

Gráfico 2 - Distribuição de amplitude do tipo AWGN



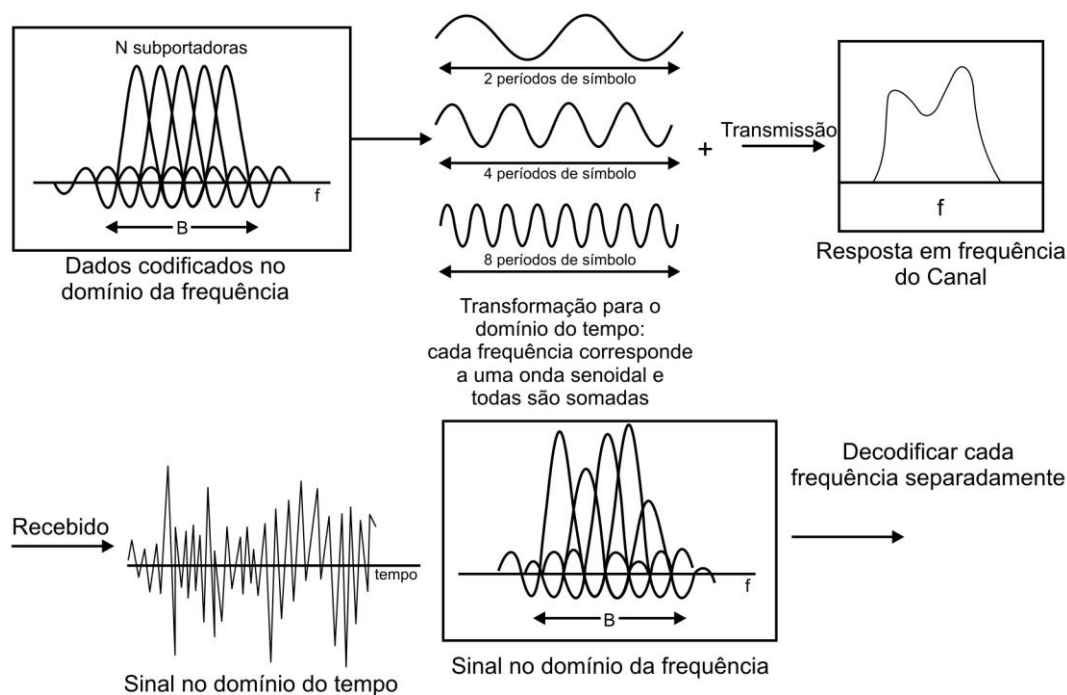
Fonte: CRAUS, (2008).

2.1.3 Estimação de Canal

A natureza da modulação OFDM possibilita o emprego de técnicas mais simples de estimação e equalização, que mantêm a comunicação mesmo em canais variantes no tempo e seletivos em frequência (DUTRA, 2010).

Em um link OFDM, os bits modulados sofrem distúrbios durante a transmissão devido aos efeitos do canal. Para o receptor recuperar o sinal corretamente, deve levar em conta as alterações sofridas pelo canal. A Figura 9 mostra uma transmissão OFDM e os efeitos do canal.

Figura 9 - Distorção introduzida pelo canal no sinal OFDM



Fonte: DUTRA, (2010).

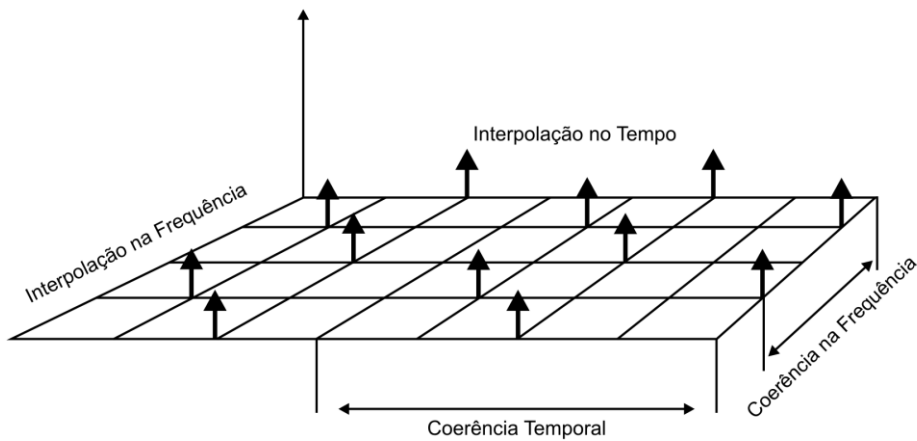
Para a recuperação dos bits do sinal enviado, o receptor pode aplicar tanto a detecção coerente quanto a não coerente. A primeira utiliza valores de referência (pilotos) que são transmitidos com os bits de informação e usados na estimação do canal de comunicação. Técnicas de interpolação também são utilizadas para a estimação. A segunda técnica de recuperação do sinal, a não coerente, não utiliza valores de referência e se utiliza do princípio da modulação diferencial. Este trabalho trata apenas dos conceitos da detecção coerente, utilizada na composição do sinal 4G LTE. Mais detalhes serão explanados em uma seção posterior.

2.1.3.1 Detecção coerente

A detecção coerente pode ser realizada por meio da inserção de valores de referência, as subportadoras piloto, em todas as subportadoras, periodicamente no tempo ou na frequência. O espaçamento entre as subportadoras piloto, tanto no tempo quanto na frequência, depende da coerência temporal e da largura de banda do canal (DUTRA, 2010).

Para que a redução da eficiência devido à inserção das subportadoras piloto seja evitada, a máxima distância possível entre os valores de referência pode ser utilizada, desde que seja menor do que a coerência temporal e a coerência de frequência. A Figura 10 mostra interpolações no tempo e na frequência das subportadoras piloto (DUTRA, 2010).

Figura 10 - Posicionamento das subportadoras piloto no tempo e na frequência



Fonte: DUTRA, (2010).

Sendo B_d o espalhamento Doppler e τ_m o atraso, escolhas adequadas para o espaçamento entre as subportadoras piloto são dadas respectivamente no tempo e na frequência por:

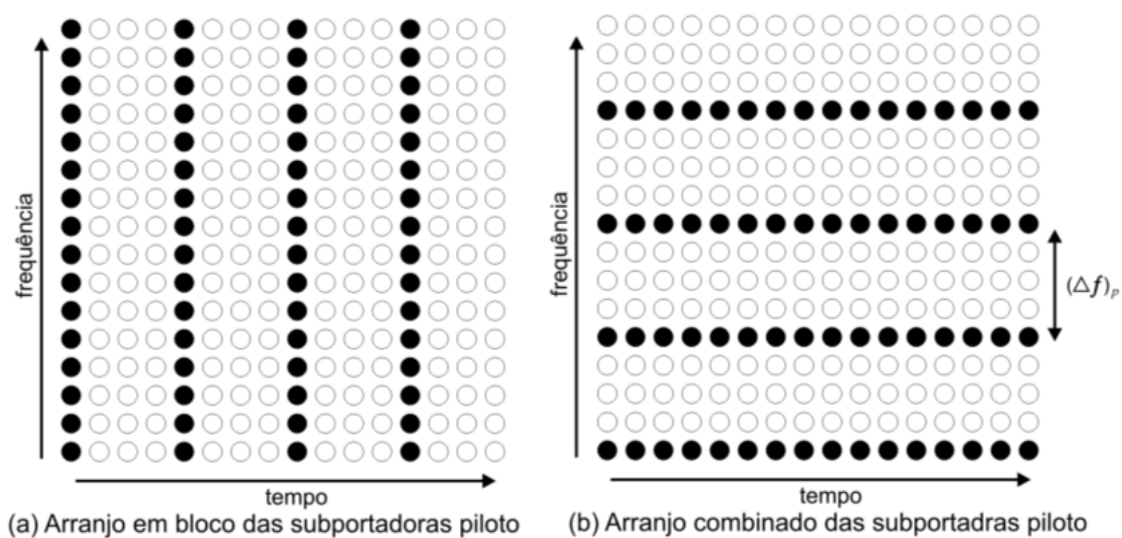
$$N_p^t = \frac{1}{B_d T_{símbolo}}$$

$$N_p^f = \frac{1}{\Delta f \tau_m}$$

Onde $T_{símbolo}$ é o período do símbolo OFDM e Δf é a largura de banda da subportadora piloto.

Existem diversos tipos de arranjos de subportadoras piloto dependentes das condições do canal. Na Figura 11 são apresentados dois tipos. O primeiro é chamado de arranjo em bloco, onde todas as subportadoras piloto são utilizadas na estimação do canal dos sucessivos símbolos OFDM, desde que o canal não varie rapidamente. O segundo é chamado de arranjo combinado (*comb-type*), no qual as subportadoras piloto são espaçadas na frequência.

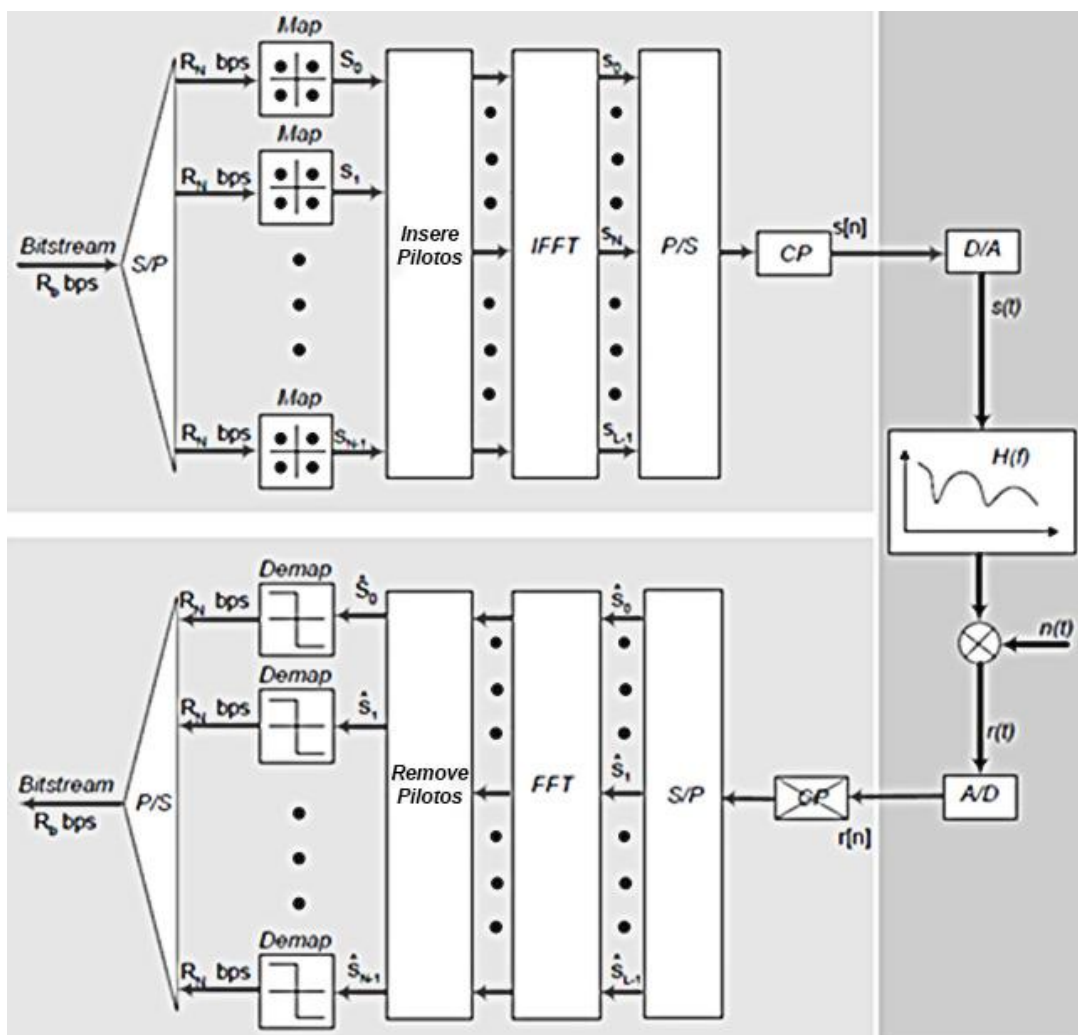
Figura 11 - a) Arranjo em bloco das subportadoras piloto; (b) Arranjo combinado das subportadoras piloto



Fonte: DUTRA, (2010).

A Figura 12 mostra o diagrama de blocos do sistema OFDM apresentado anteriormente, porém com a adição dos blocos de inserção e remoção de subportadoras piloto nas etapas de transmissão e recepção, respectivamente.

Figura 12 - Modelo de um transceptor OFDM com subportadoras piloto



Fonte: Produção do próprio autor.

2.2 A modulação BST-OFDM

A modulação *Band-Segmented Transmission Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (BST-OFDM) utilizada no SBTVD-T é uma evolução da *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (COFDM). A BST-OFDM consiste na divisão da banda útil do canal em 13 segmentos de 428,57 kHz cada, de modo a formar até três programas ou camadas

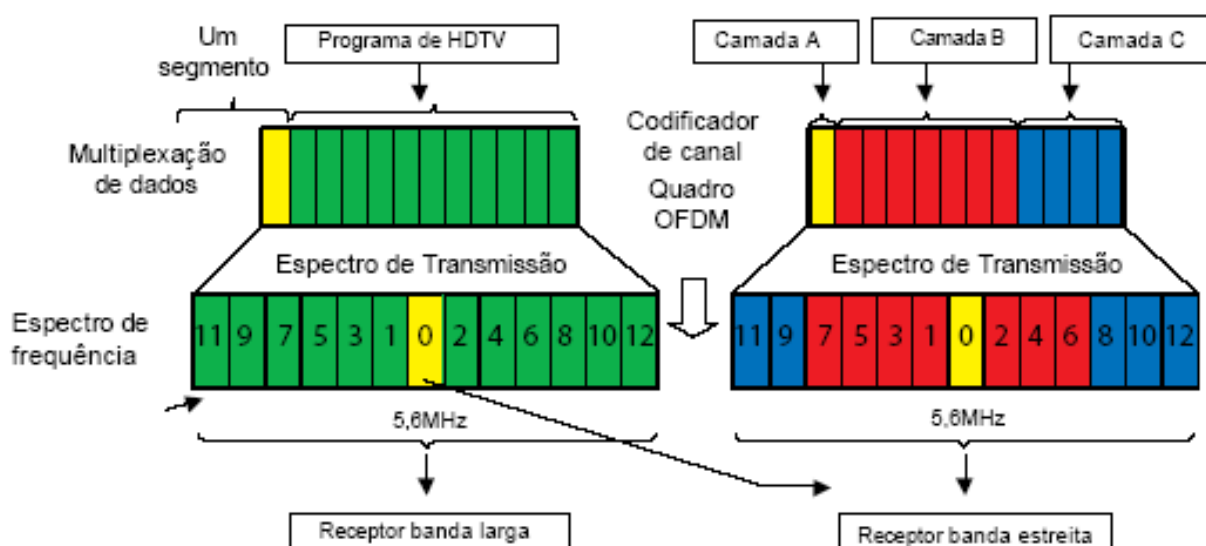
distintos. Cada segmento que pode ser denominado de segmento OFDM pode ter parâmetros de transmissão configurados individualmente (YAMADA *et al.*, 2010).

São estabelecidos três diferentes espaçamentos entre as frequências portadoras, que são denominados modos. O primeiro espaçamento ou modo 1, possui largura de 3960 Hz, o modo 2 de 1984 Hz e o modo 3 de 992 Hz. Esses espaçamentos resultam em 108 portadoras para cada segmento OFDM no modo 1, 216 portadoras no modo 2 e 432 portadoras no modo 3.

Das 108 portadoras presentes no modo 1, 96 são destinadas a transmissão de dados e as 12 restantes são utilizadas como frequências piloto. No modo 2 esse número é duas vezes maior, enquanto que no modo 3 é quatro vezes superior (YAMADA *et al.*, 2010).

A Figura 13 apresenta dois exemplos de transmissão hierárquica. O da esquerda mostra a transmissão simultânea de um programa de TV em alta definição e um programa para receptor portátil. O exemplo da direita mostra a transmissão simultânea dos três programas A, B e C em diferentes camadas hierárquicas. O número de segmentos agrupados em cada camada hierárquica pode ser selecionado pelo radiodifusor de acordo com a intenção de serviço que pretende oferecer (YAMADA *et al.*, 2010).

Figura 13 - BST-OFDM: configuração em camadas



Fonte: YAMADA *et al.*, (2010)

Os receptores de banda larga também são conhecidos como receptores full-seg e os receptores de banda estreita como receptores one-seg. Os segmentos de ordem ímpar estão localizados no lado esquerdo ao segmento central (destinado à recepção portátil, também chamada de parcial), enquanto os de ordem par estão no lado direito. Cada segmento pode ser configurado sem o envolvimento dos outros (YAMADA *et al.*, 2010).

O Quadro 2 apresenta os principais parâmetros do SBTVD-T. Vale ressaltar que a taxa de bits de transmissão assume valores diferentes dependendo do esquema de modulação, taxa de código convolucional e intervalo de guarda.

Quadro 2 - Resumo dos parâmetros do SBTVD-T

Descrição		Valor do sistema		
Número de segmentos OFDM		13		
Largura de banda do segmento		428,57 kHz		
Modo		1	2	3
Portadora por segmento		108	216	432
Portadora total por canal 6 MHz		1405	2809	5617
Espaçamento entre portadoras		3968 Hz	1984 Hz	992 Hz
Comprimento do símbolo		252 μ s	504 μ s	1008 μ s
Intervalo de guarda (μ s)	1/4	63	126	252
	1/8	31,5	63	126
	1/16	15,75	31,5	63
	1/32	7,87	15,75	31,5
Comprimento do símbolo por segmento (μ s)	1/4	315	628	1260
	1/8	283,5	565	1134
	1/16	26707	533,5	1071
	1/32	259,8	517,7	1039,5
Tipo de modulação		QPSK, 16QAM, 64QAM		
Símbolo por quadro		204		
Codificação interna		Codificação convolucional 1/2, 1/3, 3/4, 5/6, 7/8		

Fonte: YAMADA *et al.*, (2010)

2.3 Sintonizadores

O sintonizador é o elemento que sintoniza um canal de TV, filtra sinais indesejáveis, amplifica ou atenua o sinal de RF e realiza a translação do mesmo para uma frequência intermediária. Existem dois tipos de sintonizadores usados em receptores de TV digital: *Can Tuners* e *Silicon Tuners*. Eles diferem quanto ao desempenho e custo, devido a composição e fabricação (IZARIO; AKAMINE, 2015).

2.3.1 Sintonizadores *Can Tuners*

Sintonizadores do tipo *Can Tuners* utilizam sintonizadores super-heteródinos tradicionais, formados por componentes discretos dentro de um encapsulamento de metal para minimizar as interferências externas (IZARIO; AKAMINE, 2015).

2.3.1.1 Sintonizadores super-heteródinos

Os sintonizadores super-heteródinos convertem todos os sinais de entrada para uma frequência mais baixa, conhecida como frequência intermediária (FI). Assim, um único conjunto de amplificadores é usado para fornecer um nível fixo de sensibilidade e seletividade. A conversão de frequência, também chamada de heterodinação, é uma forma de modulação de amplitude realizada pelo principal circuito de um sintonizador super-heteródino, o misturador (FRENZEL JR., 2013).

2.3.1.2 Misturador ou *mixer* de frequências

Um misturador, ou conversor de frequências, pode ser descrito por meio da alteração da frequência portadora de um sinal modulado $m(t) \cos(\omega_c t)$ de ω_c para outra frequência ω_I . O sinal $m(t) \cos(\omega_c t)$ é multiplicado por $2 \cos(\omega_{mix} t)$, em que $\omega_{mix} = \omega_c + \omega_I$ ou $\omega_c - \omega_I$, e seu produto é aplicado a um filtro passa-baixa (LATHI; DING, 2012).

O produto $x(t)$ é:

$$\begin{aligned} x(t) &= 2m(t) \cos \omega_c t \cos \omega_{mix} t \\ &= m(t)[\cos(\omega_c - \omega_{mix})t + \cos(\omega_c + \omega_{mix})t] \end{aligned}$$

Caso $\omega_{mix} = \omega_c - \omega_I$, a operação é denominada descendente (*downconverter*):

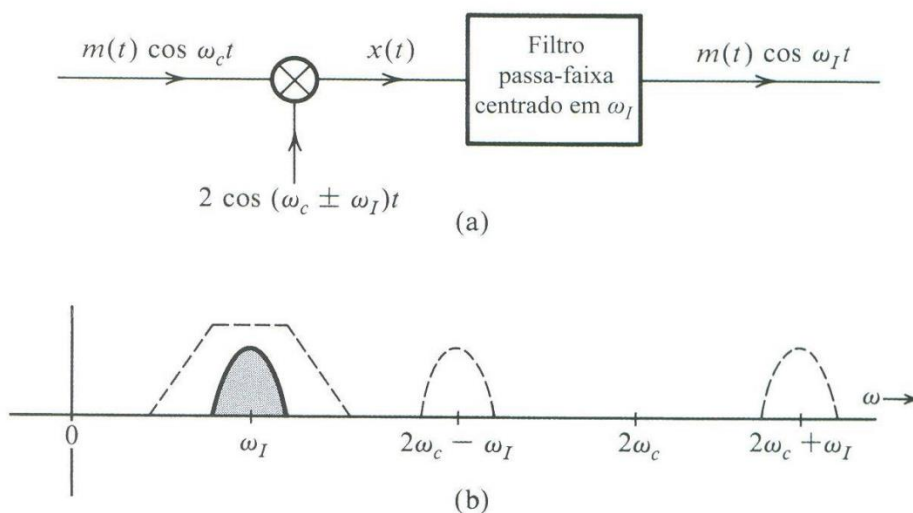
$$x(t) = m(t)[\cos \omega_I t + \cos(2\omega_c - \omega_I)t]$$

Caso $\omega_{mix} = \omega_c + \omega_I$, a operação é denominada ascendente (*upconverter*):

$$x(t) = m(t)[\cos \omega_I t + \cos(2\omega_c + \omega_I)t]$$

A Figura 14 apresenta o esquema de um misturador de frequências, além da disposição dos espectros resultantes da operação.

Figura 14 - Misturador ou conversor de frequências



Fonte: LATHI; DING, (2012)

Em qualquer dos casos, desde que $\omega_c - \omega_I \geq 2\pi B$ e $\omega_I \geq 2\pi B$, os vários espectros na Figura 2(b) não se sobrepõem. Em consequência, um filtro passa-baixa na saída, centrado em ω_I , deixará passar o termo $m(t) \cos \omega_I t$ e suprimirá o outro, produzindo a saída $m(t) \cos \omega_I t$. Dessa forma, a frequência portadora foi transladada de ω_c para ω_I (LATHI; DING, 2012).

O receptor super-heteródino, usado em sistemas de difusão AM e FM, consiste de uma seção de RF, um conversor de frequências (como mostrado acima), um amplificador de frequência

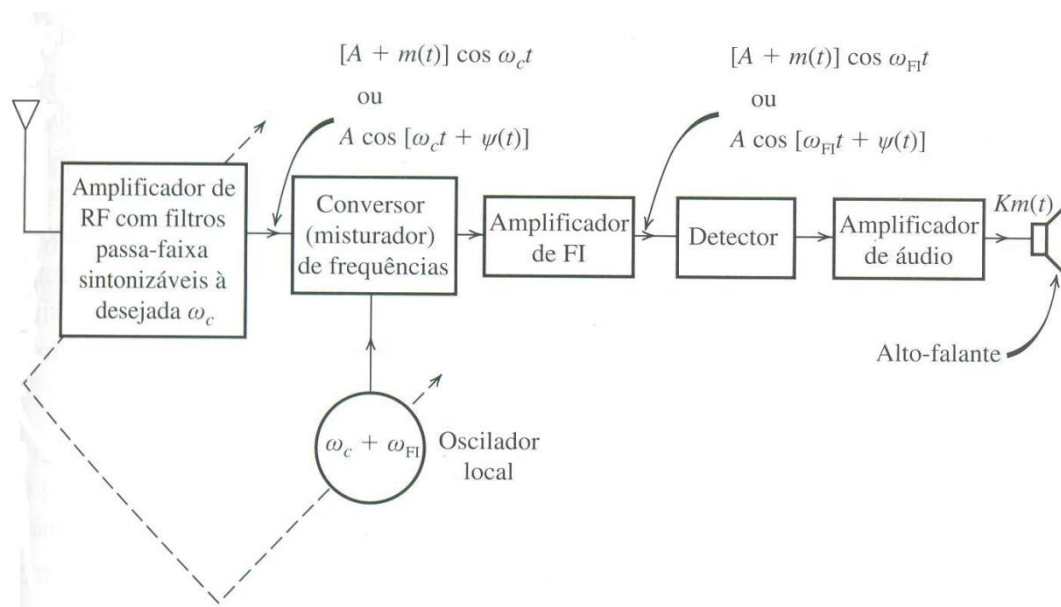
intermediária (FI), um detector de envoltória e um amplificador de áudio (LATHI; DING, 2012).

A seção de RF consiste basicamente de um filtro sintonizável e um amplificador que captura a estação desejada sintonizando o filtro a uma faixa de frequências apropriada. A seção do misturador translada uma portadora de ω_c a uma frequência intermediária FI fixa ω_{FI} . Para esse fim, o receptor usa um oscilador local, cuja frequência f_{LO} é exatamente um valor f_{FI} maior que a frequência portadora de entrada f_c , ou seja:

$$f_{LO} = f_c + f_{FI}$$

A Figura 15 apresenta um esquema básico de um receptor super-heteródino.

Figura 15 - Receptor super-heteródino



Fonte: LATHI; DING, (2012)

A sintonia simultânea do oscilador local e do filtro de RF sintonizável é feita por um único botão de sintonia. Capacitores de sintonia nos dois circuitos são agrupados e projetados de modo que a frequência de sintonia do oscilador local seja sempre f_{FI} Hz acima da frequência de sintonia f_c do filtro de RF. Isso significa que cada estação sintonizada é transladada a uma frequência intermediária fixa de f_{FI} Hz pelo conversor de frequências, para processamento posterior na FI (LATHI; DING, 2012).

Essa estrutura do receptor super-heteródino é largamente utilizada na maioria dos sistemas de difusão. As frequências intermediárias usuais são escolhidas em 455 kHz para rádio AM, 10,7 MHz para rádio FM e algum valor da faixa de 40 a 50 MHz para a recepção de TV. Na região de microondas, os receptores de radar geralmente usam FI na faixa de 60 MHz, enquanto os equipamentos de comunicações via satélite utilizam FI's de 70 a 140 MHz (LATHI; DING, 2012).

Um sinal indesejado, denominado de imagem, pode aparecer na entrada do oscilador e consiste de um sinal RF de interferência potencial, espaçado a partir do sinal desejado de entrada por uma frequência de duas vezes a frequência intermediária acima ou abaixo da frequência de entrada (FRENZEL JR., 2013).

$$f_i = f_c + 2f_{FI}$$

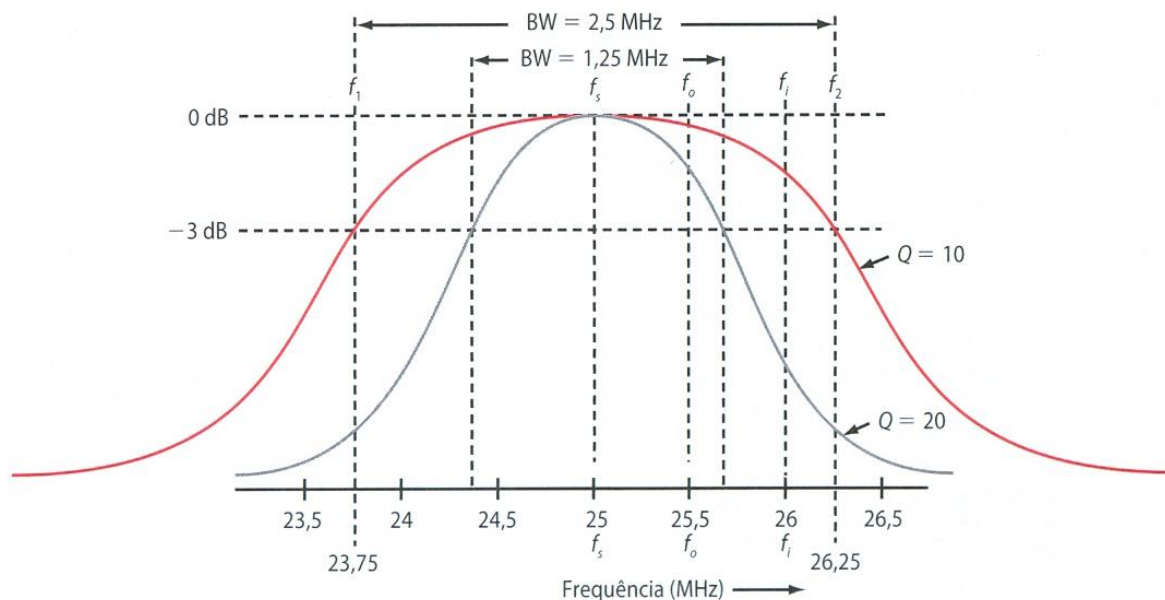
ou

$$f_i = f_c - 2f_{FI}$$

A ocorrência de imagens depende da frequência do oscilador local f_{LO} estar acima ou abaixo da frequência do sinal. Atualmente, com o espectro de RF bastante ocupado, as chances de existir um sinal na frequência imagem são altas. Além disso, muitos receptores têm amplificadores RF de banda larga que permitem a passagem de muitas frequências dentro de uma faixa específica. A interferência da imagem pode até mesmo tornar o sinal desejado ininteligível (FRENZEL JR., 2013).

Portanto, o projeto de um receptor super-heteródino deve encontrar um maneira de resolver o problema da imagem. A Figura 16 ilustra um exemplo de aplicação de filtros de ordem alta à frente do misturador com o propósito de atenuar os efeitos da imagem.

Figura 16 - Curvas de resposta de um receptor sintonizado em 25 MHz



Fonte: FRENZEL JR., (2013).

Na figura acima, um receptor é projetado para captar um sinal de 25 MHz. A FI é de 0,5 kHz e o oscilador local é ajustado para 25,5 MHz. A frequência imagem é de $f_i = 25 + 2(0,5) = 26$ MHz e causará interferência no sinal desejado de 25 MHz a menos que seja rejeitada. O filtro de ordem $Q = 10$ apresenta largura de banda relativamente ampla, sendo que a frequência de corte superior é de 26,25 MHz e é maior do que a frequência imagem. Nessas condições, a frequência imagem aparece na banda passante, não sofre atenuação e causa interferência (FRENZEL JR., 2013).

O filtro de ordem $Q = 20$ apresenta largura de banda mais estreita e atenua de forma mais significativa a interferência da imagem. Entretanto, filtros de ordens maiores são de difícil acessibilidade e complicam o projeto de receptores. A solução para esse problema envolve a escolha de uma FI maior, sendo a mais alta possível para a eliminação eficaz do problema da imagem e baixa o suficiente para evitar problemas de projeto (FRENZEL JR., 2013).

2.3.2 Sintonizadores *Silicon Tuners*

Os *Silicon Tuners* são baseados em circuitos integrados conectados a uma placa principal. Esses circuitos integrados podem ter cobertura metálica para proteção contra interferências. As degradações causadas pela interferência de imagens não são percebidas nesse tipo de receptor, que apresenta características diferenciadas no circuito eletrônico de recepção. Os sintonizadores mais atuais aplicam a recepção homódina, sendo totalmente imunes às imagens. O receptor Silicon Tuner não é abordado na simulação deste trabalho (IZARIO; AKAMINE, 2015).

2.4 O filtro de 700 MHz para mitigação de interferência

Convêm destacar a utilização do filtro externo LTE 698 MHz em um receptor de TV para o caso da necessidade de mitigação de interferências provenientes tanto do terminal LTE quando de uma estação rádio base. Como pode ser visto na Figura 17, além do aspecto, o filtro possui especificações de banda passante de 5-698 MHz e banda de rejeição de 718-1000 MHz (LINHARES, 2015).

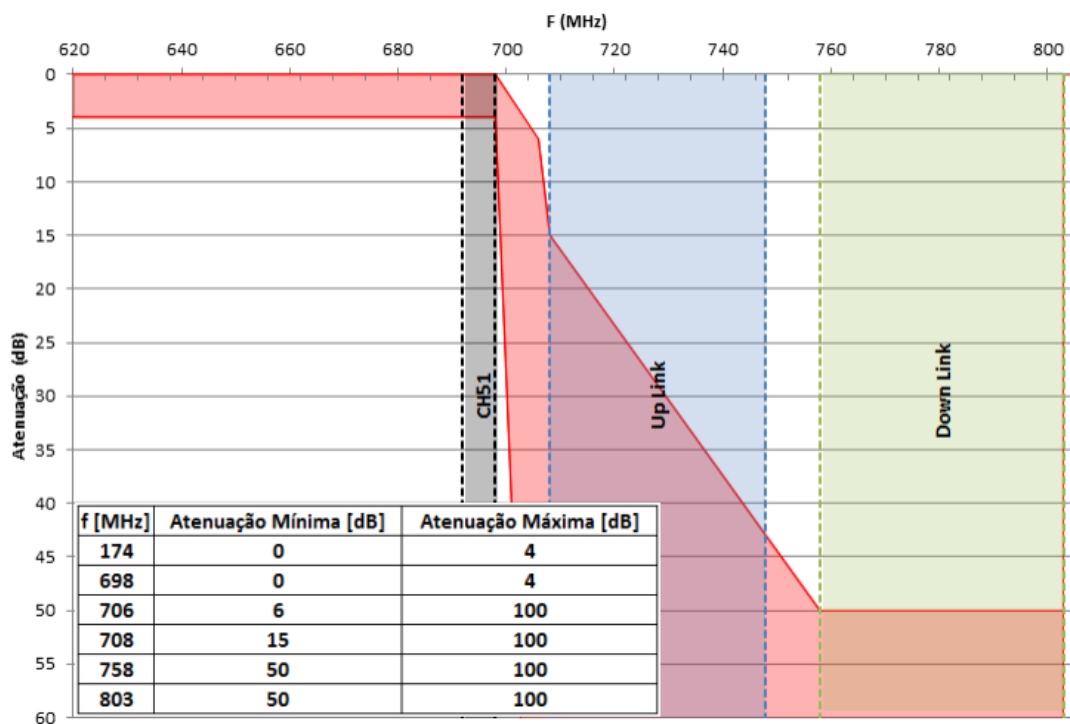
Figura 17 - Filtro de 700 MHz



Fonte: LINHARES, (2015).

A Figura 18 apresenta a máscara do filtro.

Figura 18 - Máscara do filtro de 700 MHz



Fonte: LINHARES, (2015).

3 O SISTEMA DE TELEFONIA MÓVEL

O sistema de telefonia ou comunicação móvel é aquele que consiste na possibilidade de movimento relativo entre usuários ou partes sistêmicas envolvidas. Como exemplos, podem ser citados a comunicação entre aeronaves ou entre aeronaves e uma base terrena, a comunicação entre veículos, a computação móvel e a telefonia celular (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

O MTS (*Mobile Telephone Service*) foi o primeiro sistema de comunicação móvel com certo grau de praticidade implantado pela *Bell Telephone Company*, localizada na cidade de St. Louis, estado norte-americano de Missouri, em 1946. O sistema era composto por um ponto centralizado chamado de estação base, que cobria uma única região formando uma célula, além de um transmissor de potência elevada e poucos canais de conversação (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

Embora o sistema MTS apresentasse uma boa cobertura, o seu número de usuários era limitado, pois um único usuário era detentor de um canal de radiofrequência fixo compartilhado com outros assinantes. Desta forma, um usuário estaria impossibilitado de utilizar um canal enquanto o outro estivesse falando (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

A solução para o problema foi a divisão da área de cobertura em pequenas células, onde cada uma delas passou a ter sua própria estação base e canais de RF distintos em *Ultra High Frequency* (UHF), com todos os canais da rádio base disponíveis para o usuário (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

A telefonia móvel no Brasil teve início no ano de 1972, por meio de um sistema *Improved Mobile Telephone Systems* (IMTS) implantado em Brasília. Porém, o primeiro sistema de telefonia celular foi implantado pelas Telecomunicações do Estado do Rio de Janeiro (Telertj) no Rio de Janeiro, em 1990. Este sistema era baseado no padrão analógico *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), que foi desenvolvido nos Laboratórios Bell dos Estados Unidos no ano de 1978 e operado efetivamente na cidade de Chicago em 1983 (CARVALHO; BADINHAN, 2011) (ALMEIDA, 2013).

3.1 Estrutura celular

As células são áreas de serviço individuais, onde cada uma delas possui um grupo de canais designados de acordo com o espectro disponível. Elas são normalmente representadas teoricamente por hexágonos, o que possibilita que sejam dispostas lado a lado, sem os inconvenientes de áreas de sobreposição e sombra. Um conjunto de células vizinhas que utiliza todo o espectro disponível é chamado de *Cluster* e está apresentado na Figura 17 (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

Figura 19 - *Cluster* de sete células



Fonte: CARVALHO; BADINHAN, (2011)

A Figura 20 apresenta os exemplos de cobertura de sistemas centralizados e celulares.

Figura 20 - Coberturas para comunicações móveis: (a) convencional e (b) celular



Fonte: CARVALHO; BADINHAN, (2011)

3.1.1 O sistema móvel celular

O sistema móvel celular é composto basicamente por três elementos principais:

- Estação rádio base;
- Estação móvel;
- Central de comutação móvel

3.1.1.1 Estação rádio base (ERB)

As estações rádio base promovem a comunicação de rádio entre a estação móvel (aparelho celular) e a central de comutação e controle (CCC), efetuando chamadas recebidas ou destinadas aos móveis localizados em cada célula. As ERB's são conectadas à CCC por meio de ligações terrestres ou via rádio. São funções das ERB's:

- Prover interface de rádio entre as estações móveis e o sistema;
- Converter sinais de RF em áudio e vice-versa;
- Alertar os usuários sobre chamadas recebidas;
- Informar o sistema sobre tentativas de origem de chamadas;
- Responder a comandos recebidos da CCC.

A sigla ERB entrou em desuso devido à consolidação da tecnologia de quarta geração LTE. A estação rádio base agora apresenta uma arquitetura mais sofisticada e recebe o nome de *Enhanced NodeB* (eNodeB). O termo eNodeB é denominado dessa forma para se diferenciar de NodeB, utilizado no sistema *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS), abordado posteriormente na seção que trata das tecnologias de terceira geração (SANTOS, 2010).

O sistema de rádio, conhecido como *Base Transceiver Station* (BTS), incorpora todo o conjunto de transmissão, recepção e antenas. O sistema de controle *Base Station Controller* (BSC) é responsável pelo controle, monitoramento e supervisão das chamadas (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

A área de cobertura ou abrangência de uma célula depende de diversos fatores, como potência de transmissão, altura, ganho e localização da antena. Além disso, a presença de obstáculos

(montanhas, túneis, vegetação e prédios) afeta de maneira considerável a cobertura RF de uma eNodeB (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

3.1.1.2 Estação móvel (EM)

A estação móvel é a interface entre o assinante móvel e a eNodeB. Trata-se de um transceptor portátil de voz e dados que modula e demodula as informações a serem transmitidas e recebidas, respectivamente, para a eNodeB. Também se comunica com a estação base por meio de funções de controle e sinalização (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

São algumas das funções da EM:

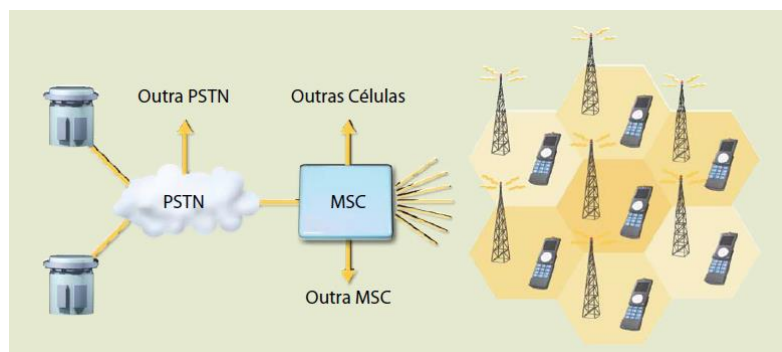
- Pedido do móvel para acessar um canal e efetuar uma chamada;
- Registro do móvel na área de serviço atual;
- Mensagem de alocação de canal para o móvel, oriunda da eNodeB.

Nos últimos anos, a EM deixou de ser apenas um rádio e se tornou uma central de recursos multimídia, com música, vídeos, jogos e TV digital (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

3.1.1.3 Estação de comutação móvel

A *Mobile Services Switching Center* (MSC), que interliga um conjunto de células, é o elemento central do sistema de comutação celular. Também pode interligar a rede de telefonia pública *Public Switched Telephone Network* (PSTN) e a Rede Digital de Serviços Interligados (RDSI). A Figura 21 ilustra uma rede de comunicação celular com uma PSTN interligada:

Figura 21 - Rede celular com PSTN interligada



Fonte: CARVALHO; BADINHAN, (2011).

São algumas funções da MSC:

- Gerenciar e controlar os equipamentos a base de conexões;
- Dar suporte a múltiplas tecnologias de acesso;
- Dar suporte de funções de processamento de chamadas;
- Controlar funções necessárias a tarifação.

Uma MSC pode ser responsável por uma grande área metropolitana ou por um grupo de pequenas cidades vizinhas. A área servida por uma MSC é denominada área de serviço e o assinante de determinada área de serviço é chamado de assinante local (home). O assinante que se desloca para uma área diferente da qual está cadastrado é denominado de visitante (*roamer*) (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

3.2 Técnicas de múltiplo acesso

O termo Múltiplo Acesso se refere à capacidade que os sistemas celulares possuem de processar várias chamadas simultâneas em uma mesma faixa de frequências, sejam eles analógicos ou digitais. O Múltiplo Acesso pode ser realizado por meio de três técnicas distintas, que são:

- FDMA (Frequency Division Multiple Access), ou Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência;
- TDMA (Time Division Multiple Access), ou Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo;
- CDMA (Code Division Multiple Access), ou Múltiplo Acesso por Divisão de Código.

3.2.1 A tecnologia FDMA

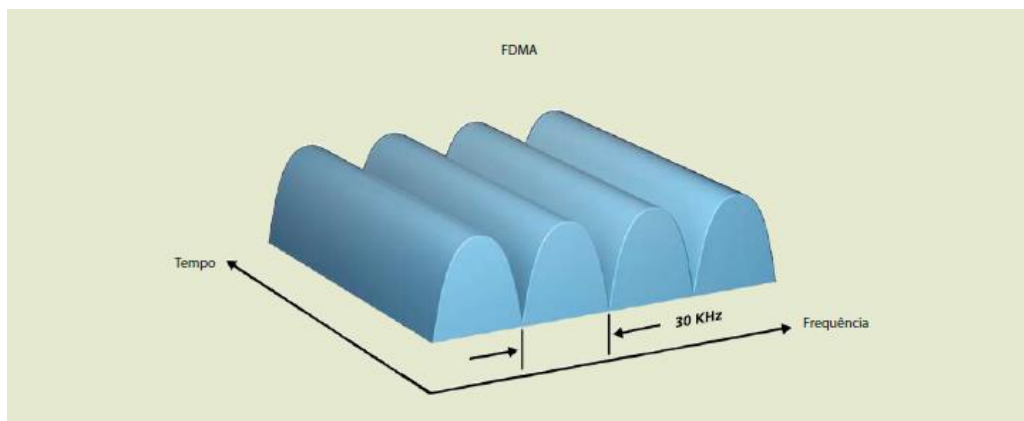
A tecnologia de Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência (FDMA) é a mais antiga, sendo utilizada, por exemplo, no padrão celular analógico AMPS. Sua largura de banda disponível é dividida em canais formados por frequências não sobrepostas, sugerindo que durante uma conversação, uma portadora estará dedicada a um único sinal de voz, sem ser compartilhada com sinais de outros usuários (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

Na transmissão, cada sinal de voz a ser enviado modula uma portadora específica e todas as portadoras moduladas são agrupadas. Na recepção, cada sinal de usuário é separado por um

filtro passa-faixa sintonizado na portadora correspondente. O desempenho dos filtros utilizados e a separação das portadoras são fatores determinantes no que diz respeito à interferência de canais adjacentes (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

A Figura 22 ilustra a disposição das portadoras na técnica FDMA.

Figura 22 - Portadoras na técnica FDMA



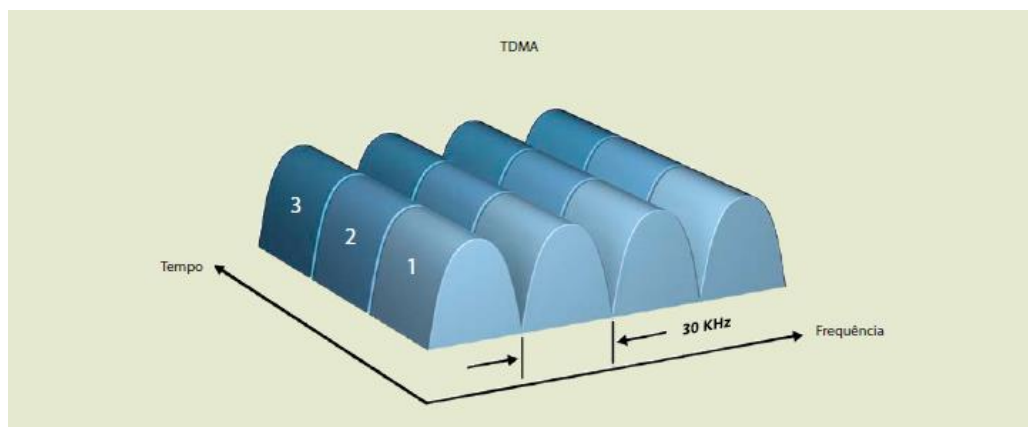
Fonte: CARVALHO; BADINHAN, (2011)

3.2.2 A técnica TDMA

Na tecnologia de Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo (TDMA), são compartilhadas várias conversações em um canal de RF, transmitidas em diferentes intervalos de tempo. Sob uma mesma frequência, ocorre um revezamento no tempo de sinais na transmissão e recepção em estações móveis. Uma faixa de frequências em um determinado intervalo de tempo (slot) é disponibilizada para um usuário de maneira cíclica (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

A técnica TDMA transmite uma palavra digital, que é composta de bits de sinais de voz codificados, de sinalização telefônica, de alinhamento de palavras e quadros e de redundância para detecção e correção de erros. A Figura 23 apresenta a disposição das portadoras na técnica TDMA (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

Figura 23 - Portadoras na técnica FDMA



Fonte: CARVALHO; BADINHAN, (2011)

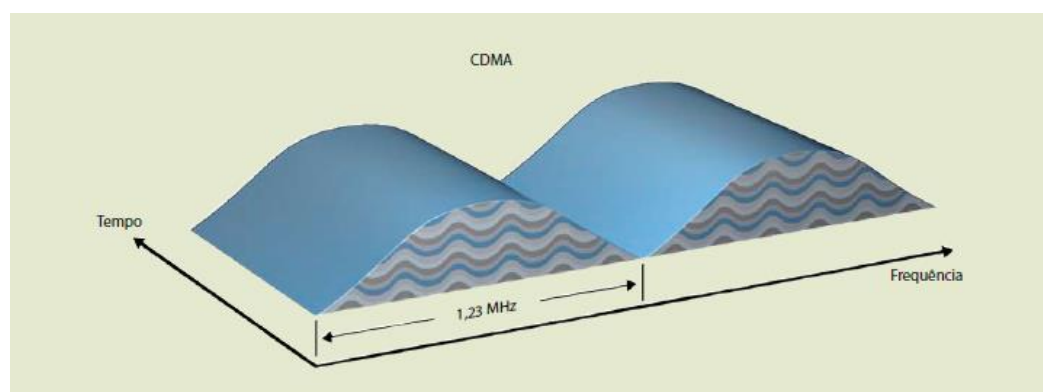
3.2.3 A técnica CDMA

A Tecnologia de Múltiplo Acesso por Divisão de Código (CDMA) utiliza o artifício de espalhamento espectral, fazendo com que a informação envolvida no processo fique contida em uma largura de banda maior do que o sinal. Assim, todos os usuários podem utilizar a mesma faixa de frequências durante todo o intervalo de tempo considerado (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

Cada uma das conversações recebe um código de identificação e todas são transmitidas simultaneamente no mesmo canal de RF em um mesmo intervalo de tempo. Os canais de comunicação são separados por uma modulação pseudo-aleatória, que é aplicada e removida no domínio digital (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

Uma mesma banda de frequências pode ser reutilizada por múltiplos usuários, garantindo as vantagens de eficiência espectral, privacidade (dificuldade na interceptação do sinal) e grande resistência a sinais interferentes. A Figura 24 exhibe as portadoras de informação codificadas (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

Figura 24 - Portadoras na técnica CDMA



Fonte: Souza, (2000).

3.3 Evolução das tecnologias de telefonia celular

Para compreender a evolução da telefonia celular, é necessário conhecer as tecnologias já desenvolvidas e as que estão sendo implementadas. Todas as tecnologias estão agrupadas sistematicamente em gerações.

3.3.1 A primeira geração (1G)

A primeira geração de comunicação wireless teve início na primeira metade dos anos 80, impulsionada pela concepção dos microprocessadores. Os primeiros sistemas 1G eram essencialmente analógicos, trafegavam apenas voz e utilizavam a técnica FDMA. Dentre os primeiros sistemas desenvolvidos, pode ser destacado o padrão AMPS, que possui como principais parâmetros: frequência de transmissão na faixa de 800 MHz, raio de cobertura de até 25 km da ERB, largura de canal de 30 kHz e taxa de transmissão de 10 kbps (ALMEIDA, 2013).

Os sistemas da geração 1G são caracterizados por problemas de capacidade, incompatibilidade e ausência de padronização entre interfaces. As chamadas de voz eram de baixa qualidade e não havia segurança na transmissão de informações.

3.3.2 A segunda geração (2G)

O aumento da demanda do serviço móvel e a necessidade de padronização do sistema de telefonia celular europeu foram fatores decisivos para o desenvolvimento dos sistemas de transmissão digital, alavancados pela tecnologia dos circuitos integrados. O sistema 2G

começou a ser empregado no início de 1990, apresentado uma série de vantagens em relação à geração anterior, como técnicas mais poderosas de codificação digital de voz, maior eficiência espectral, melhor qualidade de ligações, tráfego de dados na rede e criptografia da informação transmitida (ALMEIDA, 2013).

Como resultados da geração 2G, convém destacar as tecnologias de múltiplo acesso TDMA e CDMA e a tecnologia europeia *Global System for Mobile Communications* (GSM), ou Sistema Global para Comunicações Móveis. Em um único chip de memória ou cartão do *Subscriber Identity Module* (SIM), ou Módulo de Identidade de Assinante, foi possível armazenar o número da linha telefônica, dados pessoais e agenda de contatos. Os telefones celulares com tecnologia 2G enviam mensagens de texto *Short Message Service* (SMS) e possuem acesso à internet com baixa velocidade de conexão, utilizando a tecnologia *Wireless Application Protocol* (WAP) (CARVALHO; BADINHAN, 2011) (ALMEIDA, 2013).

São alguns parâmetros da tecnologia GSM:

- Operação nas faixas de frequência de 900, 1700 e 1800 MHz;
- Largura de canal de 200 kHz;
- Oito canais de voz por portadora;
- Taxa de transmissão do canal de 207, 833 kbps.

3.3.2.1 A geração 2,5 G

Várias tecnologias foram desenvolvidas com o intuito de solucionar as limitações dos sistemas 2G, como os padrões *General Purpose Radio Services* (GPRS) e o *Enhanced Data Rates for Global Evolution* (EDGE) (ALMEIDA, 2013).

O GPRS permite uma taxa de transmissão de até 115 kbps e a utilização de códigos corretores de erros. O padrão é baseado na comutação de pacotes, tornando eficiente o uso da largura de banda disponível com taxas de bits variável. É apropriado para serviços que utilizam transmissão por rajadas. Na prática, o GPRS permite a conexão dos smartphones à internet, permitindo que o usuário seja cobrado pelos dados consumidos e não pelo tempo de permanência no ar (ALMEIDA, 2013).

O EDGE é uma evolução do GSM/GRPS. O padrão possibilita maiores taxas de dados utilizando a portadora de 200 kHz. Poucas são as alterações na rede celular, que estão nas características de modulação e nos processos de codificação e decodificação do sinal, que realizam o envio de informação com redundâncias para o aumento de eficiência no uso do espectro disponível. O EDGE trabalha com dados avançados, como streaming de áudio e vídeo, acesso à internet com alta velocidade e download de arquivos grandes (ALMEIDA, 2013).

3.3.3 A terceira geração (3G)

O início dos estudos sobre os sistemas de terceira geração foi marcado por uma indecisão mantida por duas correntes: uma defendia a criação de um único padrão mundial enquanto a outra defendia a evolução das redes e sistemas atuais de forma a atender aos requisitos definidos a partir da visão 3G. Apesar de ambas as alternativas possibilitarem a economia de escala de fabricação para os componentes do sistema, a segunda teve maior força, pois também permitia que os maciços investimentos já realizados pelas operadoras na implantação das redes e pelos fabricantes em processo de fabricação e etapas de desenvolvimento de produtos em todo o mundo fossem de certa forma protegidos (ALMEIDA, 2013).

Os sistemas 3G são mais vantajosos em relação aos sistemas predecessores, pois oferecem serviços de telefonia e comunicação de dados com altas taxas de transferência e maior imunidade a interferências. Os principais padrões desenvolvidos são:

- UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), ou Sistema Universal de Telecomunicações Celulares;
- CDMA 1xEV-DO (CDMA Evolution Data-Optimized), ou CDMA com Evolução de Dados Otimizados;
- HSPA (High Speed Packet Access), ou Acesso em Pacotes em Alta Velocidade.

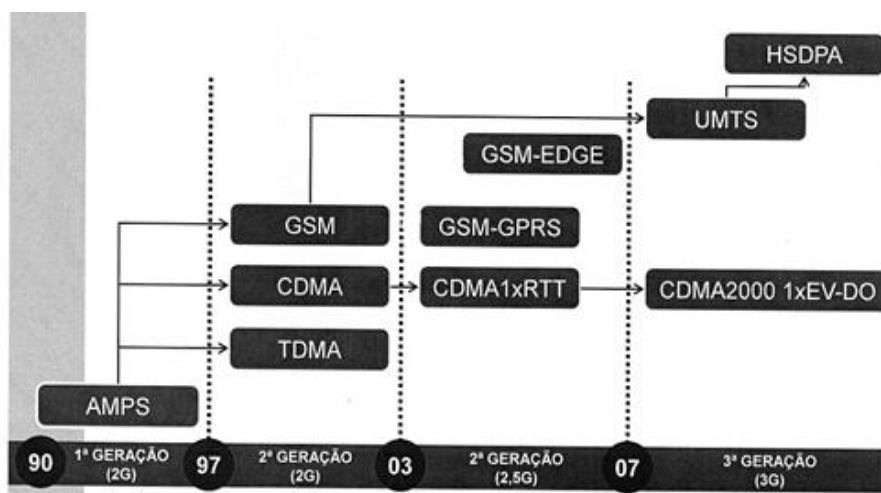
O Padrão UMTS, assim como o GPRS é uma evolução do GSM. É baseado em IP (Protocolo de Internet), opera na faixa de 1900 MHz e possui taxas de transmissão que variam de 144 kbps a 2 Mbps, que dependem do ambiente e mobilidade do usuário. O UMTS provê serviços com alto consumo de banda, como streaming e videoconferências para uma gama de aparelhos celulares e laptops (ALMEIDA, 2013).

O CDMA 1xEV-DO é uma evolução do CDMA e possui taxa de transmissão de dados com picos de até 2,4 Mbps. Utiliza a técnica CDMA 2000 para *uplink* (EM para NodeB) e a TDMA para *downlink* (NodeB para EM). Opera nas faixas de 800 e 1900 MHz (ALMEIDA, 2013).

O HSPA é resultante da utilização dos protocolos *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) e *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA). Ele melhora o desempenho dos padrões Wide-Band Code Division Multiple Access (WCDMA), com taxas de dados de 14 Mbps (*downlink*) e 5,8 Mbps (*uplink*) (ALMEIDA, 2013).

A Figura 25 ilustra de forma intuitiva, a evolução das tecnologias de telefonia celular até a geração 3G, em ordem cronológica.

Figura 25 - Evolução das gerações de telefonia celular



Fonte: Almeida, (2013)

3.4 Long Term Evolution (LTE)

O projeto da camada física do *Long Term Evolution* (LTE) segue a premissa de atender aos requisitos de alta taxa de transmissão de pico (100 Mbps para *downlink* e 50 Mbps para *uplink*), eficiência espectral e múltiplas larguras de banda do canal (1,25-20 MHz). Para o cumprimento desses requisitos, a técnica de modulação OFDM se mostrou como base para a implementação da camada física (RAYAL, 2010).

Em meados dos anos 1990, a técnica OFDM chegou a ser considerada no projeto de sistemas 3G, porém se apresentava como imatura naquela época. Somente após o desenvolvimento da eletrônica e da ciência de processamento de sinais, a tecnologia OFDM passou a ser amplamente utilizada em sistemas de acesso como 802.11 *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), 802.16 *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) e sistemas broadcast de TV e áudio digitais (RAYAL, 2010).

Além do OFDM, o LTE utiliza a técnica *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), que permite o aumento da capacidade do canal (multiplexação espacial) ou o aumento da robustez dos sinais (espaço-frequência ou tempo codificação). Em conjunto, as tecnologias OFDM e MIMO são fundamentais para o LTE e representam a maior diferença dos sistemas 3G, que são baseados em CDMA (RAYAL, 2010).

A seguir, serão apresentados os conceitos essenciais da camada física do LTE e detalhes sobre a técnica MIMO serão omitidos por fugirem do escopo desse trabalho.

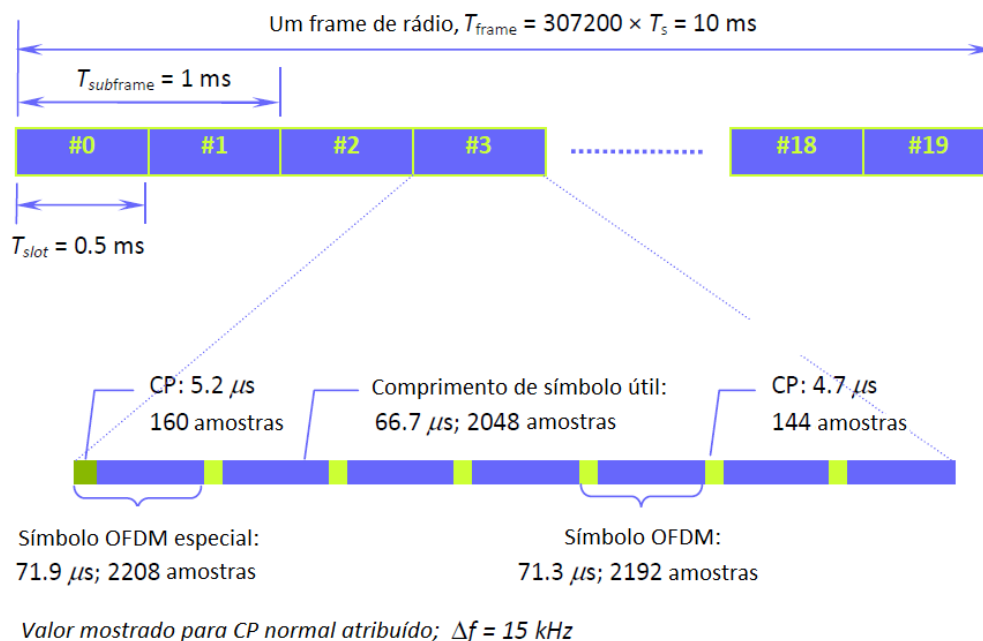
3.4.1 Parâmetros da camada física

No domínio do tempo, diferentes intervalos de tempo são expressos como múltiplos de uma unidade básica de $T_s = 1/30720000$. O frame de rádio tem um comprimento de 10 ms, onde $T_{frame} = 307200 * T_s$. Cada frame é dividido em dez partes iguais de 1 ms de comprimento ($T_{subframe} = 30720 * T_s$) (RAYAL, 2010).

Um *subframe* consiste de dois *slots* de mesmo tamanho, com 0,5 ms de comprimento cada, onde $T_{slot} = 15360 * T_s$. Cada slot por sua vez é constituído por sete símbolos OFDM para o caso de prefixo cíclico normal ou seis para o caso de prefixo cíclico estendido.

A Figura 26 mostra a estrutura de frame para o LTE no modo FDD (RAYAL, 2010).

Figura 26 - Estrutura de *frame* do tipo 1 (*Frame* FDD)

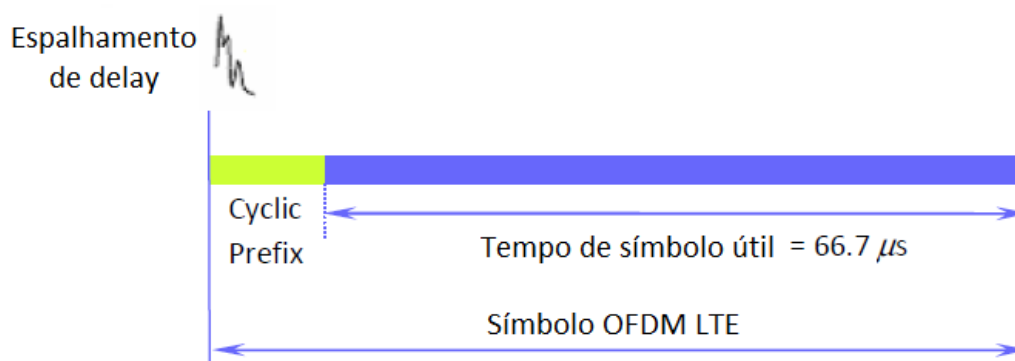


Fonte: RAYAL, (2010).

O símbolo de tempo útil é $T_u = 2048 * T_s \approx 66,7 \mu\text{s}$. Para o modo normal, o primeiro símbolo tem um prefixo cíclico de comprimento $T_{CP} = 160 * T_s \approx 5,2 \mu\text{s}$. Os seis símbolos restantes têm prefixos cíclicos de comprimento $T_{CP} = 144 * T_s \approx 4,7 \mu\text{s}$. A razão para diferentes comprimentos de CP é fazer com que o comprimento de slot seja em termos de unidade de tempo, divisível por 15360. Para o modo estendido, o prefixo cíclico é de $T_{CP-e} = 512 * T_s \approx 16,7 \mu\text{s}$ (RAYAL, 2010).

O CP é mais longo em alguns microssegundos do que o típico atraso de propagação encontrado na prática, como mostra Figura 27.

Figura 27 - Estrutura de símbolo



Fonte: RAYAL, (2010).

O prefixo cíclico normal é utilizado em células urbanas e aplicações com altas taxas de dados, enquanto o prefixo cíclico estendido é usado em transmissão multicelular e em células muito grandes, como por exemplo, áreas rurais (com baixas taxas de dados).

O CP utiliza parte da capacidade da camada física: 7,5% no caso do prefixo cíclico normal. Uma maneira de reduzir a sobrecarga relativa a inserção do prefixo cíclico é reduzir o espaçamento Δf de subportadora, com um correspondente aumento do tempo de símbolo T_u como consequência. No entanto, essa ação aumentará a sensibilidade da transmissão OFDM frente às rápidas variações de frequência do canal (alta propagação Doppler), bem como diferentes tipos de erros de frequência devido à eletrônica (RAYAL, 2010).

No domínio da frequência, o número de subportadoras N varia de 128 para 2048, dependendo da largura de banda do canal, que na prática, apresenta valores de 512 e 1024 para 5 e 10 MHz, respectivamente. O espaçamento de subportadoras é de $\Delta f = 1/T_u = 15 \text{ kHz}$. A taxa de amostragem é de $f_s = \Delta f * N = 15000N$. Os parâmetros LTE foram escolhidos de tal forma que os comprimentos da FFT e as taxas de amostragem são facilmente obtidos para todos os modos de funcionamento, ao mesmo tempo em que garante a fácil implementação de dispositivos duais com uma única referência de *clock* (RAYAL, 2010).

O Quadro 3 resume alguns dos principais parâmetros da camada física do LTE no modo FDD.

Quadro 3 - Parâmetros da camada física do LTE (*downlink*)

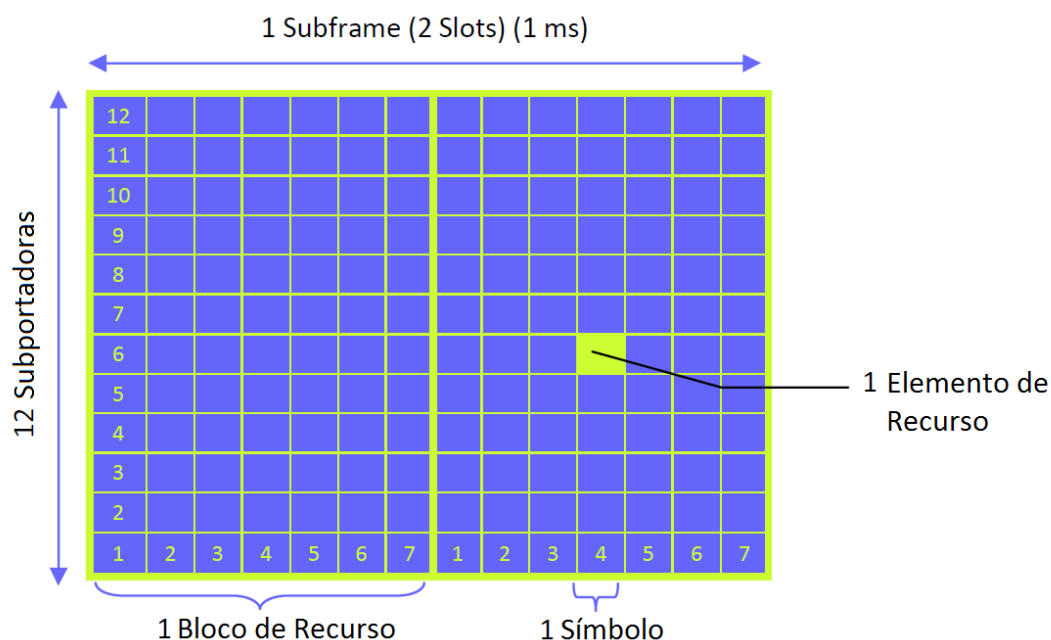
Largura de banda do canal (MHz)	1,25	2,5	5	10	15	20
Duração de <i>frame</i> (ms)	10					
Duração de <i>subframe</i> (ms)	1					
Espaçamento de subportadoras (kHz)	15					
Taxa de amostragem (MHz)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
Tamanho da FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Subportadoras ocupadas	76	151	301	601	901	1201
Subportadoras de guarda	52	105	211	423	635	847
Número de blocos de recurso	6	12	25	50	75	100
Largura de banda do canal ocupado (MHz)	1,140	2,265	4,515	9,015	13,515	18,015
Eficiência da largura de banda	77,1%	90%	90%	90%	90%	90%
Símbolos OFDM/ <i>Subframe</i>	7/6 (pequeno/grande CP)					
Tamanho de CP pequeno (µs)	5,2 (primeiro símbolo)/4,69 (seis símbolos restantes)					
Tamanho de CP grande (µs)	16,67					

Fonte: RAYAL, (2010).

Um elemento de recurso, ou *Ressource Element* (RE) é a menor unidade que consiste de uma subportadora OFDM durante um intervalo de símbolo OFDM. Cada bloco de recursos é composto por $12 * 7 = 84$ elementos de recurso para caso de prefixo cíclico normal e de 72 para o caso de prefixo cíclico estendido (RAYAL, 2010).

A Figura 26 ilustra um esquema de bloco de recursos e seus elementos.

Figura 28 - Bloco de recursos para o caso de prefixo cíclico normal



Fonte: RAYAL, (2010).

A estrutura de transmissão de *uplink* é semelhante à de *downlink*. Um bloco de recursos é composto por 12 unidades de recurso com duração de slot de 0,5 ms cada. A largura de banda mínima atribuída a um elemento de recurso é de 180 kHz. No domínio do tempo, um frame de *uplink* de 10 ms é composto por 10 *subframes* e 20 slots. Os prefixos cíclicos para a transmissão *uplink* também são semelhantes aos de *downlink*: 4,69 μ s para o modo normal e 16,67 μ s para o modo estendido, sendo que no modo normal, o primeiro CP tem duração de 5,2 μ s. Um slot é composto por 7 símbolos *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) para o modo normal e 6 para o modo estendido (RAYAL, 2010).

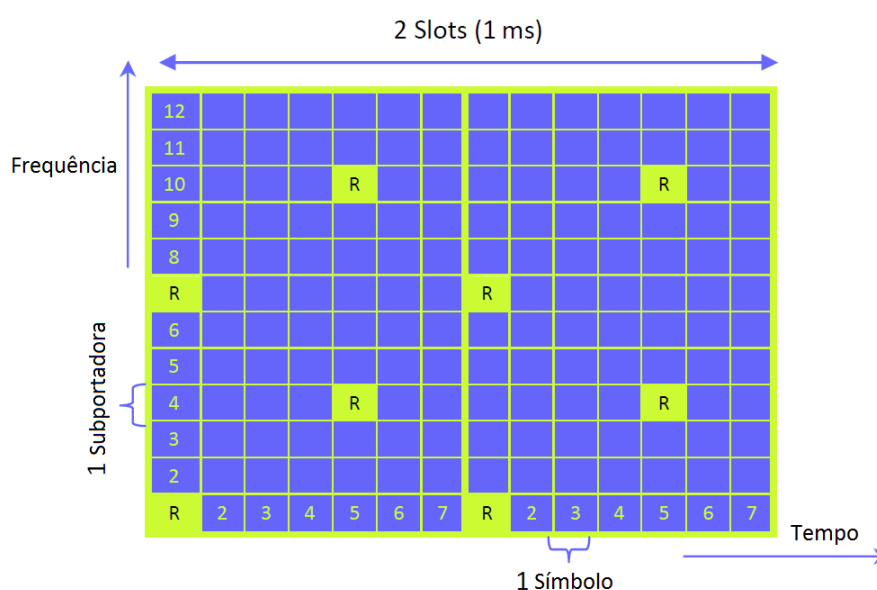
3.4.2 Sinais de referência

3.4.2.1 Sinais de referência de *downlink*

Para que ocorra a demodulação coerente no equipamento de usuário, símbolos de referência (ou símbolos piloto) são inseridos em uma grade OFDM de tempo-frequência para permitir a estimativa de canal. Cada *slot* de um bloco de recursos contém dois símbolos de referência, localizados respectivamente na primeira e na antepenúltima posição de símbolo OFDM no

domínio do tempo. Esta última é correspondente à quinta posição de símbolo OFDM para o caso de prefixo cíclico normal e à quarta posição para o caso de prefixo cíclico estendido. No domínio da frequência, cada *slot* está distanciado do outro com um espaçamento de seis subportadoras. A Figura 27 apresenta um bloco de recursos de um sistema LTE com símbolos de referência para o caso de prefixo cíclico normal (RAYAL, 2010).

Figura 29 - Bloco de recursos com símbolos de referência para o caso de CP normal



Fonte: RAYAL, (2010).

Os símbolos de referência apresentam valores complexos bidimensionais que especificam a identidade de uma célula LTE e são derivados do produto de uma sequência pseudo-aleatória. Existem 510 sequências de sinal de referência correspondentes a 510 identidades de células diferentes (RAYAL, 2010).

3.4.2.2 Sinais de referência de *uplink*

Existem dois tipos de sinais de referência de *uplink* no LTE. O primeiro é o *Demodulation Reference Signals* (DM-RS), que permite a demodulação coerente em uma eNodeB. O segundo tipo sinal de referência é o *Sounding Reference Signal* (SRS), utilizado em canais seletivos em frequência. Os sinais de referência de *uplink* não foram utilizados na simulação deste trabalho e, portanto, fogem do escopo abordado (RAYAL, 2010).

3.4.3 Sequências de sincronização

Um equipamento de usuário que pretenda acessar um sistema LTE segue um procedimento de procura de células, que inclui uma série de fases de sincronização. Dessa forma, o equipamento determina parâmetros de tempo e frequência, necessários para a demodulação de sinais *downlink* e aquisição de parâmetros críticos do sistema (RAYAL, 2010).

Existem dois procedimentos de pesquisa de célula em um sistema LTE: um para a sincronização inicial e outro para detecção de células vizinhas para o procedimento de *handover* (mudança de célula). Em ambos os casos, o equipamento de usuário utiliza dois sinais especiais transmitidos em cada célula: o *Primary Synchronization Sequence* (PSS) e o *Secondary Synchronization Sequence* (SSS). A detecção destes sinais permite que o equipamento de usuário possa completar o tempo e a sincronização em frequência, além de adquirir parâmetros úteis do sistema tais como identidades de células, comprimento de prefixo cíclico e modo de acesso (TDD ou FDD) (RAYAL, 2010).

3.4.4 Canais lógicos, canais físicos e sinais físicos

Os canais lógicos do sistema LTE provêm os serviços e funções requisitados pelas altas camadas, denominadas de *Non Access Stratum* (NAS) para a entrega de aplicações e serviços. Os canais lógicos por sua vez, são mapeados pelos canais de transporte na camada 2, através de elementos de *Radio Resource Control* (RRC). Estes canais são responsáveis pelo controle e gerenciamento do fluxo de dados, tais como retransmissões, controle de erros e priorização. O tráfego gerado pelos usuários é gerenciado na camada 2 pelo protocolo *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP). A interface ar e as conexões da camada física são controladas e gerenciadas pela camada 1, através do *Radio Link Control* (RLC) e *Media Access Control* (MAC) (SANTOS, 2010).

Os canais da interface rádio no LTE podem ser separados em dois tipos, canais físicos e sinais físicos. Os canais físicos correspondem a um conjunto de elementos que carregam informações originadas pelas altas camadas (NAS). Os sinais físicos correspondem a um conjunto de elementos utilizados unicamente pela camada física, que não carregam informações originadas pelas altas camadas (SANTOS, 2010).

3.4.4.1 Canais e sinais físicos

Canais físicos de *downlink*:

- *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH) - Carrega as principais informações de alocação de recursos;
- *Physical Broadcast Channel* (PBCH) - Carrega informações de acesso dos usuários que solicitam acesso a rede;
- *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) - Carrega informações do *Downlink Shared Channel* (DL-SCH);
- *Physical Control Format Indicator Channel* (PCFICH) - Informa ao usuário o número de símbolos OFDM utilizados no PDCCH;
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel* (PHICH) - Respostas de *Acknowledge/Negative Acknowledge* (ACK/NAK) das transmissões de *uplink*;
- *Physical Multicast Channel* (PMCH) - Carrega informações de *multicast*;

Sinais físicos de *downlink*:

- Sinal de referência;
- Sinal de sincronização;

Canais Físicos de *Uplink*:

- *Physical Random Access Channel* (PRACH) - Canal de *uplink* utilizado para funções de acesso randômico;
- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) - Carrega as informações do UL-SCH;
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH) - Respostas de ACK/NAK das transmissões de *downlink*;

Sinais físicos de *uplink*:

- Sinal de Referência de Demodulação – Associado às transmissões de PUSCH ou PUCCH;

3.4.4.2 Canais de transporte

Com o objetivo de se reduzir a complexidade da arquitetura de protocolos do LTE, o número de canais de transporte foi reduzido. Isto se tornou possível através da utilização de canais compartilhados, e não mais dedicados (SANTOS, 2010).

Canais de transporte de *downlink*:

- *Paging Channel* (PCH) - Utilizado para transmitir PCCH;
- *Broadcast Channel* (BCH) - Canal de transporte mapeado pelo BCCH;
- *Downlink Shared Channel* (DL-SCH) - Principal canal para transferência de dados de *downlink* - Responsável pela alocação dinâmica dos recursos, através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão;
- *Multicast Channel* (MCH) - Utilizado na transmissão das informações do *Multicast Control Channel*(MCCH);

Canais de transporte de *uplink*:

- *Random Access Channel* (RACH) - Utilizado para requerimentos do acesso randômico;
- *Uplink Shared Channel* (UL-SCH) - Principal canal para transferência de dados no *uplink* e responsável pela alocação dinâmica dos recursos, através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão;

3.4.4.3 Canais lógicos

Os canais lógicos podem ser classificados em canais lógicos de controle e canais lógicos de tráfego.

Canais lógicos de controle:

- *Paging Control Channel* (PCCH) - Utilizado para informações de *paging*;
- *Broadcast Control Channel* (BCCH) - Fornece informações sistêmicas para todos os terminais conectados na eNodeB;
- *Common Control Channel* (CCCH) - Utilizado para informações de acesso randômico;

- *Dedicated Control Channel* (DCCH) - Carrega informações específicas de controle para cada usuário (controle de potência, *handover*, etc.);
- *Multicast Control Channel* (MCCH) - Transmissão de informações necessárias para a repetição de *multicast*;

Canais lógicos de tráfego:

- *Dedicated Traffic Channel* (DTCH) - Canal Ponto a Ponto (*uplink* e *downlink*) - Utilizado para transmitir dados aos usuários;
- *Multicast Traffic Channel* (MTCH) - Utilizado para transmissão de dados *multicast*;

4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DO SBTVD-T E DO 4G LTE

A seguir, serão abordados o conceito de espectro eletromagnético e suas principais características, bem como as bases que dão terreno a simulação, que visa ser semelhante aos testes laboratoriais realizados pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). Os testes foram feitos na cidade mineira de Santa Rita do Sapucaí e constam em um relatório da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) com data de abril de 2014.

4.1 Espectro de Frequências

Cada sistema de comunicação opera dentro de uma faixa de frequências predefinida, a qual está incluída no espectro de frequências que engloba todas as faixas de irradiação eletromagnética, entre elas as faixas utilizadas em comunicações via rádio, as frequências de infravermelho, a faixa de luz visível, os raios ultravioleta, os raios X e a radiação gama (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

As faixas de frequências em que se concentram os principais serviços de telecomunicações são:

- **VHF** (*very high frequency* ou **frequência muito alta**) – Faixa entre 30 MHz e 300 MHz, na qual estão os serviços de radiodifusão comercial FM e os canais 2 a 13 de TV.
- **UHF** (*ultra high frequency* ou **frequência ultra-alta**) – Faixa entre 300 MHz e 3 GHz, com destaque para os canais de TV transmitidos por UHF e de telefonia celular.
- **SHF** (*super high frequency* ou **frequência superalta**) – Faixa entre 3 GHz e 30 GHz, destinada às transmissões via satélite nas bandas “C” (TV aberta, telefonia e dados) e “Ku” (TV por assinatura), além de frequências para rádio digital.

O Quadro 4 apresenta a parte do espectro de frequências destinado às comunicações via rádio, dividida em faixas.

Quadro 4- Espectro de frequências e alguns dos serviços atribuídos

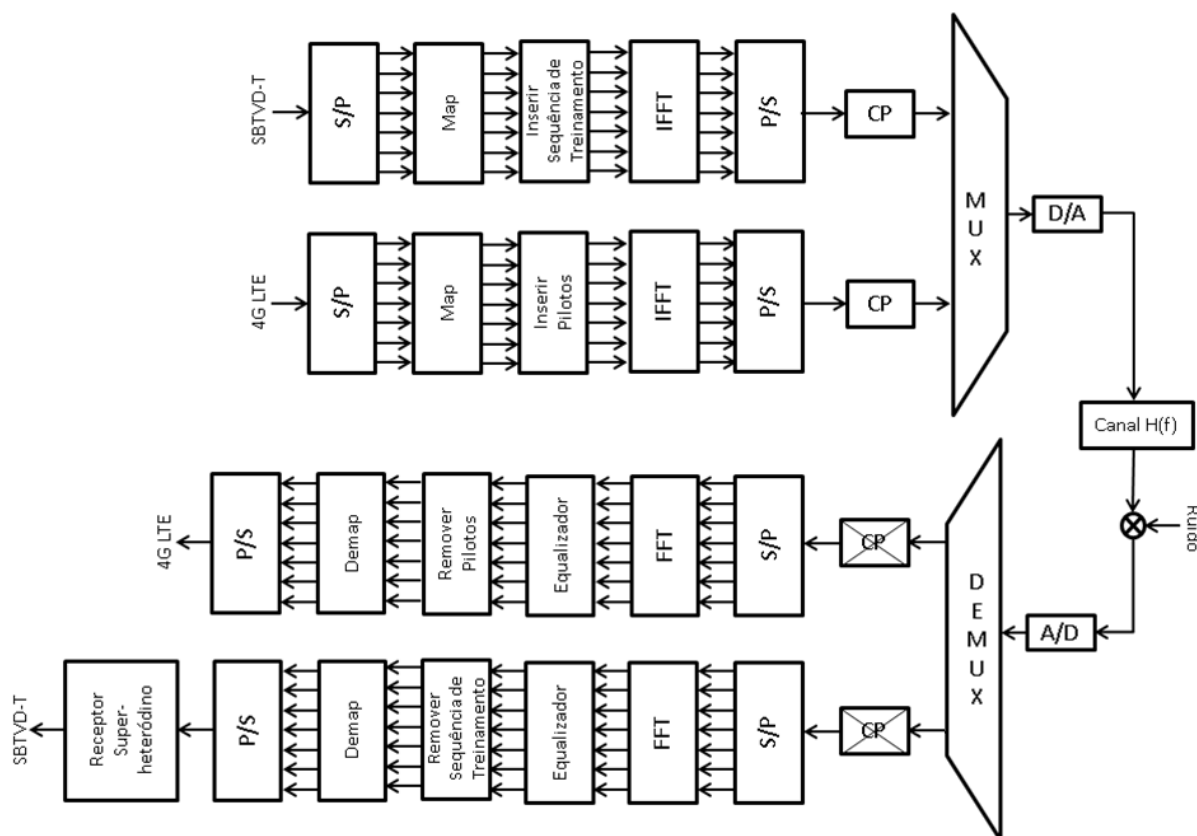
Faixa de	Até	Serviço	Observação	Faixa de	Até	Serviço	Observação
20 Hz	20 000 Hz	Sons audíveis		149,17 MHz	174 MHz	Diversos serviços	
20 kHz	30 kHz	Ultrassom		174 MHz	180 MHz	Televisão VHF	Canal 7
530 kHz	1 600 kHz	Rádio AM	107 emissoras com 10 kHz de banda	180 MHz	186 MHz	Televisão VHF	Canal 8
34,48 MHz	34,82 MHz	Radiotáxi		186 MHz	192 MHz	Televisão VHF	Canal 9
38 MHz	40,6 MHz	Telemedicação biomédica		192 MHz	198 MHz	Televisão VHF	Canal 10
40,6 MHz	40,7 MHz	Telemedicação de características de materiais		198 MHz	204 MHz	Televisão VHF	Canal 11
40,7 MHz	41,0 MHz	Telemedicação biomédica		204 MHz	210 MHz	Televisão VHF	Canal 12
41,0 MHz	49,6 MHz	Diversos serviços		210 MHz	216 MHz	Televisão VHF	Canal 13
49,6 MHz	49,9 MHz	Telefonia sem fio		216 MHz	470 MHz	Diversos Serviços	
49,9 MHz	54 MHz	Diversos serviços		470 MHz	476 MHz	Televisão UHF	Canal 14
54 MHz	60 MHz	Televisão VHF	Canal 2	476 MHz	482 MHz	Televisão UHF	Canal 15
60 MHz	66 MHz	Televisão VHF	Canal 3	482 MHz	806 MHz	Televisão UHF	Canais 16 a 69
66 MHz	70 MHz	Televisão VHF	Canal 4	806 MHz	824 MHz	Diversos serviços	
70 MHz	72 MHz	Radioastronomia		824 MHz	834,4 MHz	Telefonia celular banda "A"	
72 MHz	73 MHz	Telecomando		834,4 MHz	845 MHz	Telefonia celular banda "B"	
73 MHz	75,4 MHz	Radionavegação para aeronáutica		845 MHz	869 MHz	Diversos serviços	
75,4 MHz	76 MHz	Telecomando		869 MHz	880 MHz	Telefonia celular banda "A"	
76 MHz	82 MHz	Televisão VHF	Canal 5	880 MHz	880,6 MHz	Outros serviços	
82 MHz	88 MHz	Televisão VHF	Canal 6	880,6 MHz	890 MHz	Telefonia celular banda "B"	
88 MHz	108 MHz	Radiodifusão rádio FM	99 canais em faixas de 200kHz	890 MHz	891,5 MHz	Telefonia celular banda "A"	
88 MHz	108 MHz	Microfone sem fio de alcance restrito		891,5 MHz	894 MHz	Telefonia celular banda "B"	
108 MHz	117,975 MHz	Radionavegação para aeronáutica		894 MHz	896 MHz	Telefonia celular aeronáutico	
117,975 MHz	121,5 MHz	Comunicação móvel para aeronáutica		896 MHz	3 000 MHz	Outros serviços	
121,5 MHz	121,5 MHz	Comunicação de socorro		3 GHz	3,1 GHz	Radionavegação e radiolocalização	
121,5 MHz	136 MHz	Comunicação móvel para aeronáutica		3,7 GHz	4,2 GHz	Descida de sinal de satélite banda "C"	
136 MHz	138 MHz	Satélites Meteorológicos Internacionais		5,925 GHz	6,425 GHz	Subida de sinal de satélite banda "C"	
138 MHz	143,6 MHz	Comunicações fixas e móveis		6,425 GHz	7,125 GHz	Sistema digital	
143,6 MHz	143,65 MHz	Pesquisas espaciais		10,7 GHz	11,7 GHz	Rádio digital	
143,65 MHz	144 MHz	Radioamador		10,7 GHz	12,2 GHz	Descida de sinal de satélite banda "Ku"	
144 MHz	146 MHz	Radioamador por satélite		13,75 GHz	14,8 GHz	Subida de sinal de satélite banda "Ku"	
146 MHz	148 MHz	Radioamador		14,5 GHz	15,35 GHz	Rádio digital	
148 MHz	149,17 MHz	Reservado ao Serviço Especial de supervisão e Controle (Sesc)					

Fonte: CARVALHO; BADINHAN, (2011).

4.2 Metodologia da simulação

A seguir, serão apresentadas as principais etapas da simulação em linguagem Matlab de um sistema que envolve a transmissão e recepção simultâneas dos sinais SBTVD-T e 4G LTE. Os sinais operam em faixas adjacentes, na vizinhança dos 700 MHz. Como dito anteriormente, algumas das principais especificações dos testes do INATEL foram utilizadas. A Figura 30 apresenta um diagrama de blocos referente aos estágios da simulação.

Figura 30 - Diagrama de blocos do sistema simulado em Matlab



Fonte: Produção do próprio autor.

Como descrito nas seções sobre a técnica OFDM, os sinais SBTVD-T e 4G LTE são parametrizados de forma semelhante. As diferenças básicas estão nas etapas de inserção e remoção de portadoras-piloto para o tratamento do sinal 4G LTE e o receptor super-heteródino (*Can Tuner*) para o tratamento do sinal SBTVD-T. Ao final do processo de transmissão dos sinais, os mesmos são multiplexados e disponibilizados no canal de comunicação, este que sofre influência de multipercurso e de ruído AWGN. Após o canal de comunicação, os sinais são demultiplexados e tratados na recepção individualmente.

Os dados referentes aos canais de TV utilizados na simulação deste trabalho são os mesmos dos testes do INATEL, dadas às devidas adaptações. Eles podem ser obtidos no Quadro 5.

Quadro 5- Canais do SBTVD-T e 4G LTE utilizados nos testes de interferência

Sinal Interferido	Sinal Interferente	Δf Central [MHz]	Δf Borda [MHz]
Frequência Imagem Canal 38 @617,142856 MHz (614 a 620 MHz)	BL1 (5MHz) @705,5 MHz (703-708)	88,35714	83
	BL2 (5MHz) @710,5 MHz (708-713)	93,35714	88
	BL2-3 (10MHz) @713 MHz (708-718)	95,85714	88
	BL2-5 (20MHz) @718 MHz (708-728)	100,85714	88
Canal Adjacente Canal 51 @695,142856 MHz (692 a 698 MHz)	BL1 (5MHz) @705,5 MHz (703-708)	10,35714	5
	BL2 (5MHz) @710,5 MHz (708-713)	15,35714	10
	BL2-3 (10MHz) @713 MHz (708-718)	17,85714	10
	BL2-5 (20MHz) @718 MHz (708-728)	22,85714	10
Frequência Imagem Canal 48 @677,142856 MHz (674 a 680 MHz)	BL1 (5MHz) @760,5 MHz (758-763)	83,35714	78
	BL2 (5MHz) @765,5 MHz (763-768)	88,35714	83
	BL2-3 (10MHz) @768 MHz (763-773)	90,85714	83
	BL2-5 (20MHz) @768 MHz (763-783)	95,85714	83
Canal Adjacente Canal 51 @695,142856 MHz (692 a 698 MHz)	BL1 (5MHz) @760,5 MHz (758-763)	65,35714	60
	BL2 (5MHz) @765,5 MHz (763-768)	70,35714	65
	BL2-3 (10MHz) @768 MHz (763-773)	72,85714	65
	BL2-5 (20MHz) @768 MHz (763-783)	77,85714	65

Fonte: ANATEL, (2014).

Canais de TV interferidos utilizados:

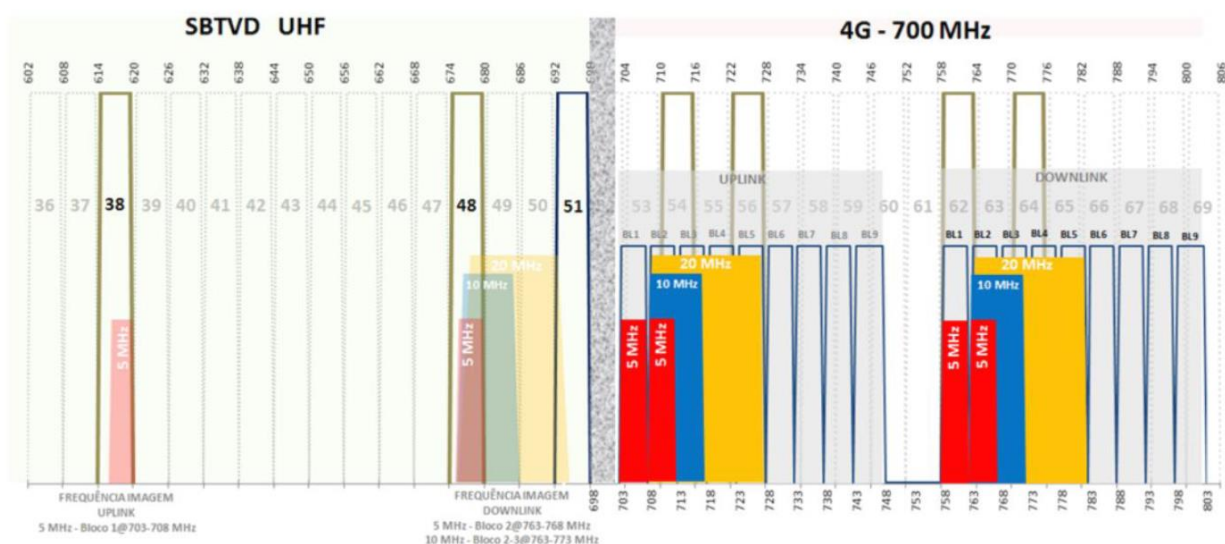
- Canal 38, centrado em 617,142856 MHz (frequência imagem). Ocupa uma largura de banda de 614 a 620 MHz;
- Canal 48, centrado em 677,142856 MHz (frequência imagem). Ocupa uma largura de banda de 674 a 680 MHz;
- Canal 51, centrado em 695,142856 MHz (canal adjacente). Ocupa uma largura de banda de 692 a 698 MHz.

Quanto aos canais interferentes foram utilizados apenas os de 4G LTE referentes à banda de 20 MHz, tanto para *uplink* quanto *downlink*, que são:

- BL2-5 (*uplink*), centrado em 718 MHz. Ocupa uma largura de banda de 708 a 728 MHz;
- BL2-5 (*downlink*), centrado em 768 MHz. Ocupa uma largura de banda de 763 a 783 MHz.

A Figura 31 mostra o arranjo de frequências adotado pelo INATEL para a realização dos testes de interferência.

Figura 31- Arranjo de canais utilizados para os testes de canal adjacente e canal imagem



Fonte: ANATEL, (2014).

4.3 Resultados da simulação

A seguir, serão descritos brevemente os dois tipos de filtros passa-faixa (característicos de receptores de radiodifusão) utilizados na simulação, bem como suas respectivas avaliações de desempenho, o que engloba diagramas de constelação, curvas de taxa de erro de bit em função da relação sinal-ruído (BER vs. SNR) e curvas de medição de magnitude do vetor de erro função da relação sinal-ruído (EVM vs. SNR). Cada filtro apresenta um valor diferente de ordem, parâmetro que define seu formato ou distribuição em frequência. Também serão mostrados sinais e espectros do SBTVD-T e do 4G LTE em banda base e passante, nas etapas de transmissão e recepção, além dos mesmos multiplexados.

4.3.1 Filtro Gaussiano

O filtro com distribuição gaussiana, comumente utilizado em processamento digital de imagens, apresenta a seguinte expressão característica:

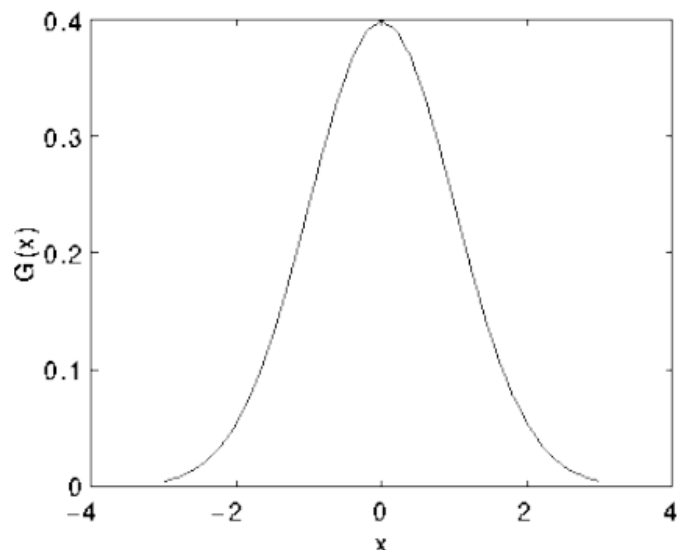
$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\mu-x)^2}{2\sigma^2}}$$

Onde:

- x : conjunto com n valores, tal que $-\infty < x < \infty$;
- G : distribuição gaussiana dos valores de X ;
- σ : desvio padrão dos valores de X , tal que $\sigma > 0$;
- μ : média dos valores de X .

O filtro passa-faixa com distribuição gaussiana está representado graficamente na Figura32.

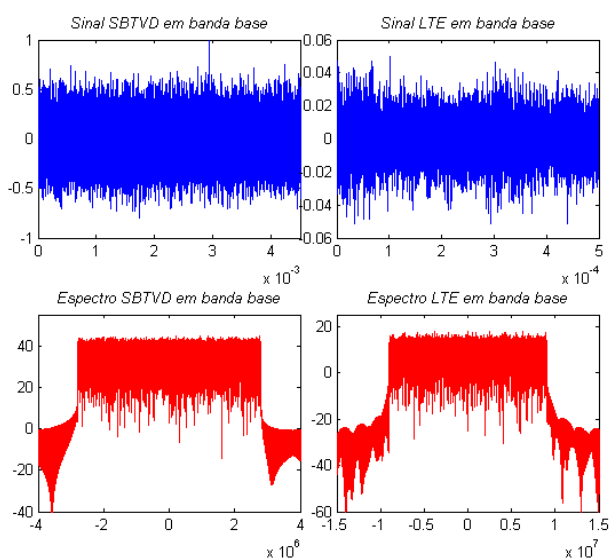
Figura 32 - Curva de distribuição gaussiana



Fonte: CONCI, (2016).

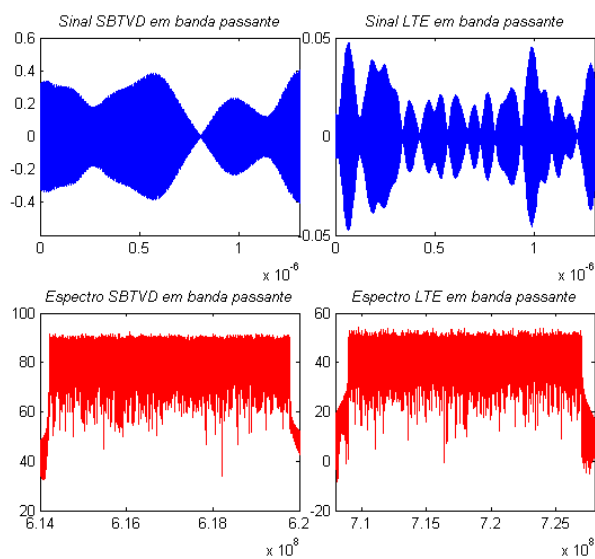
Os gráficos 3 e 4 apresentam respectivamente, os sinais e espectros dos sinais SBTVD-T e 4G LTE, em banda base e passante, para a situação de uso de filtros gaussianos.

Gráfico 3 - Sinais e espectros do SBTVD e 4G LTE em banda base (filtro gaussiano)



Fonte: Produção do próprio autor.

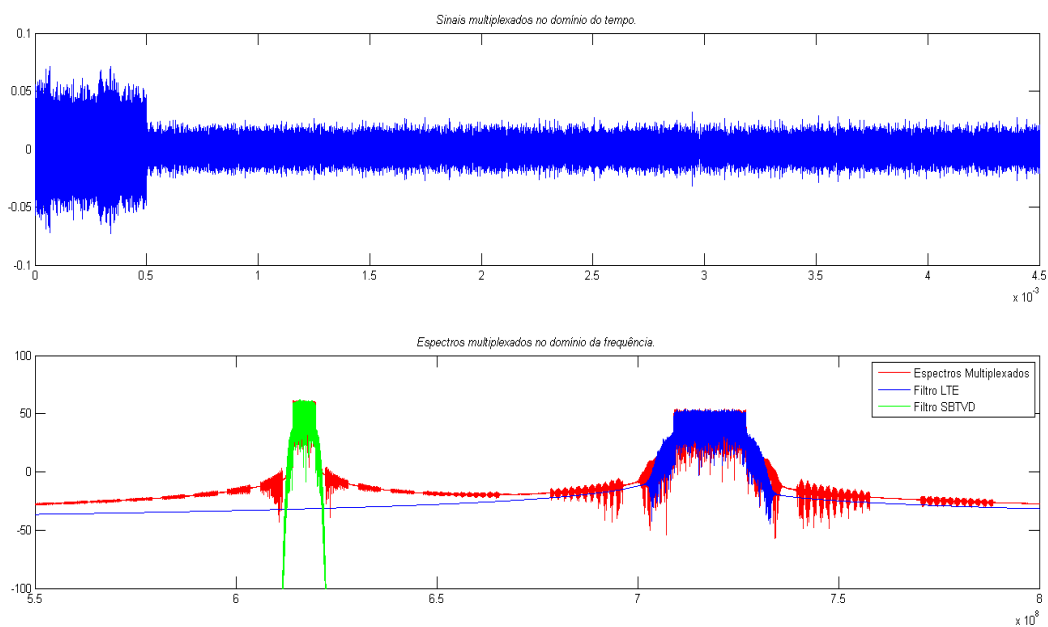
Gráfico 4 - Sinais e espectros do SBTVD e 4G LTE em banda passante (filtro gaussiano)



Fonte: Produção do próprio autor.

O Gráfico 5 exibe os sinais SBTVD-T e 4G LTE e seus respectivos espectros com filtros gaussianos.

Gráfico 5 - Sinais e espectros do SBTVD-T e 4G LTE multiplexados (filtro gaussiano)



Fonte: Produção do próprio autor.

Parte do espectro 4G LTE não foi comportado pelo filtro, devido ao baixo valor de ordem do filtro. Em decorrência disso, o diagrama de constelação do sinal 4G LTE apresentou uma assimetria, como será visto na próxima seção.

Um filtro gaussiano, assim como um ideal, não é fisicamente realizável, pois não pode ser expresso a partir de um número finito de elementos. Entretanto, sua função de transferência pode ser aproximada pela fórmula de Taylor, por exemplo. Um filtro gaussiano pode ser representado por um filtro digital FIR de uma dada ordem (OLIVEIRA, 2012).

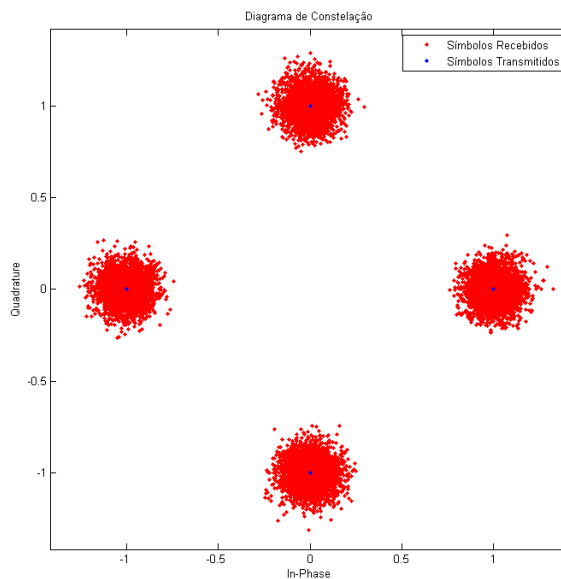
4.3.1.1 Diagramas de constelação

Conforme mostrado no capítulo que explicita a técnica OFDM, a informação a ser processada pelo sistema é dividida em subseqüências, configurando dessa forma, um sistema multiportadora. Assim, cada subseqüência é modulada digitalmente ou mapeada. A modulação digital, chamada de mapeamento, consiste na substituição dos parâmetros amplitude, frequência e ângulo de uma onda portadora senoidal por uma função discreta do fluxo de bits de informação (ROCHOL, 2012).

Tanto o mapeamento, que ocorre na etapa de transmissão do sistema, quanto o demapeamento (demodulação digital), que ocorre na etapa de recepção, são representados graficamente pelo chamado diagrama de constelação. Esse diagrama consiste de um plano complexo, onde cada bit de informação é associado a um quadrante, de acordo com a função discreta relacionada a um dos parâmetros de uma onda portadora citados anteriormente. Alguns dos tipos de mapeamentos mais comuns: *Phase Shift Keying* (PSK), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) e *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). O mapeamento/demapeamento QPSK foi utilizado nos dois sinais do sistema, em cada um dos respectivos processos de transmissão e recepção.

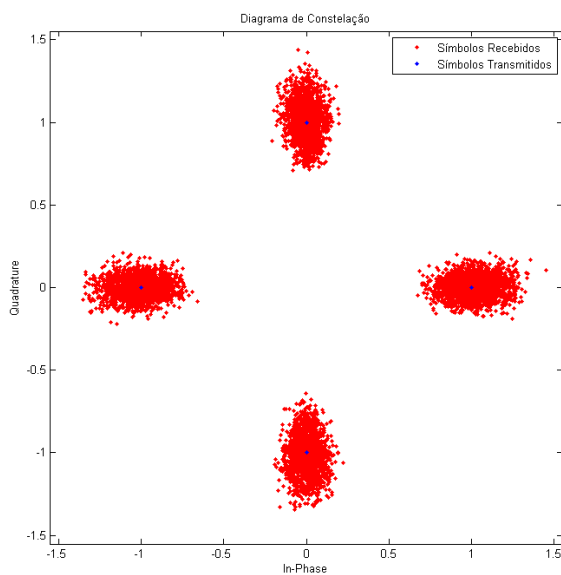
Os Gráficos 6 e 7 apresentam respectivamente, os diagramas de constelação QPSK dos sinais SBTVD-T e 4G LTE, para a situação de uso de filtro gaussiano.

Gráfico 6 - Diagrama de constelação do sinal SBTVD-T (com filtro gaussiano)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7 - Diagrama de constelação do sinal 4G LTE (com filtro gaussiano)



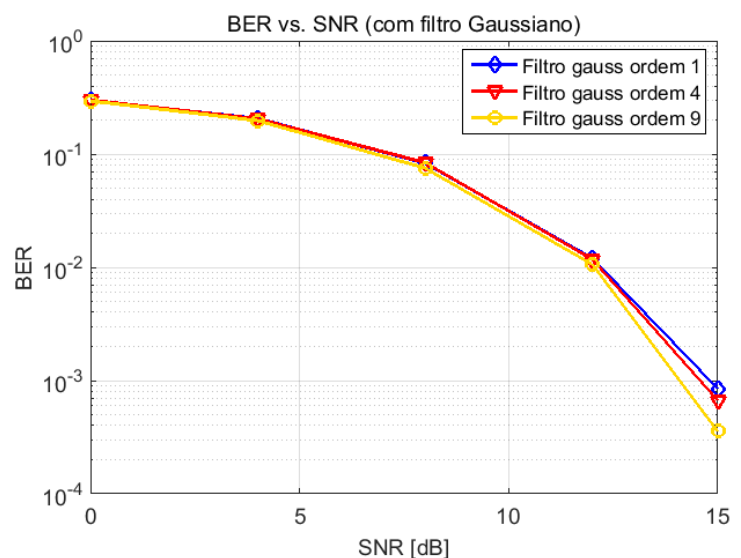
Fonte: Produção do próprio autor.

4.3.1.2 Taxa de erro de bit versus relação sinal-ruído (BER vs. SNR)

As análises de desempenho BER vs. SNR e posteriormente, EVM vs. SNR serão verificadas apenas sob o ponto de vista do sinal SBTVD-T, pois uma das premissas deste trabalho é verificar nesse sinal as possíveis interferências do sinal 4G LTE. Ou seja, para esse último, as análises não são convenientes. O Gráfico 8 apresenta a variação da taxa de erro de bit (do inglês, *Bit Error Ratio*) conforme o aumento da relação de sinal-ruído do sinal SBTVD-T.

O Gráfico 8 apresenta a variação da taxa de erro de bit conforme o aumento da relação de sinal-ruído do sinal SBTVD-T, para diferentes valores de ordem.

Gráfico 8 - Curva BER vs. SNR do sinal SBTVD-T (com filtro gaussiano)



Fonte: Produção do próprio autor.

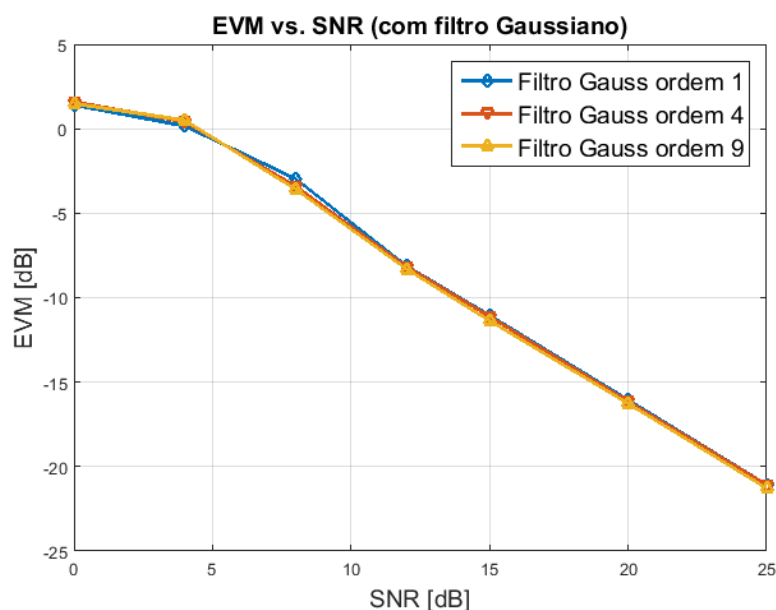
Resultados mais expressivos podem ser observados com o aumento de bits na transmissão, porém, não foi possível representar de forma plena os sinais SBTVD-T e 4G LTE em valores práticos de parametrização. O número de frames dos sinais foi reduzido para que a simulação não fosse muito dispendiosa ao ser processada.

4.3.1.3 Medição da magnitude do vetor de erro versus relação sinal-ruído (EVM vs. SNR)

A avaliação de desempenho pelo critério da magnitude do vetor de erro, *Error Vector Magnitude* (EVM), consiste no cálculo da relação percentual entre o vetor erro de constelação e um vetor de referência. Tornando como referência os símbolos transmitidos das constelações, qualquer distorção incidente sobre os sinais modulados equivale a um desvio dos pontos da constelação resultante na recepção ao redor do seu lugar geométrico ideal. O conceito da magnitude do vetor de erro auxilia a estimação do erro de simetria entre os símbolos transmitidos e recebidos (ARAÚJO, 2013).

O Gráfico 9 apresenta a medição da magnitude do vetor de erro conforme o aumento da relação de sinal-ruído do sinal SBTVD-T, para diferentes valores de ordem.

Gráfico 9 - Curva EVM vs. SNR do sinal SBTVD-T (com filtro gaussiano)



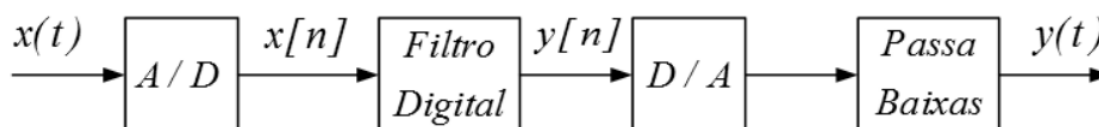
Fonte: Produção do próprio autor.

As curvas de medição de EVM vs. SNR para os três valores diferentes de ordem de filtro, apresentaram comportamentos praticamente idênticos, o que comprova as sutis mudanças no desempenho do sistema simulado.

4.3.2 Filtro Digital FIR

Um filtro digital é a implementação de um algoritmo matemático em hardware ou software. O processo de filtragem digital pode ser representado de forma esquematizada pelo diagrama da Figura 33.

Figura 33 - Processo de filtragem digital



Fonte: CAMPESTRINI; LAGES, (2013).

O bloco conversor A/D converte o sinal de tempo contínuo $x(t)$ em uma sequência $x[n]$. O filtro digital processa a sequência $x[n]$, resultando em outra sequência $y[n]$, que representa o sinal filtrado na forma digital. Este sinal $y[n]$ é então convertido para um sinal de tempo contínuo por um conversor D/A e reconstruído através de um filtro passa-baixa, cuja saída é o sinal $y(t)$, que representará a versão filtrada do sinal $x(t)$ (CAMPESTRINI; LAGES, 2013).

Quando comparados aos filtros analógicos, os digitais apresentam as vantagens de não ter uma resposta influenciada por fatores externos como temperatura e umidade, ter a resposta mais facilmente modificada, portabilidade e economia, além da aplicação em sinais de baixa frequência. Como desvantagens, apresentam resposta com velocidade inferior devido às etapas de conversão A/D e D/A, erros de quantização e aproximação devido ao uso de palavras digitais de comprimento finito e instabilidade de filtros recursivos de alta ordem (SIMAS, 2012).

Um filtro digital é caracterizado em duas classes, dependendo da duração da sequência $y[n]$ quando em sua entrada é aplicado um sinal do tipo impulso. São classificados como:

- *Finite Impulsive Response* (FIR), ou resposta ao impulso com resposta finita;
- *Infinite Impulsive Response* (IIR), ou resposta ao impulso com duração infinita.

Este trabalho se limitará apenas a uma breve explicação do filtro digital FIR, que foi utilizado na análise de desempenho do sistema proposto.

Embora os filtros IIR necessitem de menor ordem para aplicações, o que acarreta em um menor tempo de execução, são os filtros FIR que se mostram mais convenientes para o sistema em questão, pois apresentam as seguintes características:

- Resposta de fase linear, não permitindo que o sinal filtrado sofra distorções de fase. Essa característica é importante em diversas aplicações como processamento de áudio e imagem, biomedicina e transmissão de dados (SIMAS, 2012);
- Os filtros FIR são mais estáveis e os efeitos de precisão finita e erros de quantização são menos significativos.

Os filtros FIR apresentam a seguinte função de transferência discreta:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M a_k z^{(M-k)}}{z^M}$$

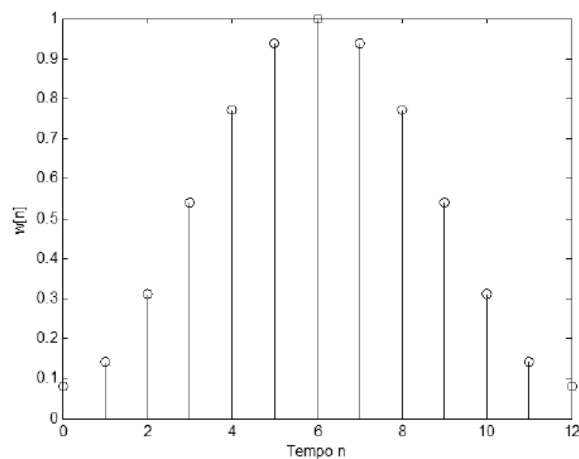
Como um filtro FIR apresenta resposta em frequência com fase linear, seu projeto se resume apenas na aproximação da resposta em módulo desejada. Uma vez definida a ordem M do filtro, seus coeficientes a_k , $k = 0, 1, \dots, M$, são definidos (CAMPESTRINI; LAGES, 2013).

Uma janela comumente utilizada em um filtro FIR é a janela de Hamming, que é definida por:

$$w[n] = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right), & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A Figura 34 mostra uma característica da janela de Hamming.

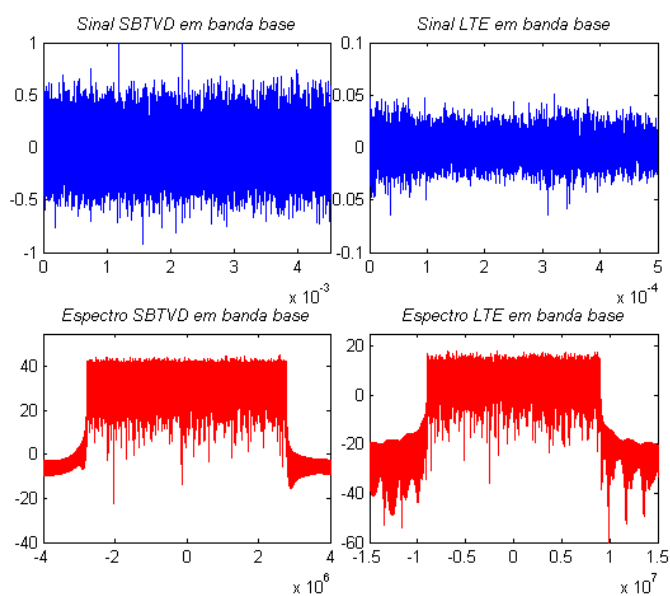
Figura 34 - Janela de Hamming para $M = 12$



Fonte: CAMPESTRINI; LAGES, (2013).

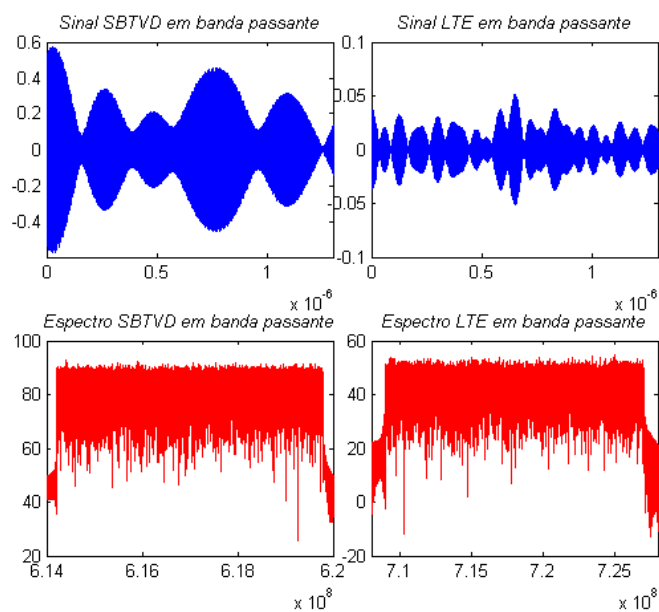
Os gráficos 10 e 11 apresentam respectivamente, os sinais e espectros dos sinais SBTVD-T e 4G LTE, em banda base e passante, para a situação de uso de filtros digitais FIR.

Gráfico 10 - Sinais e espectros do SBTVD e 4G LTE em banda base (filtro FIR)



Fonte: Produção do próprio autor.

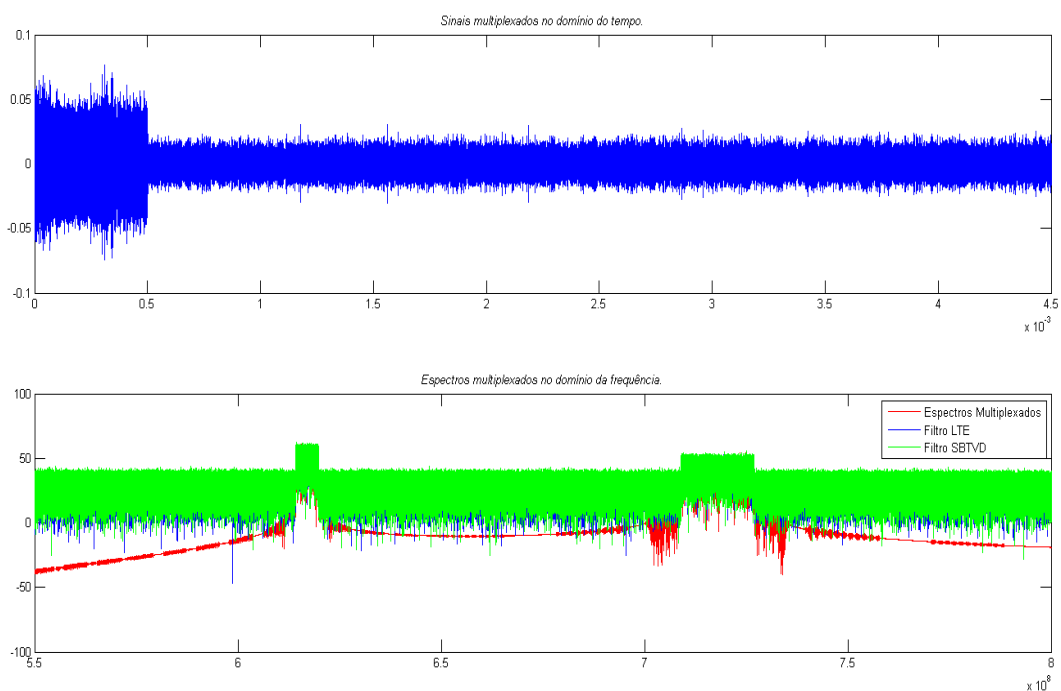
Gráfico 11 - Sinais e espectros do SBTVD e 4G LTE em banda passante (filtro FIR)



Fonte: Produção do próprio autor.

O Gráfico 12 exibe os sinais SBTVD-T e 4G LTE e seus respectivos espectros com filtros digitais FIR.

Gráfico 12 - Sinais e espectros do SBTVD-T e 4G LTE multiplexados (filtro FIR)

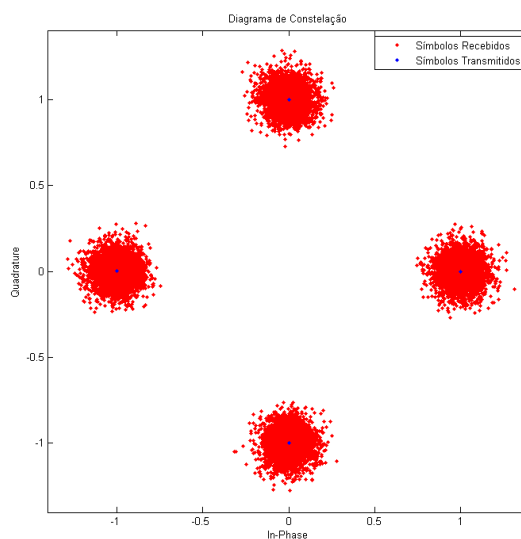


Fonte: Produção do próprio autor.

4.3.2.1 Diagramas de constelação

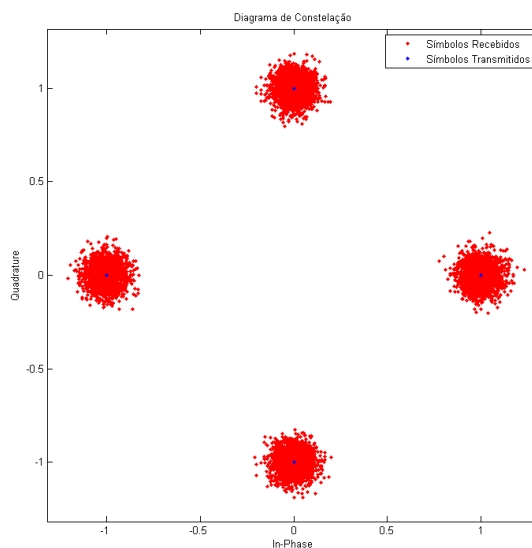
Os Gráficos 13 e 14 apresentam respectivamente, os diagramas de constelação QPSK dos sinais SBTVD-T e 4G LTE, para a situação de uso de filtro digital FIR.

Gráfico 13 - Diagrama de constelação do sinal SBTVD-T (com filtro FIR)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 14 - Diagrama de constelação do sinal 4G LTE (com filtro FIR)

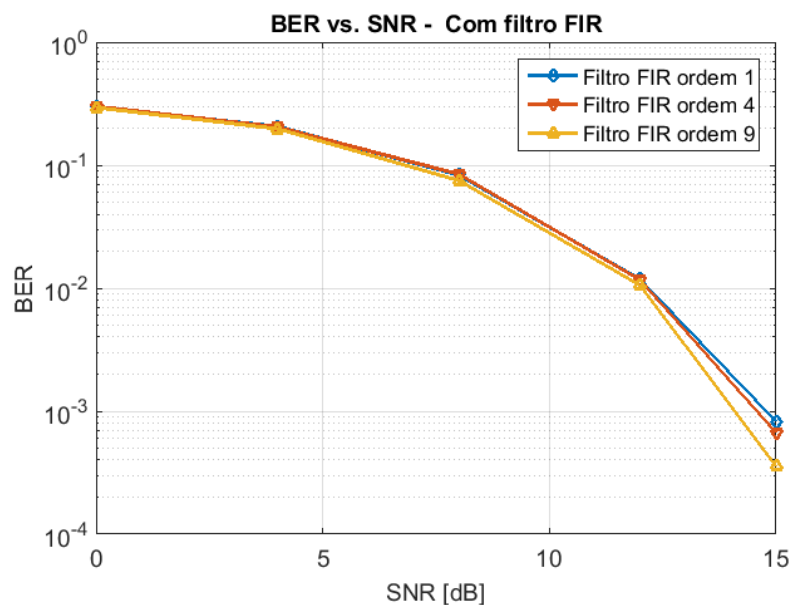


Fonte: Produção do próprio autor.

4.3.2.2 Taxa de erro de bit versus relação sinal-ruído (BER vs. SNR)

O Gráfico 15 apresenta a variação da taxa de erro de bit conforme o aumento da relação de sinal-ruído do sinal SBTVD-T, para diferentes valores de ordem.

Gráfico 15 - Curva BER vs. SNR do sinal SBTVD-T (caso de filtro FIR)



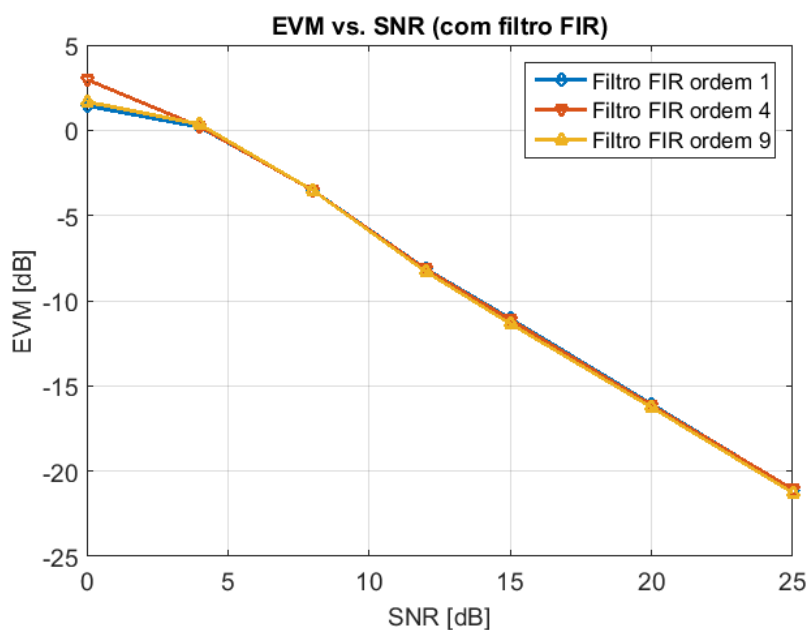
Fonte: Produção do próprio autor.

Como na prática o filtro gaussiano pode ser representado por um filtro FIR, é de se esperar que as aplicações dos dois tipos de filtro sejam muito semelhantes.

4.3.2.3 Medição da magnitude do vetor de erro versus relação sinal-ruído (EVM vs. SNR)

O Gráfico 23 apresenta a medição da magnitude do vetor de erro conforme o aumento da relação de sinal-ruído do sinal SBTVD-T, para diferentes valores de ordem.

Gráfico 16 - Curva EVM vs. SNR do sinal SBTVD-T (caso de filtro FIR)



Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho procurou abordar uma série de assuntos e conceitos da área de Telecomunicações que evoluem constantemente, dadas as demandas por serviços interativos ainda mais rápidos e com qualidade.

As emissoras de TV aberta estão empenhadas no cumprimento do desligamento gradativo do sinal analógico, ao passo de que devem estar sempre cientes da mudança de comportamento ou perfil do telespectador e do aprimoramento de tecnologias. Já as empresas de telefonia devem se atentar às medidas de mitigação, bem como a capacitação de profissionais.

A simulação em Matlab apresentou todas as parametrizações que caracterizam os sinais do SBTVD-T e 4G LTE, de modo a se aproximar o quanto possível, em menor escala, de um sistema real. Porém é sabido que testes de laboratório e de campo com equipamentos específicos são de suma importância e devem ser considerados como alternativas agregadoras posteriormente. A análise do efeito da largura do filtro nas bordas dos espectros também é algo que pode ser parte integrante de trabalhos futuros.

Ambos os sinais quando multiplexados e disponibilizados no canal de comunicação, apresentaram uma relativa coexistência sem interferências aparentes nas vizinhanças dos 700 MHz, e mesmo com uma variedade de filtros de ordens diversas, não foram constatadas diferenças ou melhorias em desempenho muito significativas entre os testes. Convém citar novamente como fator limitante da simulação, o baixo número de frames utilizados nas parametrizações dos sinais, que implicou em uma avaliação com diferenças de desempenho pouco significativas.

6 BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, M. A. F. R. **Introdução ao LTE - Long Term Evolution**. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina_2.asp>. Acesso em: 1 out. 2015.

ANATEL. **Relatório de teste laboratorial de interferência do LTE na faixa de 700 MHz no ISDB-T**. Disponível em: <http://sistemas.anatel.gov.br/sacp/Parametros/ArquivosAnexos/02052014_095328_Relat%C3%B3rio_Teste_Laboratorial_Final_1.pdf>. Acesso em: 1 out. 2015.

ARAUJO, C. E. R **Análise e simulação do sistema de comunicação WiMAX (802.16-2004) em diferentes configurações e condições de operação, com o uso do aplicativo MATLAB - SIMULINK**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Sistemas Eletrônicos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CAMPESTRINI, L.; LAGES, W. F. **Filtros Digitais**. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~eng04006/aulas/aula24.pdf>>. Acesso em 11 mar. 2016.

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

CARVALHO, A.G; BADINHAN, L.F. C. **Eletrônica: Telecomunicações**. São Paulo, SP: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Eletrônica, v. 5).

CONCI, A. Filtragem de Imagens. Disponível em: <<http://computacaografica.ic.uff.br/transparenciasvol2cap5.pdf>>. Acesso em 15 mar. 2016

CRAUS, P. **Análise de desempenho do sistema brasileiro de TV digital**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

DTV. **Desligamento analógico**. Disponível em: <<http://www.dtv.org.br/index.php/desligamento-analogico>>. Acesso em: 1 out. 2015.

DUTRA, R. B. **Avaliação do Desempenho da Modulação OFDM em Canais HF para Rádios Cognitivos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

FRENZEL JR., L. E. **Fundamentos de Comunicação Eletrônica: Modulação, Demodulação e Recepção**. 3. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013.

IZARIO, B. R. F.; AKAMINE, C. Determinação da potência interferente versus a distância da estação LTE na TV Digital. **Revista de Radiodifusão**, v. 1, p. 70-79, 2015.

LINHARES, A. **Grupo de Implantação do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV – GIRED**. Disponível em: <http://convergecom.com.br/arquivos/telebr2015/ST9_GIRED_ANATEL.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2015.

OLIVEIRA, H. M. **Engenharia de Telecomunicações**. 1 e. Recife, PE: HM, 2012

PAES, A. **Padrões de Middleware para TV Digital: TV Digital**. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdpadrao/pagina_2.asp>. Acesso em: 1 out. 2015

RAYAL, F. LTE in a Nutshell: The Physical Layer. Telesystem Innovations, p. 1-18, 2010.

ROCHOL, J. **Comunicação de dados**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2012.

SANTOS, D. **Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SET. **Testes da SET revelam interferências do 4G na TV Digital**. Disponível em: <http://www.set.org.br/artigos/ed140/140_revistadaset_22.pdf>. Acesso em: 1 out. 2015.

SILVA, J. A. L. **Análise de Desempenho de um Sistema COFDM para Comunicação Via Rede Elétrica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Concentração em Automação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

SILVA, M. L. D. **Análise de Desempenho de Sistemas Multiportadora Utilizando Modulação M-QAM Não Quadradas em Canais com Ceifamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Nacional de Telecomunicações. Santa Rita do Sapucaí. 2004.

SIMAS, E. **Filtros Digitais**. Disponível em: <http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/PDS_aula03.pdf>. Acesso em 11 mar. 2016.

TELECO. **Licitação de frequências de 700 MHz para 4G da Anatel**. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/700_licitacao.asp>. Acesso em: 1 out. 2015.

YAMADA, F. et al. Esquema de Modulação do Sistema Brasileiro de TV digital. **Revista da SET – Edição Especial**, v. 1, n. 3, p. 50-53, 2010.

YAMADA, F. et al. Testes de avaliação comparativa dos sistemas de TV digital Terrestres. **Revista de Radiodifusão**, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2006.