

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores

Distribuição de Sinais Rádio e Vídeo sobre Fibra

Andreia Sofia Reis Mouta

(Licenciada)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Electrónica
e Telecomunicações

Orientador:

Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Miguel Duarte Ascenso

Vogais:

Prof. Doutor Fernando Manuel Valente Ramos (FCUL)

Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Dezembro de 2012

Agradecimentos

Queria agradecer ao Professor Pedro Pinho por me ter orientado, pela disponibilidade, pela ajuda e pela confiança depositada em mim para a realização desta dissertação.

Ao Abdelgader Abdalla do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro pela ajuda dada através dos vários e-mails trocados, que foi fundamental para o resolver alguns problemas que foram surgindo ao longo da dissertação.

Ao Ricardo Almeida pelo apoio e ajuda que me deu para ultrapassar mais uma etapa da vida.

Aos meus pais, Carlos Mouta e Ana Mouta, pela paciência, pelo apoio incondicional que sempre demonstraram e por tudo o que fizeram para que eu atingisse mais etapa da vida.

Resumo

As comunicações ópticas e as comunicações sem fios têm sofrido uma grande evolução ao longo das últimas décadas. Com o objectivo de juntar as vantagens de cada um dos sistemas surgiu o que se designa por rádio sobre fibra. Este sistema permite centralizar todo o processamento necessário num só local, na estação central, simplificando assim a estação base. Esta simplificação permite reduzir os custos de implementação e torna o sistema menos complexo.

Esta dissertação de mestrado tem como objectivo principal estudar e simular um sistema que permite o envio de sinais vídeo e rádio pela fibra óptica para posterior difusão, utilizando o conceito de rádio sobre fibra. Os sinais enviados foram o LTE (*Long Term Evolution*), o UWB (*Ultra WideBand*) e o WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). O primeiro disponibiliza o serviço de voz, o segundo disponibiliza o serviço de televisão e o último dá suporte à internet. Estes sinais foram modulados em OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), porque, posteriormente, estes sinais vão ser difundidos num ambiente sem fios e este tipo de modulação minimiza o efeito de multipercurso e da interferência intersimbólica. Com este estudo pretende-se verificar qual a viabilidade de um sistema que permite o envio de três sinais distintos simultaneamente (serviço *Triple Play*).

Ao analisar os resultados deste sistema concluiu-se que a sua aplicabilidade pode apresentar algumas limitações, dependendo do tipo de modulação e do tipo de modulador que se utilize. Os moduladores ópticos utilizados foram o MZ (*Mach-Zehnder*) e o EA (*Electro-Absorption*). A qualidade do sinal recebido foi analisada com base no valor de EVM (*Error Vector Magnitude*). O primeiro modulador foi aquele que apresentou mais limitações, pois o desempenho do sistema é comprometido para distâncias superiores a 40 km e para potências de entrada inferiores a 0 dBm. Este tipo de sistema apresenta um EVM mais baixo quando a potência de entrada utilizada está entre 0 e 6 dBm. Se o modulador utilizado for o EA, o sistema apresenta um EVM mais baixo quando se utiliza um índice de modulação entre 20% e 30%, para uma potência de entrada entre 0 e 2 dBm.

Palavras-chave: RoF, *Triple Play*, EVM.

Abstract

The optical and wireless communications have suffered a big evolution in last decades. With the objective of join the advantages of this system emerged the concept of radio over fiber. This system allows centralize all the processing in one place, in central station, simplifying the base station. This simplification allows cost reduces in her implementation and makes the system less complex.

This MSc dissertation has as objective the study and simulation of a system that allows the transmission of video and radio signals by optical fiber, using the concept radio over fiber. The transmitted signals were the LTE (*Long Term Evolution*), the UWB (*Ultra WideBand*) and the WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). The first one offers the voice service, the second one offers the television service and the last give supports for the internet service. These signals were modulated in OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) because the signals will be propagates in a wireless environment after. This type of modulation minimizes the multipath effect and the intersymbolic interference This study pretends to verify what is the viability of a system that allows the transmission of three distinct signals simultaneous (Triple Play service).

Analyzing the results of this system it was concluded that his applicability can present some limitation, depending of the type of modulation and the type of modulator that is used. The optic modulators utilized were the MZ (*Mach-Zehnder*) and the EA (*Electro-Absorption*). The quality of the received signal was analyzed based on the value of EVM (*Error Vector Magnitude*). The first modulator presented more limitations because the system performance is compromised for distances greater than 40 km and for input power less than 0 dBm. This system presents a lower EVM when the input power stays between 0 and 6 dBm.. If the modulator is an EA the system presents an EVM lower when the modulation index takes values between 20% and 30% for an input power between 0 and 2 dBm.

Keywords: RoF, Triple Play EVM.

Índice

Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	3
1.2 Objectivos da dissertação	4
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
Capítulo 2 <i>Radio over Fiber</i>	7
2.1 <i>Radio over Fiber</i>	7
2.2 Vantagens do sistema RoF	10
2.3 Desvantagens do sistema RoF.....	11
2.4 Aplicações do sistema RoF	11
2.4.1 Estado de arte	12
2.5 Figuras de mérito para avaliação do Sistema RoF	15
2.5.1 Constelação	15
2.5.2 Vector de erro.....	16
Capítulo 3 Fibra Óptica, Geração e Multiplexagem de sinais ópticos.....	19
3.1 Fibra óptica.....	19
3.1.1 Efeitos não lineares da fibra óptica	21
3.1.1.1 SPM.....	21
3.1.1.2 CPM	21
3.1.1.3 FWM	22
3.1.1.4 SRS.....	22
3.1.1.5 SBS.....	22
3.2 Geração de sinais ópticos e multiplexagem	23
3.2.1 Modulação em intensidade.....	23
3.2.1.1 Modulação Directa	23

3.2.1.2 Modulação Externa	24
3.2.2 WDM.....	25
3.2.3 SCM	26
3.3 Índice de modulação.....	27
Capítulo 4 Distribuição de sinais rádio e vídeo em sistemas RoF	29
4.1 Sistema RoF para o envio de um sinal	29
4.1.1 Estudo do efeito do índice de modulação.....	30
4.1.2 Modulação directa vs Modulação externa.....	33
4.1.3 Estudo do efeito da utilização de diferentes modulações.....	37
4.1.4 Estudo do efeito de sinais com características diferentes (com diferentes moduladores).....	45
4.2 Sistema RoF para <i>Triple-Play</i>	55
Capítulo 5 Conclusão e Trabalho Futuro	63
5.1 Conclusão	63
5.2 Trabalho Futuro.....	65
Referências	67
Anexo A OFDM e descrição dos sinais de rádio e vídeo.....	71
A.1 OFDM	71
A.2 Comunicações móveis.....	72
A.2.1 GSM (2G).....	73
A.2.2 UMTS (3G)	73
A.2.3 HSPA.....	74
A.2.4 LTE (4G)	75
A.3 Sinais de Vídeo.....	75
A.3.1 TV Analógica vs TV Digital	75
A.3.1.1 DVB-T.....	77
A.3.1.2 DVB-C.....	78

A.3.1.3 DVB-S	78
A.4 WPAN (<i>Wireless Personal Area Networks</i>) e WMAN (<i>Wireless Metropolitan Area Networks</i>)	78
A.4.1 WiMedia MB-OFDM signals (ECMA-368)	79
A.4.2 WiMAX.....	79

Índice de Figuras

Figura 1: Evolução do número de utilizadores na área de telecomunicações [4]	3
Figura 2: Representação do sistema RoF [5]	8
Figura 3: Sinal a ser transmitido através da Fibra óptica (a) em RF; (b) em IF; (c) em BB [5]	9
Figura 4: Exemplo de distribuição de multiserviço utilizando o sistema RoF [14]	12
Figura 5: Sistema RoF	14
Figura 6: Diagrama de constelação da modulação de 16-QAM	15
Figura 7: a) Desvio de amplitude b) desvio de fase [25]	16
Figura 8: Distorção da constelação [25]	17
Figura 9: Fibra óptica [29]	19
Figura 10: Modos como os raios de luz viajam dentro da fibra [9]	20
Figura 11: Dispersão estimulada de Raman [33]	22
Figura 12: Criação da onda de <i>Stokes</i> na SBS [34]	23
Figura 13 - Modulação directa [35]	24
Figura 14 - Modulação externa [35]	24
Figura 15 - Sistema WDM [36]	26
Figura 16 - Sistema SCM [11]	27
Figura 17: Curva de transferência do laser	28
Figura 18: Sistema RoF utilizado, com modulador AM	30
Figura 19: Espectro do sinal enviado	31
Figura 20: Sinal UWB, no domínio do tempo	32
Figura 21: Sinal óptico a ser enviado, com índice de modulação igual a 0.5%	32
Figura 22: Sinal óptico a ser enviado, com índice de modulação igual a 30%	33
Figura 23: Sinal óptico a ser enviado, com índice de modulação igual a 70%	33
Figura 24: Espectro do sinal para a modulação 16 QAM	34
Figura 25: Sistema utilizado para modulação directa	34
Figura 26: Sistema utilizado para modulação externa	35
Figura 27: Evolução do EVM em função do índice de modulação (modulação directa vs modulação externa)	35
Figura 28: Evolução do EVM em função da distância (modulação directa vs modulação externa)	36

Figura 29: Evolução do EVM em função da potência de entrada (modulação directa vs modulação externa)	37
Figura 30: Sistema para envio de sinais OFDM	37
Figura 31: Espectro do sinal para a modulação QPSK e OFDM com QPSK	38
Figura 32: Espectro do sinal para a modulação 64 QAM e OFDM com 64 QAM.....	38
Figura 33: EVM em função do índice de modulação, para QPSK e OFDM com QPSK	39
Figura 34: EVM em função do índice de modulação, para 16 QAM e OFDM com 16 QAM	39
Figura 35: EVM em função do índice de modulação, para 64 QAM e OFDM com 64 QAM	40
Figura 36: EVM em função do índice de modulação, para QPSK, 16 QAM e 64 QAM	40
Figura 37: EVM em função do índice de modulação, para OFDM com QPSK, 16 QAM e 64 QAM.....	41
Figura 38: EVM em função da potência de entrada, para QPSK e OFDM com QPSK	41
Figura 39: EVM em função da potência de entrada, para 16 QAM e OFDM com 16 QAM ..	42
Figura 40: EVM em função da potência de entrada, para 64 QAM e OFDM com 64 QAM ..	42
Figura 41: EVM em função da distância, para QPSK e OFDM com QPSK	43
Figura 42: EVM em função da distância, para 16 QAM e OFDM com 16 QAM.....	43
Figura 43: EVM em função da distância, para 64 QAM e OFDM com 64 QAM.....	44
Figura 44: Constelação do sinal OFDM com modulação 64 QAM recebido, para uma distância igual a 30 km.....	44
Figura 45: Constelação do sinal OFDM com modulação 64 QAM recebido, para uma distância igual a 100 km.....	45
Figura 46: EVM em função do índice de modulação para o sistema RoF inicial.....	46
Figura 47: EVM em função do índice de modulação, para LTE e UWB	47
Figura 48: Constelação do sinal UWB para índice de modulação igual 20%.....	48
Figura 49: Constelação do sinal LTE para índice de modulação igual 20%.....	48
Figura 50: Constelação do sinal UWB para índice de modulação igual 60%.....	49
Figura 51: Constelação do sinal LTE para índice de modulação igual 70%.....	49
Figura 52: EVM em função da Pin, para LTE e UWB	50
Figura 53: EVM em função da distância, para LTE e UWB	51
Figura 54: Sistema RoF utilizado, com modulador EA	51
Figura 55: EVM em função do índice de modulação, com modulador EA.....	52
Figura 56: EVM em função da Potência de Entrada, com modulador EA	52
Figura 57: EVM em função da Distância, com modulador EA	53

Figura 58: Sistema RoF, com modulador MZ.....	53
Figura 59: EVM em função da potência de entrada, com modulador MZM.....	54
Figura 60: EVM em função da distância, com modulador MZM.....	55
Figura 61: Sistema RoF para Triple-Play, com modulador EA.....	56
Figura 62: Espectro do Triple Play.....	57
Figura 63: EVM em função do índice de modulação, em Triple Play com modulador EA....	57
Figura 64: EVM em função da Potência de Entrada, em Triple Play com modulador EA.....	58
Figura 65: EVM em função da distância, em Triple Play com modulador EA.....	58
Figura 66: Sistema RoF para Triple-Play, com modulador MZ.....	59
Figura 67: EVM em função da Potência de Entrada, em Triple Play com modulador MZ.....	59
Figura 68: EVM em função da distância, em Triple Play com modulador MZ.....	60
Figura 69 - Esquema de transmissão ponto a ponto utilizando OFDM [38].....	72
Figura 70 - Escalonamento em LTE.....	72
Figura 71: TV analógica vs TV digital [51].....	77
Figura 72: Distribuição de bandas no espectro do UWB [28].....	79

Índice de Tabelas

Tabela 1: Limites de EVM [26] [27] [28]	17
Tabela 2: Parametrização dos componentes do sistema RoF.....	30
Tabela 3: Tabela resumo do WiMAX [40]	80

Lista de Acrónimos

Acrónimo	Designação
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
AMC	<i>Adaptative Modulation and Coding</i>
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
BB	Banda Base
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BS	<i>Base Station</i>
CS	<i>Central Station</i>
DAB	<i>Digital Audio Broadcasting</i>
DBWS	<i>Distributed Broadband Wireless System</i>
DCM	<i>Dual-Carrier Modulation</i>
DFB	<i>Distributed Feedback</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting — Terrestrial</i>
EA	<i>Electro-Absorption</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FEC	<i>Foward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	<i>Fabry-Perot</i>
FTTB	<i>Fiber to the Building</i>
FTTC	<i>Fiber to the Curb</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
FTTN	<i>Fiber to the Node</i>
FTTx	<i>Fiber to the x</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>

HARQ	<i>Hybrid Automatic Retransmission Query</i>
HDTV	<i>High-definition Television</i>
HSPA+	<i>Evolved High Speed Packet Access</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
IF	<i>Intermediate Frequency</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting –Terrestrial</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MMF	<i>Multimode Fiber</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
MZ-EOM	<i>Mach-Zehnder Electro-Optical Modulator</i>
MZ	<i>Mach-Zehnder</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
NTSC	<i>National Television System(s) Committee</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PAL	<i>Phase Alternation Line</i>
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RoF	<i>Radio over Fiber</i>
SBTVD-T	<i>Sistema Brasileiro de Televisão Digital –Terrestre</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiplex</i>
SCM	<i>Sub-Carrier Multiplexing</i>
SECAM	<i>Séquentiel couleur à mémoire</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>

UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
UWB	<i>Ultra WideBand</i>
VCSELs	<i>Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Networks</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Networks</i>

Capítulo 1

Introdução

As pessoas sempre tiveram necessidade de comunicar, mesmo estando distantes, por diversas razões. Um dos primeiros sistemas de comunicação a longa distância utilizado foi o fumo, podendo este ser considerado um sistema primitivo sem fios.

Ao longo dos últimos anos a evolução tecnológica, na área das telecomunicações, tem sido crescente devido ao tipo de serviços disponibilizados e às condições oferecidas para que estes funcionem.

A exigência em termos de aumento de largura de banda e de débito binário tem vindo a aumentar devido ao tipo de serviços disponibilizados, tornando-se necessário encontrar soluções de baixo custo. Existe também a necessidade de combinar a mobilidade com a largura de banda e os débitos binários elevados, porque os utilizadores estão interessados em aceder a qualquer tipo de informação em qualquer altura e em qualquer lugar. É importante encontrar soluções que conciliem as comunicações sem fios com as comunicações ópticas, porque disponibilizam os requisitos referidos, ou seja, com a comunicação sem fios consegue-se obter mobilidade e com as comunicações ópticas conseguem-se obter débitos binários elevados e largura de banda elevada.

As comunicações sem fios, conhecidas pelo anglicismo *Wireless*, consistem na propagação de ondas electromagnéticas em espaço livre. Este tipo de comunicações possui um factor bastante apelativo do ponto de vista do utilizador, a mobilidade. Devido a este factor o utilizador pode comunicar ou aceder à *Internet* sem necessitar de uma ligação física. Este tipo de comunicação também permite a partilha de recursos, ou seja, um canal que é atribuído a um utilizador pode mais tarde ser atribuído a outro utilizador.

A evolução das comunicações sem fios tem sido notória, nomeadamente, na área das redes móveis, com o 2G, suportado pelo GSM (*Global System for Mobile Communications*), posteriormente com o 3G, suportado pelo UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), e actualmente com o 4G, suportado pelo LTE (*Long Term Evolution*). Isto para além de outros *standards* intermédios como o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), o HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) e o HSPA+ (*Evolved High Speed Packet Access*). Com esta evolução denota-se um aumento do débito binário oferecido, sendo de 9.6 kbps no 2G e de 100 Mbps no 4G, um aumento do número de serviços oferecidos e da qualidade de

serviço oferecida. Paralelamente, também existe uma evolução nas redes *Wireless LAN* (IEEE 802.11), nomeadamente em relação ao aumento do débito binário oferecido. A banda de frequências utilizada neste tipo de redes é a de 2.4 GHz e a de 5 GHz, que inicialmente permitiam débitos de 11Mbps e de 54 Mbps, respectivamente. Actualmente com o sistema MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) conseguem permitir débitos superiores a 100 Mbps, dependendo do número de antenas que utilizam [1].

As comunicações sem fios também permitem a difusão de televisão digital, utilizando como por exemplo o DVB-T (*Digital Video Broadcasting — Terrestrial*).

Por sua vez, as comunicações ópticas consistem na transmissão de informação utilizando feixes de luz. Este tipo de comunicações é muito apelativo devido à elevada largura de banda que está disponível, os elevados débitos binários e à baixa atenuação que se consegue ter. Com o aparecimento de novas técnicas de multiplexagem para sistemas ópticos tais como WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e SCM (*Sub-Carrier Multiplexing*), consegue-se obter débitos binários na ordem dos 10 Tbps [2]. Este tipo de comunicações tem sido uma aposta nas redes de acesso local com as redes FTTx (*Fiber to the x*).

O nome FTTx é uma forma genérica de referenciar algumas arquitecturas que utilizam a fibra óptica. Essas arquitecturas são:

- FTTN (*Fiber to the Node*);
- FTTC (*Fiber to the Curb*);
- FTTB (*Fiber to the Building*);
- FTTH (*Fiber to the Home*).

Na FTTN a fibra óptica termina nos armários de rua, destes armários até aos utilizadores é utilizado cabo coaxial ou par de cobre. Este tipo de arquitectura destina-se a zonas de pouca densidade populacional e com menos de 1500 m de raio [3].

A FTTC é muito semelhante à arquitectura anterior, com a diferença de que a área servida por esta arquitectura tem um raio de 300 m e permite débitos binários mais altos. O armário de rua, onde termina a fibra óptica, já se encontra mais próximo dos edifícios [3].

Na FTTB a fibra óptica chega até à entrada do edifício, deste ponto até a casa do utilizador final é utilizado cabo coaxial ou par de cobre [3].

Na FTTH a fibra óptica chega até a casa do utilizador final, sendo possível fornecer serviços que exigem maior largura de banda [3].

1.1 Motivação

Como se pode observar na Figura 1, existe um crescimento do número de utilizadores de telefones móveis e de banda larga móvel, a nível mundial. A curva correspondente ao número de utilizadores de dispositivos móveis é a que apresenta maior crescimento. Torna-se importante estudar novas opções que permitam suportar mais utilizadores e simultaneamente débitos binários mais elevados. Na Figura 1, pode-se também observar o aumento de utilização dos serviços disponibilizados para dispositivos móveis. Esta exigência requer o uso de portadoras de RF (*Radio Frequency*) com valores elevados, o que resulta numa diminuição do raio da célula por causa do aumento das perdas de propagação e das restrições de linha de vista. Ao diminuir o raio da célula é necessário colocar mais estações base para garantir a cobertura de uma certa área, o que implica custos acrescidos devido à forma como as estações base são constituídas. O sistema RoF (*Radio over Fiber*) é uma solução que permite minimizar os custos e ao mesmo tempo capaz de suportar serviços que necessitem de portadoras RF elevadas. O RoF concilia as vantagens das comunicações ópticas com as vantagens das comunicações sem fios. Este tipo de sistema permite simplificar as estações base, porque o sinal enviado já está em RF e não é necessário que haja nova conversão de frequências. A parte complexa, ou seja, o processamento necessário está todo num só local, na CS (*Central Station*).

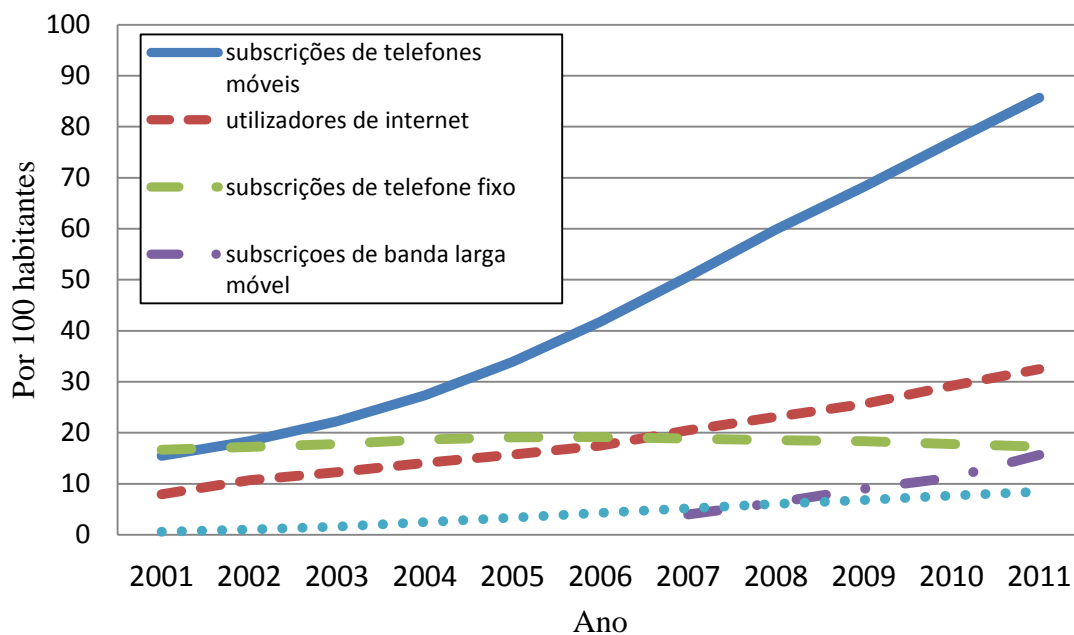


Figura 1: Evolução do número de utilizadores na área de telecomunicações [4]

1.2 Objectivos da dissertação

Com a realização desta dissertação de Mestrado pretende-se estudar a transmissão de sinais de rádio e vídeo, que não estão em Banda Base, sobre a fibra óptica, utilizando o sistema RoF. Os sinais que irão ser enviados são o LTE, o UWB e o WiMAX. O primeiro disponibilizará o serviço de voz, o segundo disponibilizará o serviço de televisão e o último dará suporte à internet. Estes sinais serão modulados em OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) para facilitar a sua posterior difusão num ambiente sem fios. Com este estudo pretende-se verificar qual a viabilidade de um sistema que permite o envio de três sinais distintos simultaneamente (serviço *Triple Play*)

Este estudo é efectuado somente para a ligação em descendente, assim nas simulações efectuadas só se utilizará o comprimento de onda de 1500nm.

O objectivo principal das simulações será analisar a qualidade dos sinais recebidos, quando são alteradas as condições da ligação, nomeadamente a distância, a potência de entrada e o índice de modulação.

1.3 Estrutura da dissertação

Este documento está dividido em 5 capítulos e contém um anexo focados no tema RoF e na transmissão de sinais de rádio e de vídeo.

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução sobre evolução das comunicações ópticas e das comunicações sem fios. É também apresentada uma motivação que indica qual a importância do estudo do sistema RoF. E por último são apresentados os objectivos da dissertação.

O segundo capítulo contém a descrição do sistema RoF, indicando as suas vantagens e desvantagens, onde pode ser aplicado e o seu estado de arte. Pode ainda ler-se uma descrição das figuras de mérito utilizadas para avaliar a qualidade do sistema RoF.

No terceiro capítulo apresenta-se uma descrição sintética sobre a fibra óptica, indicando as suas características e os seus efeitos não lineares. Apresenta-se também uma descrição dos tipos de multiplexagem e de modulação dos sinais ópticos utilizados neste tipo de sistemas.

No quarto capítulo são apresentados os esquemas simulados, no VPIsystems®, os resultados obtidos e a análise efectuada aos mesmos.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões retiradas da elaboração desta dissertação e alguns tópicos para trabalho futuro.

O Anexo A contém uma descrição do OFDM e uma descrição das características principais das diferentes gerações de redes móveis. Contém ainda uma descrição do WiMAX e do UWB.

Capítulo 2

Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma descrição do sistema RoF, indicando as suas vantagens e desvantagens, aplicações e o seu estado de arte. Por último apresenta-se uma descrição das figuras de mérito que irão ser utilizadas para analisar a qualidade do sinal recebido num sistema RoF.

2.1 *Radio over Fiber*

Um sistema RoF combina as vantagens da comunicação por fibra óptica com as vantagens da comunicação sem fios, explorando assim os benefícios de cada uma. Pode-se considerar que estas tecnologias se vão complementar, ou seja, numa transmissão por fibra óptica a atenuação é baixa e está disponível uma elevada largura de banda, o que não se verifica numa transmissão sem fios, no entanto esta última permite a mobilidade do utilizador [2].

Nos sistemas actuais de comunicação sem fios, as funções de processamento de sinais RF como a conversão de frequências, a modulação e a multiplexagem são realizadas nas BSs e posteriormente os sinais são difundidos pela antena [5].

O sistema RoF permite que os sinais de rádio sejam enviados pela fibra óptica, desde da CS até uma ou várias BSs, também denominadas por RAU (*Remote Antenna Unit*). Para melhor compreensão irá utilizar-se, ao longo desta dissertação, o nome de BS porque é um termo mais comum nas comunicações já existentes. Na Figura 2 é apresentado um sistema RoF e os seus principais elementos [6].

O sinal rádio pode ser enviado pela fibra óptica por três métodos distintos:

- Em BB (Banda Base) - O sinal eléctrico é modulado opticamente em BB e enviado para a BS através da fibra óptica. Na BS o sinal em BB é convertido para uma portadora RF para que o sinal possa ser enviado para a antena e posteriormente radiado [7];
- Em IF (*Intermediate Frequency*) - O sinal eléctrico é modulado numa portadora IF e depois é modulado opticamente para ser enviado para a BS. Na BS é necessário que haja uma conversão de IF para RF [7];

- Em RF - O sinal eléctrico é modulado para uma portadora RF e depois é modulado opticamente para ser enviado para a BS. Este processo ocorre na CS, não sendo necessário que haja nova conversão de frequências na BS [7].

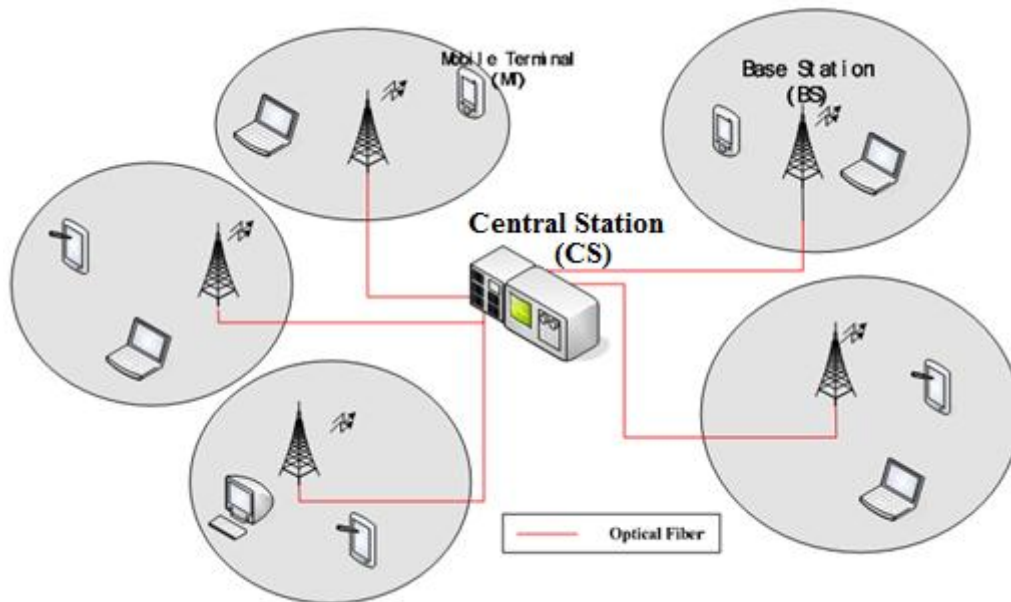


Figura 2: Representação do sistema RoF [5]

Ao analisar a Figura 3a) pode observar-se que o sinal é transmitido em RF, logo só é necessário que haja conversão de frequências na CS, assim sendo os componentes de alta frequência estão apenas situados na CS [7]. Num sistema RoF são utilizadas mais BSs do que CS, para poder valorizar a utilização deste sistema é necessário que as BSs sejam menos complexas possíveis, para não encarecer o sistema. Neste tipo de sistema a BS só necessitam de um conversor óptico-eléctrico, de um amplificador de sinal e de uma antena. Na Figura 3b) e na Figura 3c), as BSs são mais complexas que na arquitectura anterior, pois é necessário que haja conversão de IF para RF e de BB para RF, respectivamente. Esta conversão de frequências nas BSs vai encarecer o sistema RoF. No entanto, nestas duas últimas arquitecturas, a ligação óptica é simplificada porque não são necessários componentes de alta frequência [7].

Na Figura 3 pode observar-se diversos componentes, tais como o laser dídodo, o modulador óptico e o fotodídodo, sendo representados pelas siglas LD, EOM e PD, respectivamente.

Com o aumento do número de utilizadores de dispositivos móveis, os operadores da rede estão constantemente a alterar o tamanho das células, i.e., de macro-células para micro-células ou até mesmo para pico-células. Desta forma podem aumentar a capacidade de transmissão do seu sistema, isto acontece principalmente em zonas urbanas. Ao diminuir o tamanho das células, serão precisas mais BSs para cobrir áreas equivalentes ou maiores, aumentando assim os custos de instalação e de manutenção [2]. Ao utilizar o sistema RoF é possível reduzir o tamanho das células para micro e pico-células, aumentando assim a reutilização de frequências e melhorando a eficiência espectral [8].

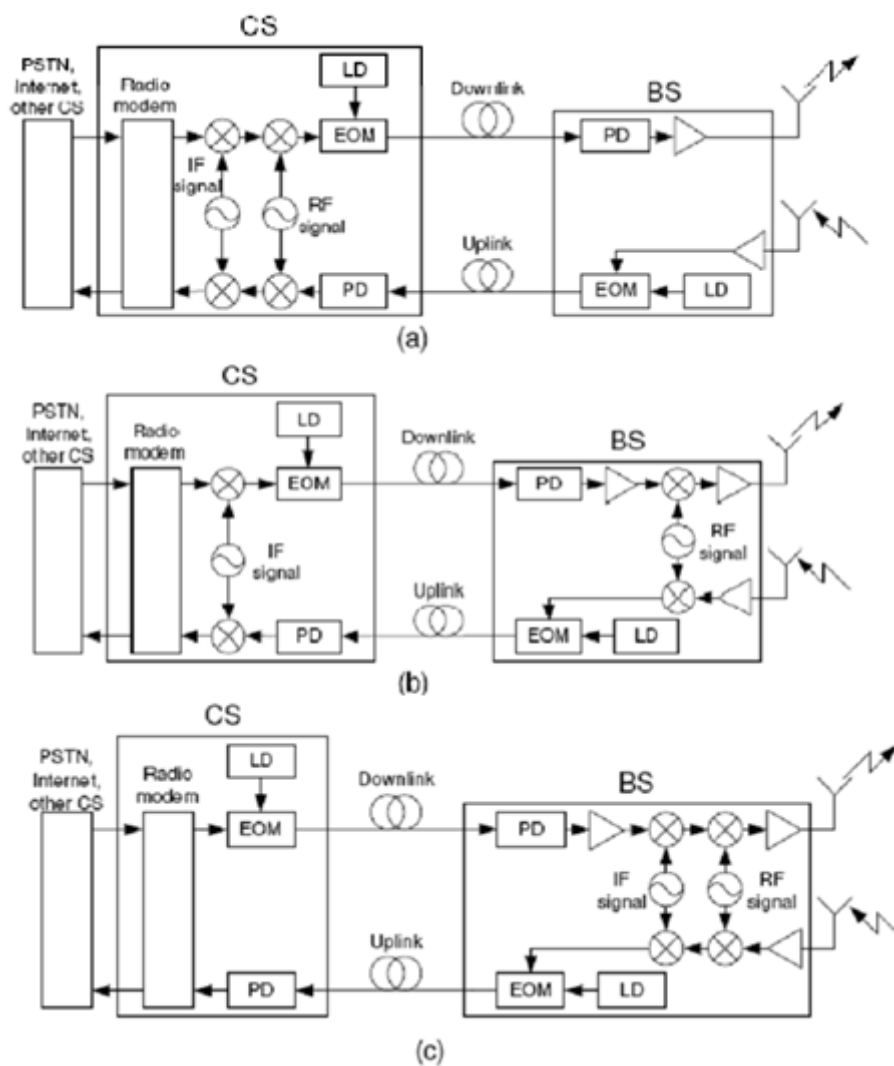


Figura 3: Sinal a ser transmitido através da Fibra óptica (a) em RF; (b) em IF; (c) em BB [5]

2.2 Vantagens do sistema RoF

Um sistema RoF apresenta inúmeras vantagens relacionadas com a utilização de fibra óptica, com a possibilidade de centralizar a parte do processamento num único local, i.e., na CS, e com a utilização da comunicação sem fios. Os tópicos seguintes enumeram as vantagens deste sistema.

- **Baixa Atenuação** - existem diversas formas de se enviar os sinais eléctricos nomeadamente através de feixes Hertzianos ou através de linhas de transmissão, i.e., do cabo coaxial. Ao utilizar-se a transmissão por feixes Hertzianos depara-se com os problemas das perdas por reflexão e por absorção que aumentam com a frequência, isto porque o meio de propagação é o espaço livre [5]. Quando se utiliza o cabo coaxial como meio de transmissão a atenuação aumenta conforme o aumento da frequência. Ao utilizar a fibra óptica como meio de transmissão entre a CS e a BS consegue-se obter atenuações muito mais baixas. Na 2ª janela de transmissão, i.e., 1310nm, verifica-se uma atenuação de 0.5 dB/km e na 3ª janela de transmissão, i.e., 1550nm, a atenuação é mais reduzida, apresentando um valor de 0.2 dB/km [5] [9]. A fibra óptica ao apresentar estes valores de atenuação permite que o sinal seja transmitido a longas distâncias antes de ser necessário um regenerador¹ ou um amplificador [10];
- **Largura banda elevada** - ao considerar a segunda e a terceira janela de transmissão, visto serem as mais utilizadas actualmente, por apresentarem atenuações mais baixas e por possibilitarem uma largura de banda elevada. Esta está limitada pelos componentes ópticos. A largura de banda elevada permite débitos elevados para grandes distâncias. Os débitos são superiores aos necessários para a maioria das aplicações do utilizador [10];
- **Fácil instalação e consumo de potência reduzido** - ao colocar o sinal em RF, a BS fica mais simples, facilitando e reduzindo o custo de instalação das mesmas, visto que o processamento fica concentrado num ponto central da rede, ou seja, na CS. Com isto pode-se instalar mais BS melhorando as condições dos serviços disponibilizados aos utilizadores. As BSs, ao serem construídas com menos equipamentos, consomem menos potência [5];

¹ Regenerador – converte o sinal de luz num sinal eléctrico e retransmite o sinal novamente, em forma de luz, com uma nova cópia da informação [2].

- Alterar os parâmetros da rede dinamicamente - ao centralizar todo o processamento na CS possibilita a alteração dos parâmetros definidos para o tráfego de modo a aumentar ou diminuir o número de canais conforme o necessário [11];
- Imunidade às Interferências Electromagnéticas – é um aspecto muito importante que se verifica nas comunicações ópticas, porque o sinal é transmitido em forma de luz [12];
- Mobilidade – como o sistema RoF possui uma vertente de comunicação sem fios, isto permite que o utilizador se movimente e continue a ter acesso aos seus serviços [11];

2.3 Desvantagens do sistema RoF

O RoF é um sistema, fundamentalmente, de transmissão analógico, sendo assim, factores como o ruído e a distorção são aspectos a ter em conta, embora a informação a ser transmitida possa ser digital [11].

Os responsáveis pela introdução de ruído numa ligação por fibra óptica são o fotodíodo e o amplificador. A fibra óptica por sua vez introduz dispersão, que consiste no alargamento dos impulsos e que vai ter como consequência a interferência intersimbólica, influenciando a distância da ligação [12] [13]. Numa ligação por fibras ópticas existe também os efeitos não lineares que geram sinais indesejados, interferindo assim com os sinais transmitidos [13].

Este tipo de sistema aloja todo o processamento num só local. Isto pode tornar o processamento mais lento se não existir o equipamento adequado.

2.4 Aplicações do sistema RoF

O sistema RoF pode ser adoptado em diversas áreas que envolvam sistemas celulares e que possam tirar partido das vantagens da fibra óptica, como por exemplo a elevada largura de banda.

Este sistema pode ser utilizado em redes móveis, podendo ser uma solução para melhorar a cobertura em zonas de sombra e em ambiente interiores. Isto é possível porque, como já foi referido anteriormente, com este sistema é possível colocar mais BSs a um custo mais baixo e com uma área de célula menor. Este sistema permite a partilha de recursos e a centralização do processamento, assim sendo numa única fibra podem ser transmitidas as diferentes gerações de redes móveis.

Este tipo de sistema é transparente ao tipo de modulação do sinal, ou seja, permite o envio de sinais com modulações sem restrições. Esta transparência permite a transmissão de diferentes serviços ao mesmo tempo, assim sendo o RoF pode ser utilizado para fazer a distribuição de multiserviços, tais como televisão em alta definição, internet, voz, vídeo vigilância, entre outros [2]. Na Figura 4 é apresentado um esquema de distribuição de multiserviços que utiliza o sistema RoF. Nesse esquema pode-se observar um *Central Office*, onde é feito o processamento e de onde vai sair o sinal para as diferentes *Remote Area Units*. Neste caso este equipamento está distribuído por diversas divisões da casa e a fornecer diferentes serviços.

Outra área em que o RoF pode ser adoptado é nas *Wireless LANs*. Uma área de grande adesão por parte dos utilizadores e onde estes esperam débitos elevados e qualidade de serviço. Actualmente as *Wireless LANs* operam na banda dos 2.4 GHz mas no futuro e com o objectivo de melhorar os débitos utilizar-se-á a banda dos 5 GHz [13].

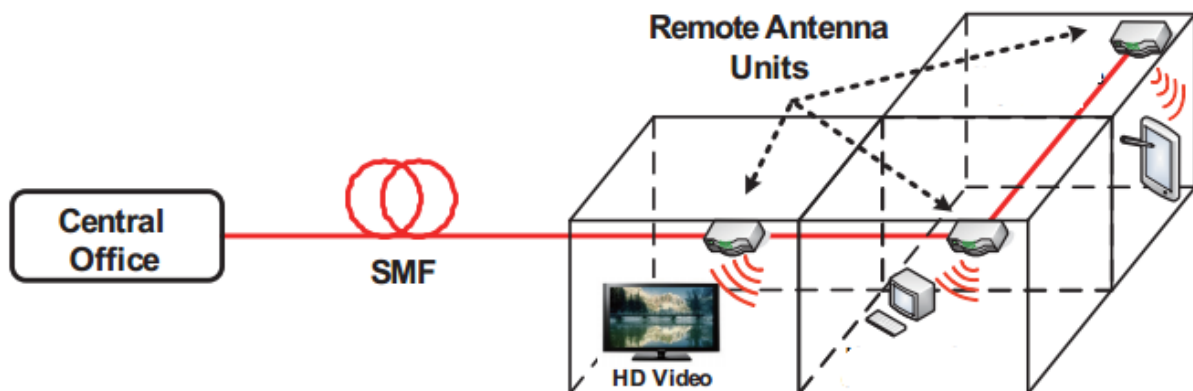


Figura 4: Exemplo de distribuição de multiserviço utilizando o sistema RoF [14]

2.4.1 Estado de arte

Em 1990 é escrito um artigo, por A. J. Cooper, referente à primeira demonstração de um sistema RoF aplicado às redes móveis. Esta demonstração, denominada por CT2, consistia num sistema telefónico sem fios de segunda geração que disponibilizava 40 canais sobre 40 frequências, na banda dos 864-868 MHz. O acesso rádio era realizado através de FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) TDD (*Time Division Duplex*). E para colocar os sinais RF na fibra óptica utilizava-se SCM (*Sub-carrier Multiplexing*). Este sistema só era viável para um raio de 100 m, sendo por isso considerado um sistema de curto alcance [15].

Na última década existiram alguns exemplos de aplicação do sistema RoF, nomeadamente nos jogos olímpicos de Sydney em 2000 e no *Bluewater shopping center* em Londres.

Nos jogos olímpicos de Sydney foi a *Allen Telecom* que instalou o *Tekmar Sistemi fiber-optic* baseado no sistema de comunicações móveis, conhecido por *BriteCell*, para suportar o tráfego gerado pelos presentes no evento. Os requisitos deste projecto consistiam em suportar *multi-standards* para interiores e uma infra-estrutura celular de pico-células capaz de suportar todo o tráfego gerado na banda dos 900 MHz e dos 1800 MHz. Teria também de permitir a existência dos três operadores existentes na Austrália. Esta aplicação foi considerada um sucesso pois a queda de chamada obtida foi de menos de um 1%. Este sucesso foi reforçado com os jogos olímpicos de Antenas em 2004, onde não se utilizou este tipo de sistema e a queda de chamada obtida foi de 20% [16] [17].

No *Bluewater shopping center* também foi instalado um sistema RoF que disponibilizava os serviços dos quatro operadores existentes no Reino Unido. O sistema era composto por 10km de fibra monomodo e por quarenta e uma antenas distribuídas pelo *shopping* [18].

O projecto FUTON esteve envolvido no desenvolvimento de arquitecturas para o sistema RoF capazes de suportar os sistemas 4G. Com este projecto consegue-se apresentar uma solução de implementação do 4G mais barata, pois o seu objectivo é centralizar todo o processamento num local que estará ligado por fibra óptica a diversas unidades remotas de antenas de baixa complexidade. A arquitectura desenvolvida recorre ao uso de sistemas MIMO virtuais para realizar a transmissão sem fios e para cancelar a interferência entre células. Este projecto contou com parcerias de diferentes países, entre os quais está presente Portugal, representado pela Nokia Siemens, pela Portugal Telecom e pelo Instituto de Telecomunicações. As últimas conclusões deste projecto foram apresentadas em 2010 [19] [20].

Na Figura 5 é apresentado um sistema RoF que é utilizado para as diferentes gerações de redes móveis. Nesta figura pode observar-se a CS, a fibra óptica e a RAU. Na RAU pode-se identificar dois equipamentos, a antena e um “bloco” atrás da antena, que contém o conversor óptico/eléctrico e eléctrico/óptico e o amplificador. Este é um exemplo de um sistema utilizado pela Portugal Telecom.

O sistema RoF pode estar também associado à distribuição de serviços como o *Triple Play* e à utilização de frequência na banda dos 60 GHz [21].

O Triple Play associado ao sistema RoF tem sido objecto de estudo de vários projectos, nomeadamente o projecto FIVER. [22]. O objectivo principal deste projecto é desenvolver uma arquitectura de rede simples e integrada, que permita a centralização da gestão da rede. Este projecto pretende fornecer serviço *Quintuple Play* (IP data, HDTV, telefone, segurança e controlo da casa e serviços sem fios) numa rede que inclua ligações ópticas e ligações rádio [22].

Enquanto decorria este projecto, foi publicado um artigo que consistia no estudo das redes FTTH em conjunto com o sistema RoF para disponibilizar o serviço de *Triple Play* [22] [23].

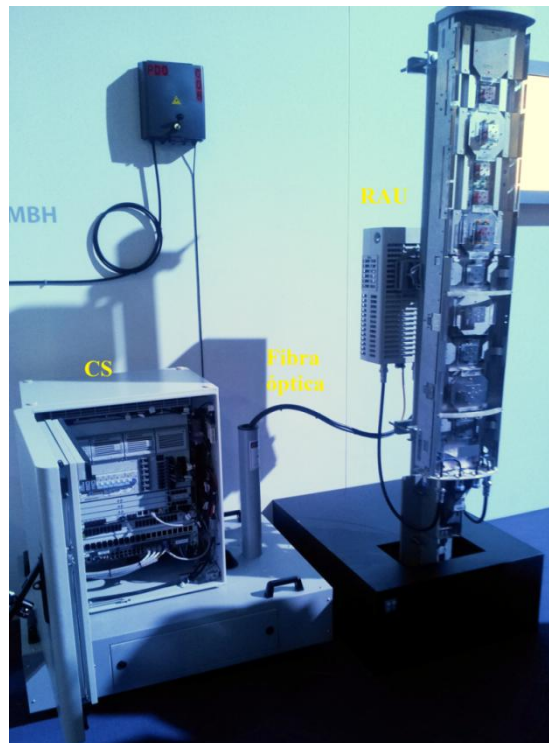


Figura 5: Sistema RoF

A área da célula, das redes que utilizam a banda dos 60 GHz, é pequena, pelo que é necessário instalar várias BS's. O RoF é uma solução que vai permitir a redução de custos neste tipo de redes.

O sistema RoF será a aposta para ampliar a cobertura de LTE nos jogos olímpicos de 2016 e no campeonato do mundo de 2014 no Brasil [24].

2.5 Figuras de mérito para avaliação do Sistema RoF

Neste ponto apresenta-se uma descrição dos critérios que irão servir para analisar a qualidade dos sinais recebidos, nos diferentes sistemas RoF simulados. É ainda indicado os limites do vector de erro para cada tecnologia utilizada nas simulações.

2.5.1 Constelação

Nas comunicações actuais, a informação transmitida é digital e vai organizada em símbolos discretos. Estes símbolos têm uma componente em fase e outra em amplitude e são mapeados num diagrama de constelação. Este diagrama contém um eixo para a componente de fase (I - *In-Phase*) e outro para a componente em quadratura (Q - *Quadrature*), este último corresponde à amplitude do símbolo. Os símbolos dispostos nos diagramas de constelação são resultante de modulações como M-QAM e o M-PSK [25]. Na Figura 6 pode observar-se um exemplo de um diagrama de constelação da modulação de 16 QAM, onde se constata que cada símbolo é definido por 4 bits.

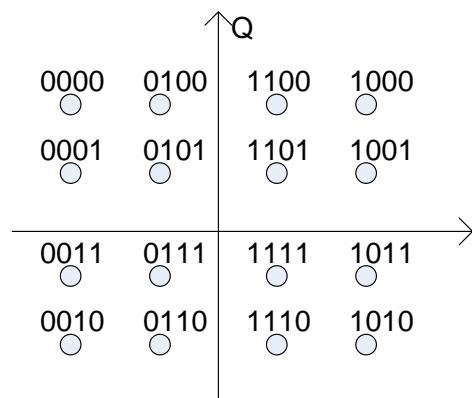


Figura 6: Diagrama de constelação da modulação de 16-QAM

A posição de um símbolo no diagrama de constelação pode ser afectada, ou seja o símbolo pode aparecer deslocado em relação à sua posição de referência, devido à existência de ruído e de não linearidade. Este deslocamento pode ser prejudicial na recepção, pois se um símbolo for confundido com um símbolo vizinho irá provocar um erro na desmodulação, podendo não se recuperar a informação transmitida [25].

2.5.2 Vector de erro

Um símbolo pode sofrer um desvio de amplitude ou de fase, em relação ao seu ponto inicial, na presença de ruído ou de não linearidades [25].

Na Figura 7a) observa-se um exemplo de desvio de amplitude, o ponto a vermelho indica a posição inicial do símbolo, a mancha a cinzento indica o local onde o símbolo pode estar na recepção. Como se pode constatar pela Figura 7b) quando existe desvio de fase, os símbolos afastam-se da sua posição de referência e passam a estar localizados sobre um arco de circunferência, que representa o erro de fase. Pode-se concluir então, através da análise anterior, que estes desvios podem fazer com que um símbolo seja erradamente interpretado, ou seja, pode ser confundido com um símbolo da sua vizinhança. Este fenómeno pode acontecer se o nível de ruído for elevado, ou seja, SNR (*Signal Noise Ratio*) baixa e consequentemente a taxa de erro de símbolo sobe [25].

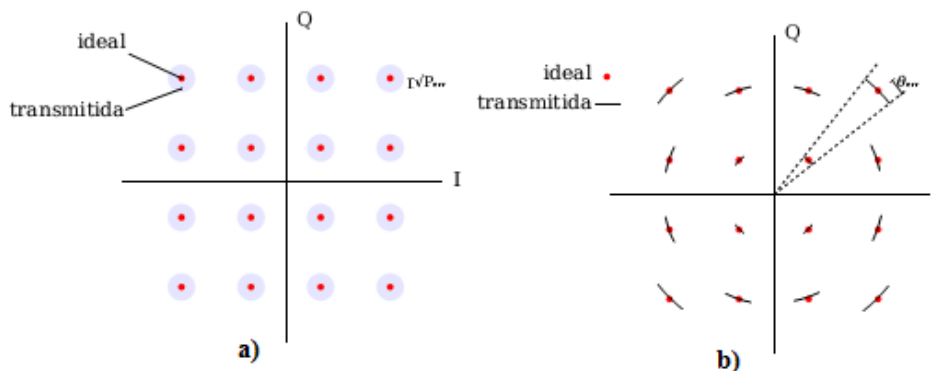


Figura 7: a) Desvio de amplitude b) desvio de fase [25]

A não linearidade pode afectar a constelação fazendo com que os símbolos com maior potência, ou seja, os símbolos que se encontram mais afastados, se aproximem do centro [25]. Este fenómeno pode ser observado na Figura 8.

Estes “deslocamentos” dos símbolos podem ser medidos através do vector de erro, EVM (*Error Vector Magnitude*). Este parâmetro é uma percentagem que contabiliza a diferença entre o valor ideal do símbolo e o valor recebido do símbolo.

O valor máximo de EVM permitido depende do sistema e essencialmente do tipo de modulação utilizado. Estando este valor definido nas normas de cada sistema.

Na Tabela 1 são apresentados os limites de EVM que serão necessários nesta dissertação.

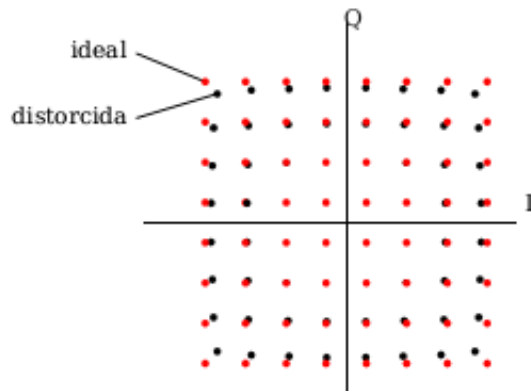


Figura 8: Distorção da constelação [25]

Tabela 1: Limites de EVM [26] [27] [28]

		Limite de EVM
WiMAX	QPSK	10%
	16 QAM	6%
LTE	QPSK	17.5%
	16 QAM	12.5%
	64 QAM	8%
UWB	Para as modulações utilizadas segundo a norma ECMA-368	14.1%

Capítulo 3

Fibra Óptica, Geração e Multiplexagem de sinais ópticos

Neste capítulo apresenta-se uma descrição sobre a fibra óptica e sobre os seus efeitos não lineares. Apresenta-se uma descrição sobre a geração e multiplexagem de sinais ópticos, indicando as várias possibilidades.

3.1 Fibra óptica

A fibra óptica é um meio de transmissão que apresenta um formato cilíndrico. A fibra é composta por um núcleo, com índice de refração n_1 , e por uma bainha, com índice de refração n_2 , como mostra a Figura 9. O núcleo e a bainha são dielétricos e o valor de n_2 é inferior ao valor de n_1 , este último facto acontece para que o sinal, em forma de luz, seja transportado no núcleo por reflexões múltiplas [9].



Figura 9: Fibra óptica [29]

Existem dois tipos de fibra:

- Fibra multimodo (MMF - *Multimode Fiber*);
- Fibra monomodo (SMF - *Single Mode Fiber*).

As MMFs foram as primeiras a surgir e o seu núcleo apresenta um diâmetro entre 50 a 85 μm . Como se trata de uma MMF tem múltiplos modos a “viajar” na fibra, a cada modo corresponde um raio de luz, que pode viajar a velocidades diferentes, este aspecto é demonstrado na Figura 10. Uma desvantagem, deste tipo de fibra é a dispersão intermodal que resulta do fenómeno apresentado na Figura 10 [10] [9].

As SMFs surgiram, em 1984, com a finalidade de eliminar a dispersão intermodal. Este tipo de fibra apresenta um núcleo de diâmetro de 8 a 10 μm , muito inferior quando comparado com o anterior. Estes valores de diâmetro do núcleo são da ordem de grandeza do

comprimento de onda do sinal, forçando assim que o sinal se propague num único modo, i.e., o modo fundamental [2] [10]. A principal desvantagem da SMF é a dispersão cromática, apesar de também existir nas MMFs a dispersão intermodal sobrepõe-se a este tipo de dispersão. A dispersão cromática é uma consequência da diferença de velocidades de propagação das componentes espectrais de um impulso. Esta dispersão tem como consequência o alargamento dos impulsos, e como a informação é enviada usando uma sequência de impulsos poderá originar sobreposição dos mesmos.

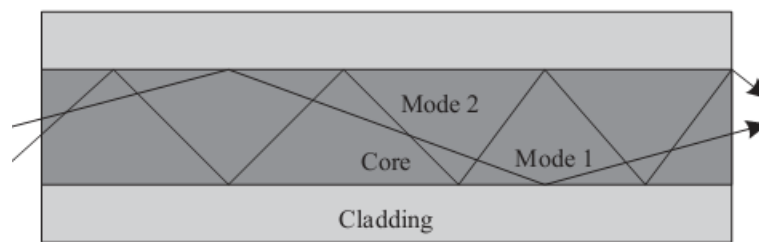


Figura 10: Modos como os raios de luz viajam dentro da fibra [9]

A dispersão cromática é composta pela dispersão material e pela dispersão do guia de onda.

A dispersão material está relacionada com a dependência que existe entre o índice de refração da sílica, material de que é feita a fibra óptica, e o comprimento de onda. Se existirem dois comprimentos de onda diferentes, vão existir dois índices de refração diferentes. Comprimentos de onda diferentes viajam a velocidades diferentes [10].

A dispersão do guia de onda advém de que parte da energia do modo se propaga no núcleo e a outra parte se propaga na bainha, contando ainda com o facto do índice de refração efectivo estar compreendido entre o índice de refração do núcleo e o índice de refração da bainha ($n_2 < n_{ef} < n_1$) [30].

Existe ainda a dispersão de polarização, PMD (*Polarization-Mode Dispersion*), que acontece porque as fibras não são perfeitamente simétricas. Caso as fibras fossem perfeitamente simétricas, as constantes de propagação dos dois modos de propagação de luz seriam iguais, viajando assim a velocidades iguais. Como as fibras não são perfeitamente simétricas, os dois modos não têm constantes de fase iguais, viajando assim a velocidades diferentes e tendo como consequência o alargamento dos impulsos [31].

3.1.1 Efeitos não lineares da fibra óptica

As comunicações ópticas são afectadas pelos efeitos lineares e não lineares da fibra. Os efeitos lineares são a atenuação e a dispersão. As dispersões que podem existir estão descritas no ponto anterior.

Os efeitos não lineares podem ser divididos em duas categorias:

1. Efeitos originados pela não linearidade do índice de refração;
2. Efeitos originados pela difusão estimulada.

Da primeira categoria fazem parte:

- Auto-modulação de fase (*Self-Phase Modulation* - SPM);
- Modulação de fase cruzada (*Cross Phase Modulation* - CPM);
- Mistura de 4 ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM).

Da segunda categoria fazem parte:

- Difusão estimulada de *Raman* (*Stimulated Raman Scattering* - SRS);
- Difusão estimulada de *Brillouin* (*Stimulated Brillouin Scattering* - SBS).

Os efeitos não lineares deixaram de ser desprezáveis devido ao aumento da distância das ligações (e das elevadas potências utilizadas). Esse aumento da distância foi possível com introdução de amplificadores ópticos nas ligações [5]

3.1.1.1 SPM

Esta não linearidade está relacionada com a dependência existente entre a potência e o índice de refração. Assim sendo, a variação da potência do sinal vai provocar a variação do índice de refração, o que terá como consequência variações de fase. As variações de fase, que são proporcionais à intensidade do impulso, originam o *chirping*². O *chirp* vai contribuir para aumentar o alargamento ou a compressão dos impulsos. O SPM pode ter maior ou menor impacto dependendo da intensidade da dispersão cromática [10].

3.1.1.2 CPM

A modulação de fase cruzada é parecida com a auto-modulação de fase mas com a diferença de que a variação de fase do impulso é afectada pelos outros impulsos que se propagam na fibra óptica. Quer isto dizer que o *chirp* induzido num canal passa a depender da

² Frequência do sinal varia com o tempo

potência dos outros sinais que estão a ser transmitidos na fibra óptica, ao mesmo tempo. Este fenómeno está presente em sistemas WDM, onde é possível ter uma sequência de impulsos a propagarem-se na fibra. Esta limitação pode ser minimizada aumentando o espaçamento entre os canais que vão ser enviados [32].

3.1.1.3 FWM

A mistura de 4 ondas é uma limitação dos sistemas WDM e é causada pela natureza não linear do índice de refração da fibra óptica. Este sistema permite que sejam transmitidos vários sinais de frequências, ao mesmo tempo e na mesma fibra, que podem originar outros sinais indesejados. Um sinal com as frequências f_i, f_j, f_k , pode originar um sinal na frequência $f_{ijk}=f_i+f_j-f_k$ [10].

Este aspecto é crítico nos sistemas WDM e em situações em que o espaçamento entre canais seja pequeno. Ao contrário da SPM e da CPM não depende do débito binário [32].

3.1.1.4 SRS

Existe SRS quando são injectados na fibra óptica vários sinais com comprimentos de onda diferentes e a potência dos comprimentos de onda mais baixos é transferida para os comprimentos de onda mais altos [10]. Na Figura 11 é apresentado um esquema que ilustra a SRS.



Figura 11: Dispersão estimulada de Raman [33]

O ganho da transferência de potência é inferior ao da SBS. Este efeito é aproveitado para construir amplificadores [10].

3.1.1.5 SBS

Existe SBS quando da onda transmitida surge uma segunda onda, com energia inferior, que é reflectida. Este fenómeno acontece quando surgem potências elevadas que

interagem com a vibração acústica das moléculas de sílica. A segunda onda denomina-se por onda de *Stokes*. Para contrariar este efeito é necessário colocar isoladores que eliminem a onda de *Stokes* [10]. Na Figura 12, é apresentado um esquema que ilustra o aparecimento da onda de *Stokes*.

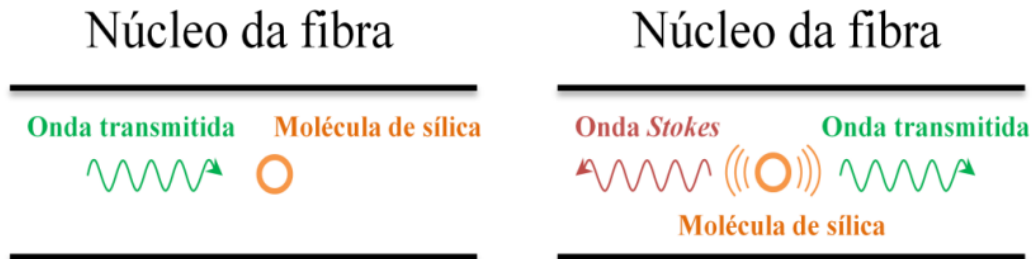


Figura 12: Criação da onda de Stokes na SBS [34]

3.2 Geração de sinais ópticos e multiplexagem

3.2.1 Modulação em intensidade

A modulação em intensidade (*Intensity Modulation - IM*) é semelhante à modulação OOK (*On-off keying*) mas em sinal óptico, ou seja, consiste em desligar e ligar a fonte óptica para representar os sinais binários 0 e 1, respectivamente.

A modulação em intensidade é a mais comum num sistema RoF embora exista a modulação em frequência e a modulação em fase [35]. Existem dois métodos para gerar o sinal óptico para este tipo de modulação:

1. Modulação Directa;
2. Modulação Externa.

3.2.1.1 Modulação Directa

Neste tipo de modulação o sinal RF é directamente injectado nos terminais do laser. Este, por sua vez, emite a correspondente modulação em intensidade. Neste processo o sinal eléctrico modula o sinal óptico sem ser necessário um modulador externo. Na Figura 13 está presente um esquema ilustrativo deste tipo de modulação [10].

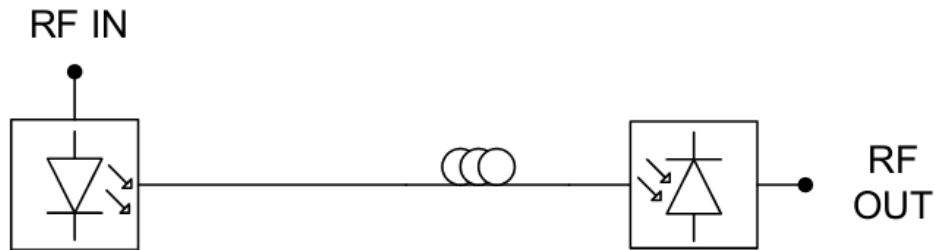


Figura 13 - Modulação directa [35]

A modulação directa é simples, consome pouca potência e é de baixo custo, pois não é necessário nenhum componente para além do laser (fonte de luz) para modular o sinal óptico. Esta é uma das vantagens da utilização de laser semicondutores tais como, o laser FP (*Fabry-Perot*), o laser DFB (*Distributed Feedback*) e VCSELs (*Vertical-Cavity Surface Emitting lasers*). Este tipo de modulação tem como desvantagem a presença de *chirp* nos impulsos resultantes da modulação. Este fenómeno provoca o alargamento do espectro transmitido [2] [34].

3.2.1.2 Modulação Externa

Nesta modulação o laser emite continuamente um feixe de luz de intensidade constante (CW - *Continuous Wave*) que é aplicado na entrada do modulador externo. O sinal RF é colocado na entrada eléctrica do modulador e com a tensão que lhe impõe produz as variações de intensidade óptica, modulando assim a portadora óptica [2] [10]. A Figura 14 representa um esquema da modulação externa.

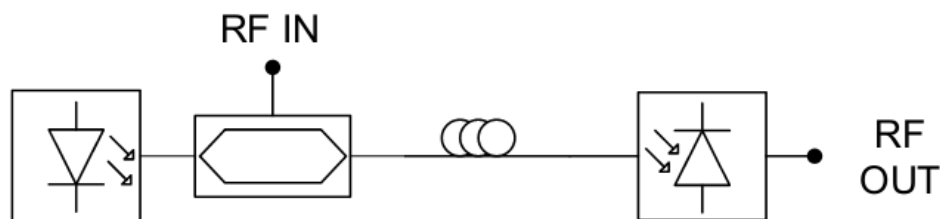


Figura 14 - Modulação externa [35]

A utilização de moduladores externos evita a presença de *chirp* nos impulsos, contudo a sua utilização também encarece e aumenta a complexidade do sistema. Este tipo de modulação também apresenta um maior consumo de energia [2].

Actualmente existem dois tipos de moduladores externos mais importantes, sendo eles:

- Modulador LiNbO_3 (Niobato de Lítio), como por exemplo MZM (*Mach-Zehnder Modulator*);
- Modulador semiconductor EA (*Electro-Absorption*).

O índice de refração, do modulador LiNbO_3 , varia linearmente com a tensão do sinal de entrada. Esta variação leva à mudança de fase óptica que pode ser convertida em modulação de intensidade através de um interferómetro *Mach-Zehnder*. A variação do índice de refração em cristais ópticos com um campo eléctrico, denomina-se por efeito electro-óptico [2].

Este tipo de moduladores tem como desvantagem a necessidade de uma tensão eléctrica muito elevada. A sua utilização é prejudicial em sistemas analógicos, porque nestes sistemas as tensões elevadas provocam elevado ruído [2].

Os moduladores EA geram modulação através do efeito de electro-absorção. Estes efeitos consistem na mudança do coeficiente de absorção óptico dos materiais devido a um campo eléctrico, resultando assim numa modulação por intensidade. Este tipo de modulador é mais pequeno que o MZM, considerando a mesma largura de banda e a mesma eficiência, e não necessitam de tensões elevadas. Apresentam como desvantagem a sua baixa potência de saturação e os requisitos de controlo de temperatura [2].

3.2.2 WDM

O WDM consiste numa técnica de transmissão de vários canais, ao mesmo tempo e na mesma fibra. Cada canal é transmitido numa portadora óptica com um determinado comprimento de onda que difere das outras portadoras ópticas. O WDM é similar ao FDM mas a nível óptico [10].

Este tipo de multiplexagem apresenta como vantagem a possibilidade de tirar partido da largura de banda oferecida pela fibra. E apresenta como desvantagens os custos acrescidos, pois a multiplexagem e demultiplexagem é feita a nível óptico para o envio e recepção de sinais, respectivamente. É ainda necessário gerar mais portadoras ópticas, logo são necessários mais lasers que tornam o sistema mais caro [11].

Na Figura 15 pode-se observar quais os componentes de um sistema WDM, nomeadamente o *multiplexer*, para juntar os diferentes sinais, e o *demultiplexer*, para depois

os separar. Por cada sinal é necessário um laser, indicado na figura pela sigla LD, para o converter do domínio do eléctrico para o domínio óptico.

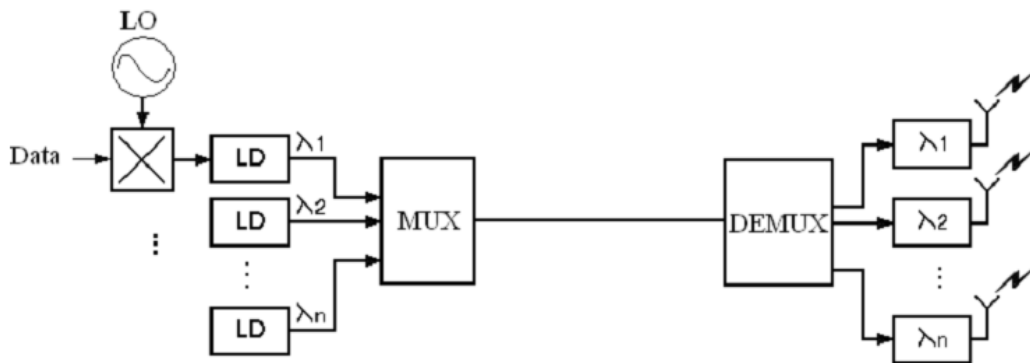


Figura 15 - Sistema WDM [36]

3.2.3 SCM

Nesta técnica em primeiro lugar a informação é modulada numa subportadora eléctrica, que assume valores entre 10 MHz e 10 GHz, este limite superior depende da largura de banda disponível para modulação no transmissor. Depois essa subportadora é modulada numa portadora óptica. A vantagem desta técnica é que se pode combinar várias subportadoras, com diferentes frequências, e depois modular esse sinal combinado numa portadora óptica [10].

No receptor o sinal é detectado como se tratasse de outro sinal qualquer. A separação das subportadoras, para extrair a informação de cada uma, é feita electronicamente [10].

Este tipo de multiplexagem tem como vantagem a possibilidade de transmitir vários sinais numa única portadora óptica. Os sinais podem ser analógicos ou digitais e podem ter modulações diferentes entre si, tornando a transmissão transparente. Como a multiplexagem e demultiplexagem é realizada a nível eléctrico, os custos do sistema RoF com o SCM são menores [10].

A grande desvantagem do SCM é não aproveitar as capacidades da fibra óptica, nomeadamente a largura de banda, pois só permite que uma portadora óptica seja transmitida [10].

Na Figura 16 pode observar-se como é um sistema SCM e são notórias as diferenças em relação ao sistema WDM, pois a combinação dos sinais é feita antes da conversão do sinal

de eléctrico para óptico e só é necessário um laser, o que diminui o custo deste sistema face ao WDM.

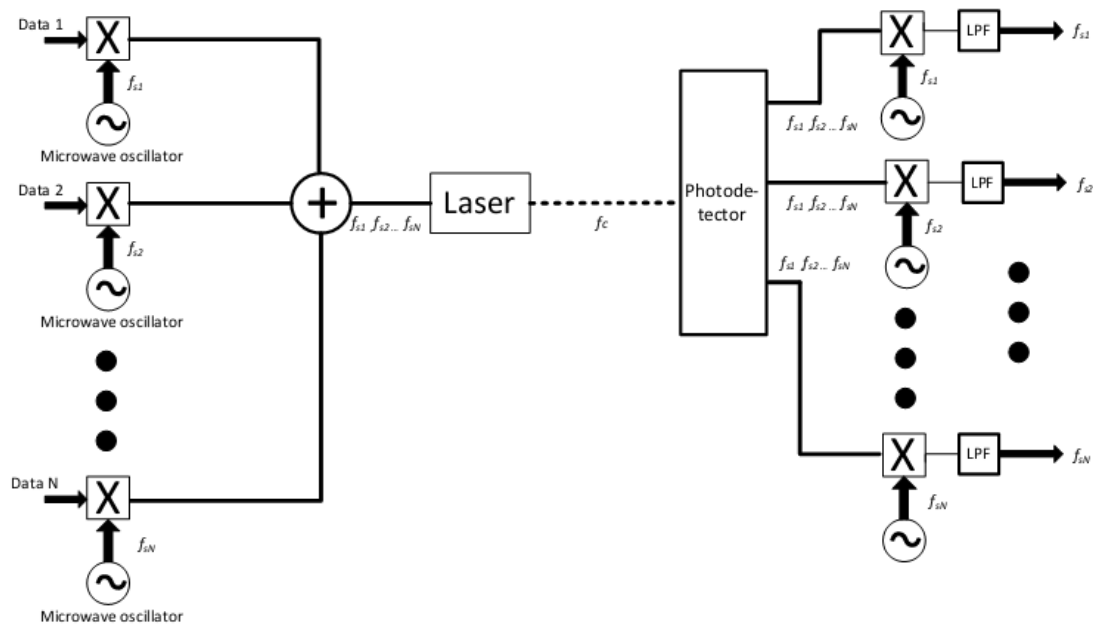


Figura 16 - Sistema SCM [11]

3.3 Índice de modulação

O índice de modulação é um parâmetro que relaciona o sinal RF com a portadora óptica e influencia a qualidade de desmodulação do sinal. Este parâmetro mede a influência que o sinal modulante tem sobre a portadora óptica [37].

Existe uma relação de compromisso entre o índice de modulação e a zona linear do laser. Isto porque é necessário utilizar um índice de modulação que mantenha o nível de potência do sinal óptico de saída dentro da zona linear, para que não haja distorções provocadas pela não-linearidades ou pelo *clipping*³ [37].

Na Figura 17.pode observar-se uma linha a amarelo que corresponde à função de transferência do laser e uma onda sinusoidal a vermelho que corresponde ao sinal óptico que vai ser transmitido. Esta onda não pode ser superior à zona linear do laser, pela razão referido no parágrafo anterior. A zona linear do laser inicia-se em I_{th} .

³ Saturação do sinal

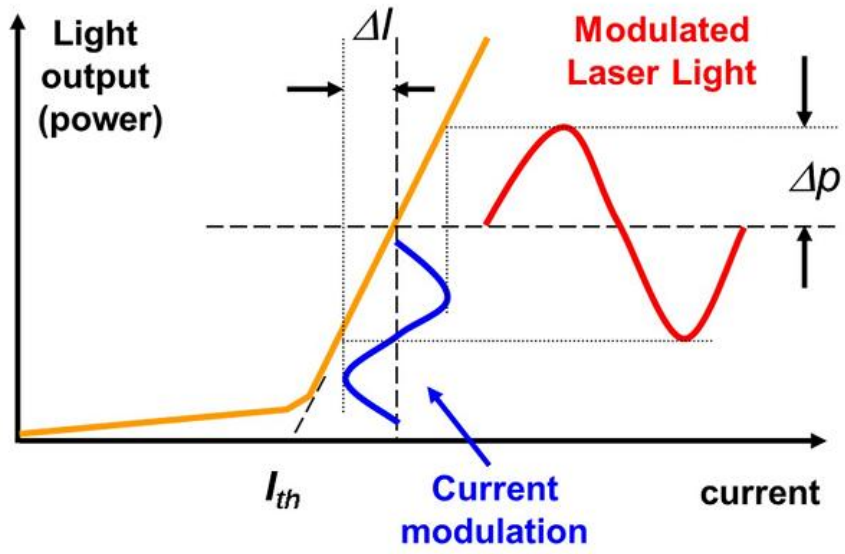


Figura 17: Curva de transferência do laser

Capítulo 4

Distribuição de sinais rádio e vídeo em sistemas RoF

Neste capítulo estão descritas as simulações efectuadas sobre um sistema RoF, bem como os comentários referentes aos resultados obtidos dessas simulações. As simulações estão distribuídas por duas partes. A primeira corresponde ao envio de um sinal e a segunda ao envio de três sinais em simultâneo. O objectivo destas simulações consiste em avaliar o comportamento do EVM do sinal recebido, ao alterar determinados factores, como por exemplo a potência de entrada, o índice de modulação e a distância.

Nas simulações efectuadas neste capítulo foram utilizados o modulador AM, o modulador EA e o modulador MZ. O modulador AM simula o comportamento de um modulador de amplitude ideal.

Os valores por omissão, utilizados nas simulações, foram de 0 dBm para a potência de entrada, de 30% para o índice de modulação e de 30 km para a distância de ligação por fibra óptica.

4.1 Sistema RoF para o envio de um sinal

Nas simulações efectuadas utilizou-se um laser, um amplificador eléctrico, uma fibra óptica e um fotodíodo. Na Tabela 2 é apresentada a parametrização dos componentes.

O amplificador eléctrico é utilizado para definir a potência de entrada do sinal RF e está localizado na CS.

As simulações realizadas neste ponto tiveram como objectivo analisar em que medida é que o índice de modulação influencia o sinal óptico a ser enviado. Analisou-se o comportamento do EVM quando se variava o índice de modulação, a distância e a potência de entrada para verificar quais seriam as diferenças entre um sistema com modulação directa e um sistema com modulação externa. Esta análise também foi efectuada para verificar quais seriam as diferenças que existem ao utilizar diferentes tipos de modulações E por último estudou-se o comportamento do EVM utilizando diferentes moduladores e sinais com diferentes débitos binários.

Tabela 2: Parametrização dos componentes do sistema RoF

Parametrização		
Laser	Potência de emissão	1mW
	Frequência de emissão	193.2 THz ($\approx 1550 \text{ nm}$)
	Largura da linha	10 MHz (80 pm)
Fibra óptica	Tipo	Monomodo (SMF)
	Frequência de referência	193.2 THz ($\approx 1550 \text{ nm}$)
	Atenuação	0.2 dB/km
	Dispersão	17 ps/(nm.km)
	Comprimento	30 km
Fotodíodo	Tipo	PIN
	Responsividade	0.8 A/W
	Corrente escura	0 A
	Ruído térmico	10 pA/Hz ^{1/2}

4.1.1 Estudo do efeito do índice de modulação

Neste ponto pretende-se analisar quais as alterações que o índice de modulação provoca no sinal óptico à saída do modulador.

Para realizar este estudo utilizou-se um sistema RoF composto por um laser, um modulador AM, uma fibra óptica e um fotodíodo. Este sistema é apresentado na Figura 18.

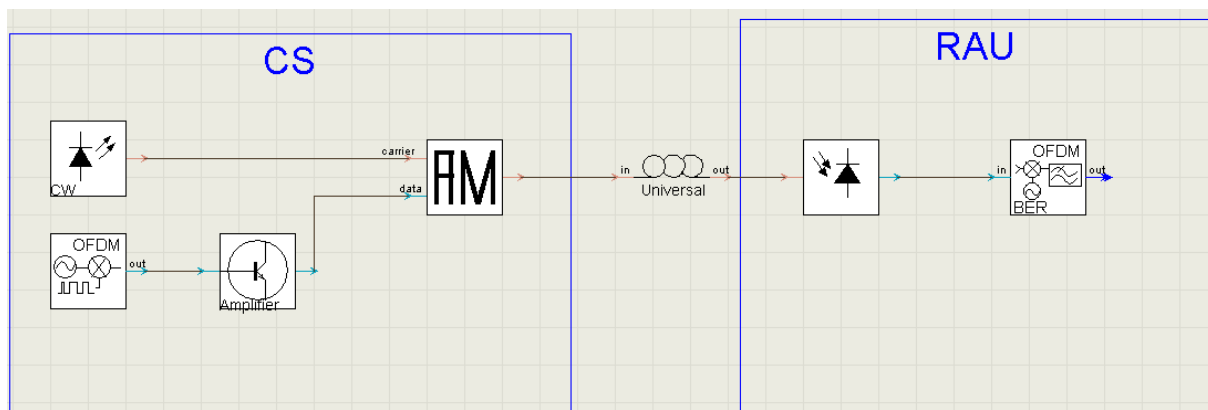


Figura 18: Sistema RoF utilizado, com modulador AM

O sinal utilizado apresentava características UWB, ou seja, um sinal OFDM, com modulação QPSK, centrado na frequência 3.96 GHz e com um débito binário de 200 Mbps. O espectro do sinal é apresentado na Figura 19. Este sinal apresenta uma largura de banda aproximadamente igual a 120 MHz.

Para calcular a largura de banda de um sinal, este simulador utiliza a equação (4.1) [38].

$$LB = \frac{R_b}{\text{Log}_2(M)} \times (1 + \alpha) \quad (4.1)$$

Em que LB corresponde à largura de banda, R_b ao débito binário, o M ao número de símbolos, e o α ao factor de *roll-off*. Em todas as simulações foi utilizado um factor de *roll-off* igual a 0.18 [38].

Utilizando a equação (4.1) obtém-se uma largura de banda igual:

$$LB = \frac{200 \times 10^6}{\text{Log}_2(4)} \times (1 + 0.18)$$

$$LB = 118 \text{ MHz}$$

O valor de largura de banda obtido através dos cálculos e obtido através da análise da Figura 19 são muito próximos.

Na Figura 20 é apresentado o sinal utilizado no domínio do tempo. E realizou-se uma simulação para o índice de modulação igual a 0.5%, a 30% e a 70%.

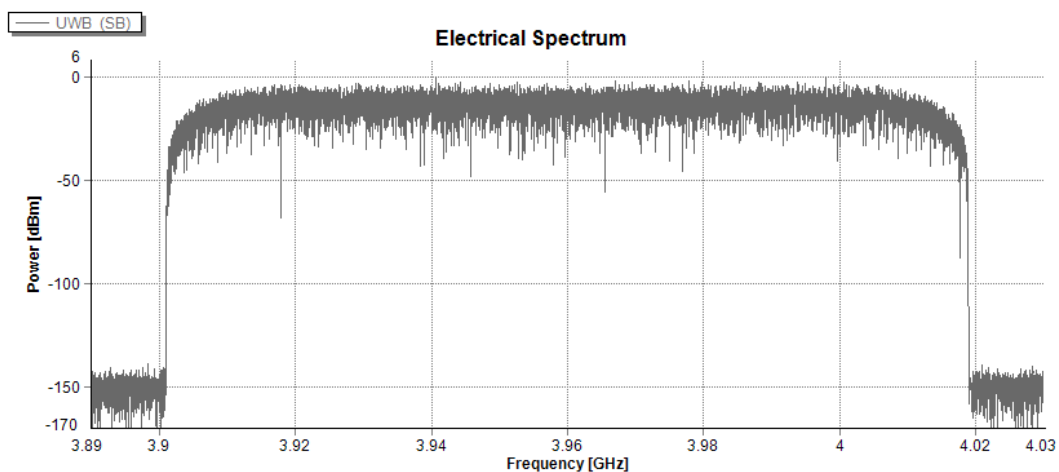


Figura 19: Espectro do sinal enviado

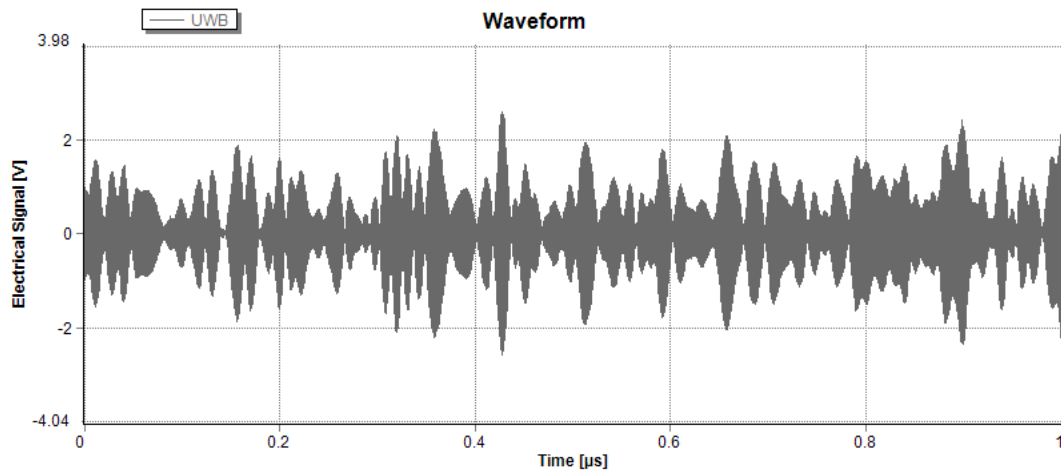


Figura 20: Sinal UWB, no domínio do tempo

Segundo a Figura 21, a Figura 22 e a Figura 23 pode concluir-se que à medida que se aumenta o índice de modulação, maior é a potência do sinal óptico. Isto porque, como foi visto no Capítulo III, se o índice de modulação for muito elevado, a potência do sinal óptico pode ser superior à zona linear do laser e originar *clipping*.

Na Figura 23 é possível observar o fenómeno de *clipping*, ou seja, o índice de modulação é de tal maneira elevado, que a potência do sinal óptico de saída saiu da zona linear. Sendo esta uma situação prejudicial para o sistema porque poderá ocorrer distorções no sinal.

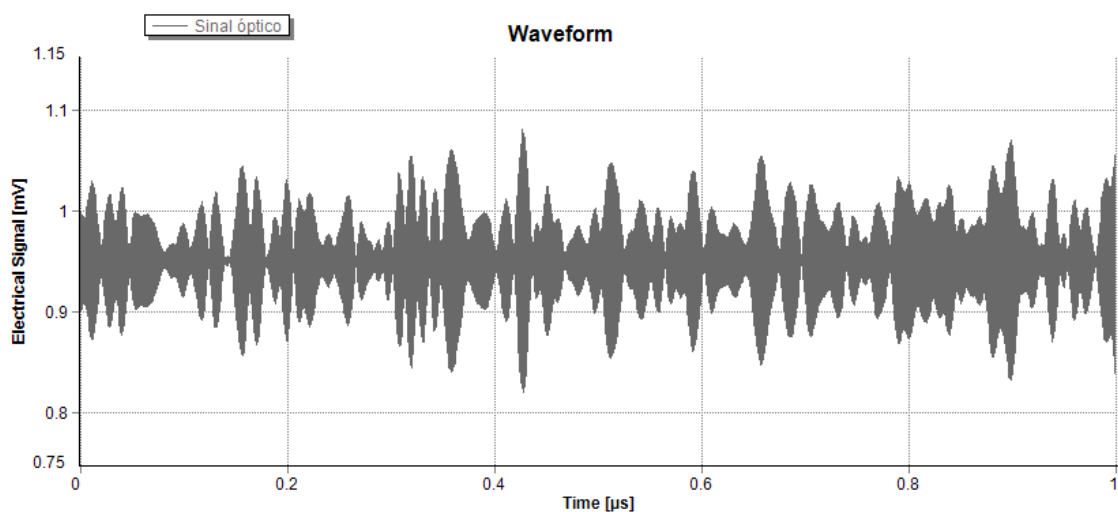


Figura 21: Sinal óptico a ser enviado, com índice de modulação igual a 0.5%

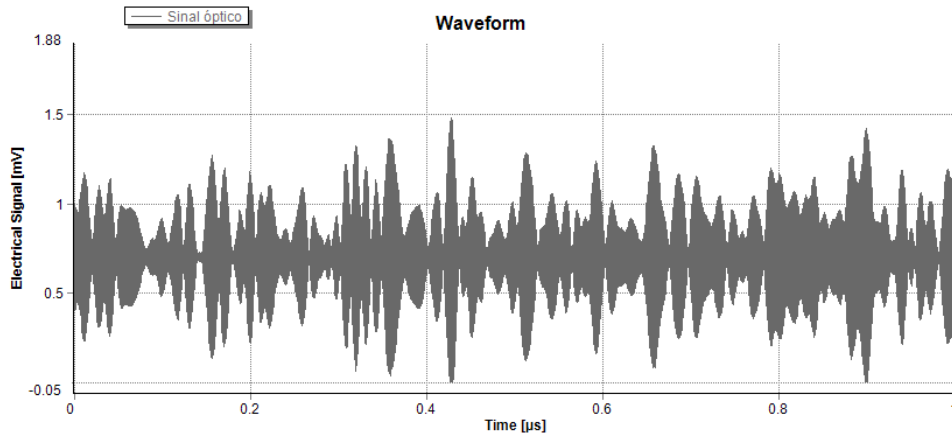


Figura 22: Sinal óptico a ser enviado, com índice de modulação igual a 30%

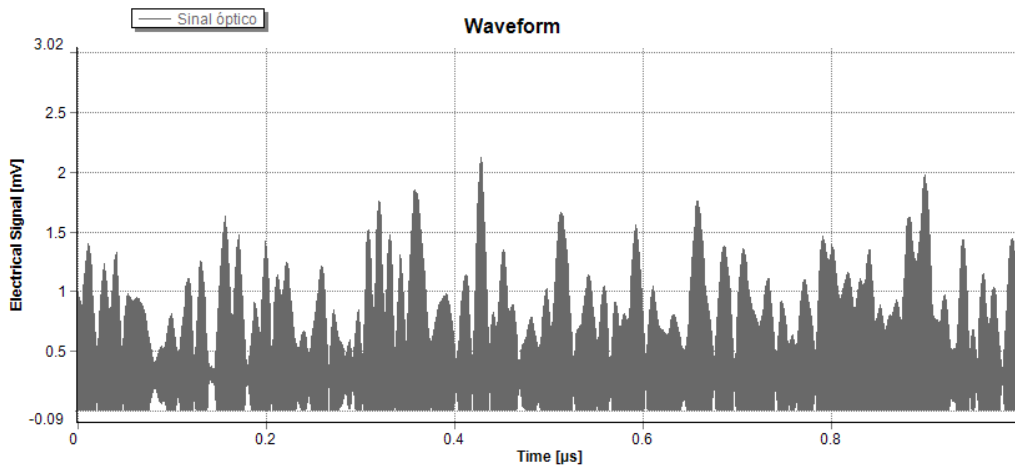


Figura 23: Sinal óptico a ser enviado, com índice de modulação igual a 70%

4.1.2 Modulação directa vs Modulação externa

Neste estudo utilizou-se um sinal 16 QAM, centrado na frequência 2.6 GHz e com um débito binário de 100 Mbps. Este sinal apresenta as características de um sinal LTE. O espectro deste sinal é apresentado na Figura 24.

Para realizar este estudo utilizaram-se dois sistemas, um com modulação directa e outro com modulação externa. Estes sistemas podem ser observados na Figura 25 e na Figura 26, respectivamente.

O laser utilizado, no sistema com modulação directa, reproduz o comportamento dos lasers DFB (*Distributed Feedback*). Estes tipos de laser são os mais comuns e os mais robustos lasers de um único modo. Apresentam uma elevada largura de banda e são os indicados para sistemas com débitos binários elevados. É ainda de ressaltar que o DFB é um

laser monomodal e apresenta menor dispersão cromática que os lasers FP (laser multimodal). Um laser multimodal apresenta um espectro constituído por vários modos de oscilação longitudinal [2].

O DFB utilizado na modulação directa permite que se altere o índice de modulação do laser. Como tal, realizou-se uma comparação entre a evolução do EVM quando se altera o índice de modulação num sistema de modulação externa e quando se altera este parâmetro num sistema de modulação directa.

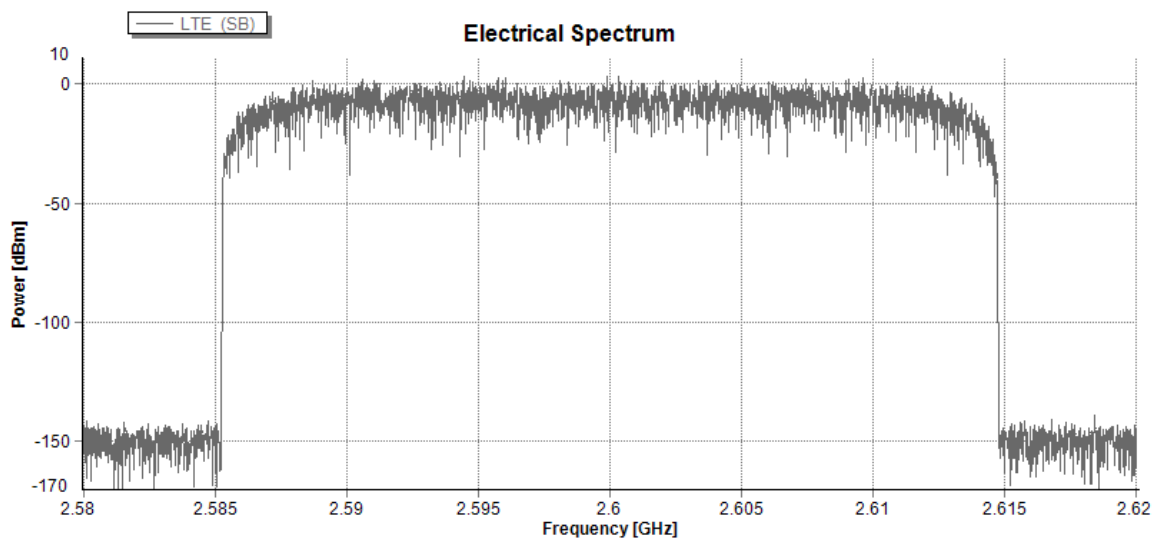


Figura 24: Espectro do sinal para a modulação 16 QAM

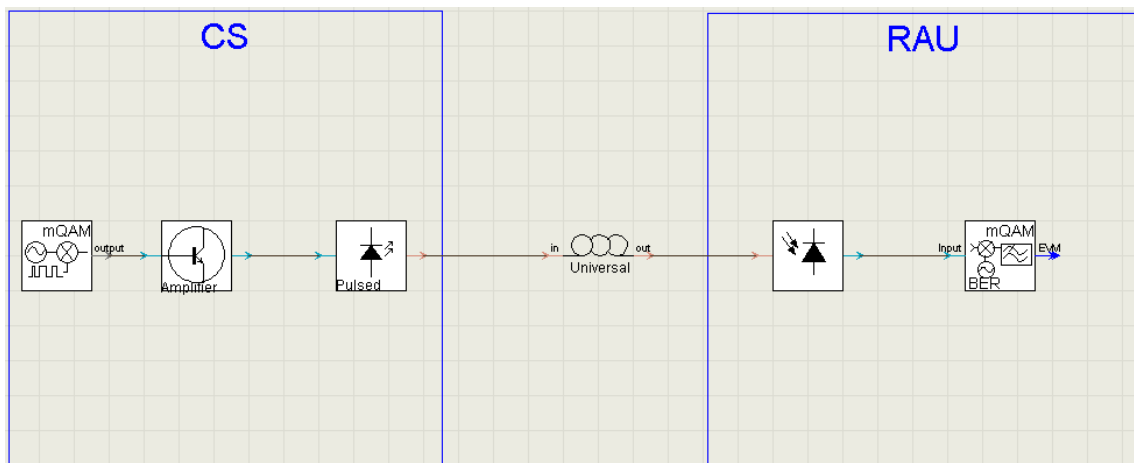


Figura 25: Sistema utilizado para modulação directa

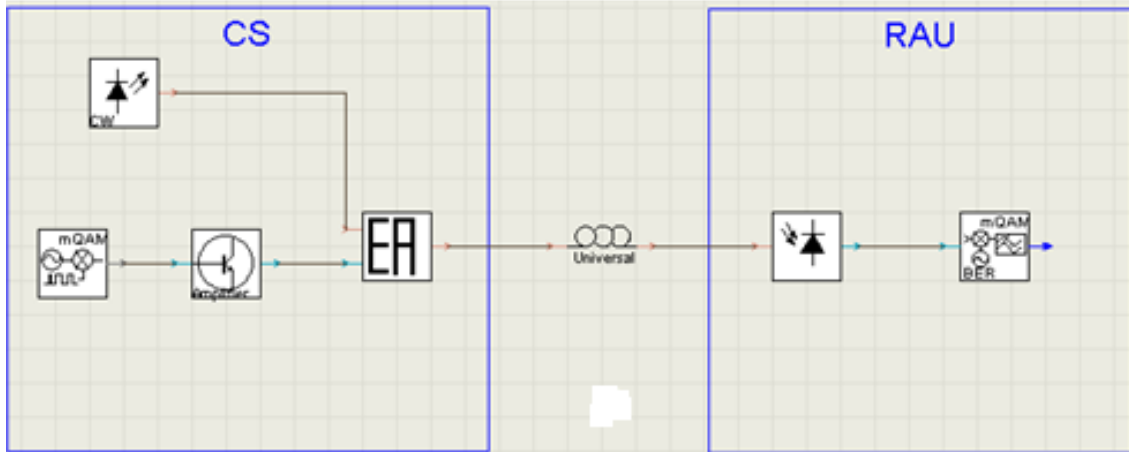


Figura 26: Sistema utilizado para modulação externa

Segundo a Figura 27 para índices de modulação inferiores a 50% o sistema com modulação directa apresenta piores resultados, ou seja, valores de EVM superiores. Para índices de modulação superiores a 50% e inferiores a 90% este sistema já apresenta melhores resultados comparativamente ao sistema com modulação externa. Conforme foi visto no ponto anterior, ao aumentar muito o índice de modulação, o sinal pode saturar, pelo que é necessário ter em atenção o valor que se utiliza para este parâmetro.

A modulação directa, segundo a Figura 27, apresenta valores de EVM mais baixos quando o índice de modulação é aproximadamente 30%.

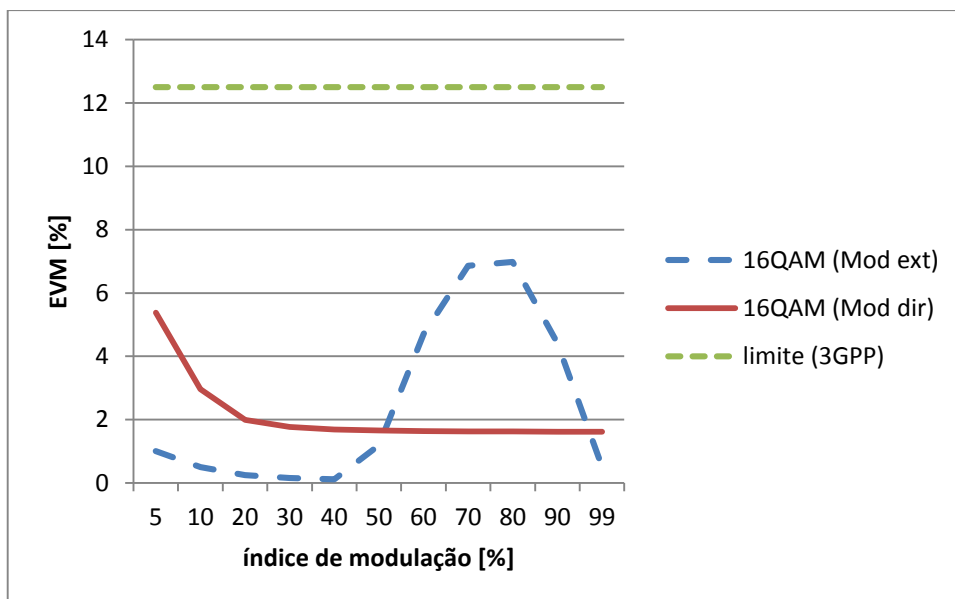


Figura 27: Evolução do EVM em função do índice de modulação (modulação directa vs modulação externa)

Na Figura 28 é apresentado o gráfico referente à evolução do EVM em função da distância. Ao analisá-lo concluiu-se que os dois sistemas apresentam o mesmo comportamento, ou seja, quanto maior é a distância, maior é o valor de EVM. O sistema com modulação directa apresenta, neste caso, os piores resultados, ainda assim o limite imposto pela norma não foi ultrapassado.

Por último, analisou-se a evolução do EVM em função da potência de entrada, apresentada na Figura 29, e concluiu-se que o sistema com modulação directa apresenta piores resultados que o sistema com modulação externa, excepto para uma potência de entrada superior a 8 dBm. Como foi visto anteriormente, o índice de refração vai variar com a potência do sinal, que por sua vez provoca uma variação de fase. Esta variação de fase irá originar o *chirp*, que terá como consequência o alargamento dos impulsos. O alargamento dos impulsos pode provocar uma sobreposição entre eles. A modulação externa apresenta valores de EVM mais baixos quando a potência de entrada toma valores entre -2 e 8 dBm

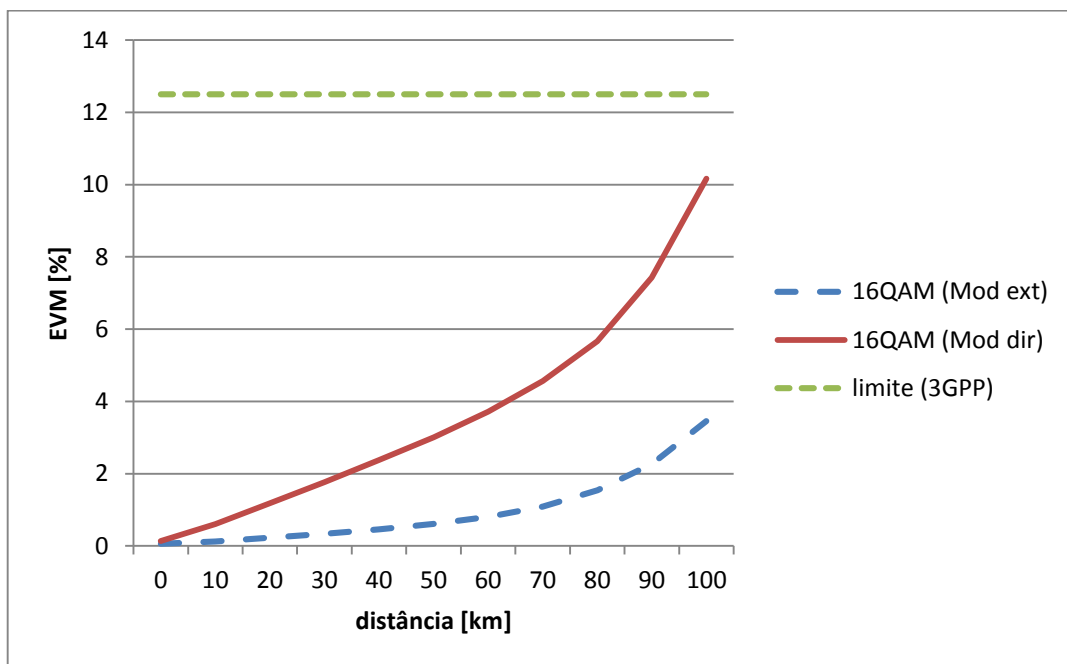


Figura 28: Evolução do EVM em função da distância (modulação directa vs modulação externa)

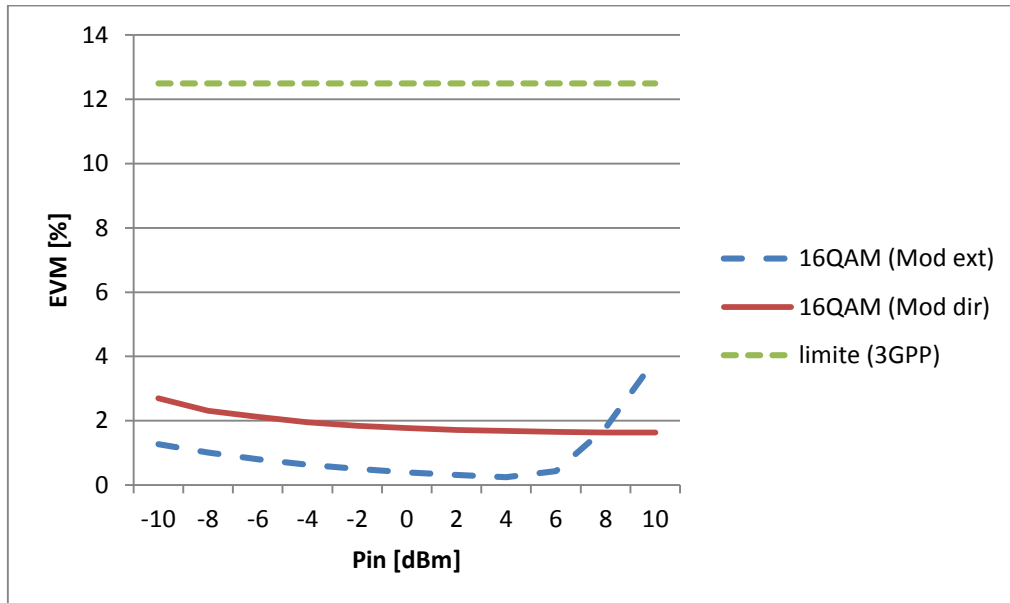


Figura 29: Evolução do EVM em função da potência de entrada (modulação directa vs modulação externa)

4.1.3 Estudo do efeito da utilização de diferentes modulações

Este estudo consiste em observar o comportamento do EVM, alterando alguns parâmetros, quando se utilizam diferentes modulações, como por exemplo OFDM ou 16 QAM.

Para este estudo utilizou-se um sistema composto por um laser, um amplificador eléctrico, um modulador EA, uma fibra óptica e um fotodíodo. O sistema utilizado para o envio de sinais OFDM é apresentado na Figura 30 e o sistema utilizado para o envio de sinais QPSK, 16 QAM e 64 QAM e é apresentado na Figura 26

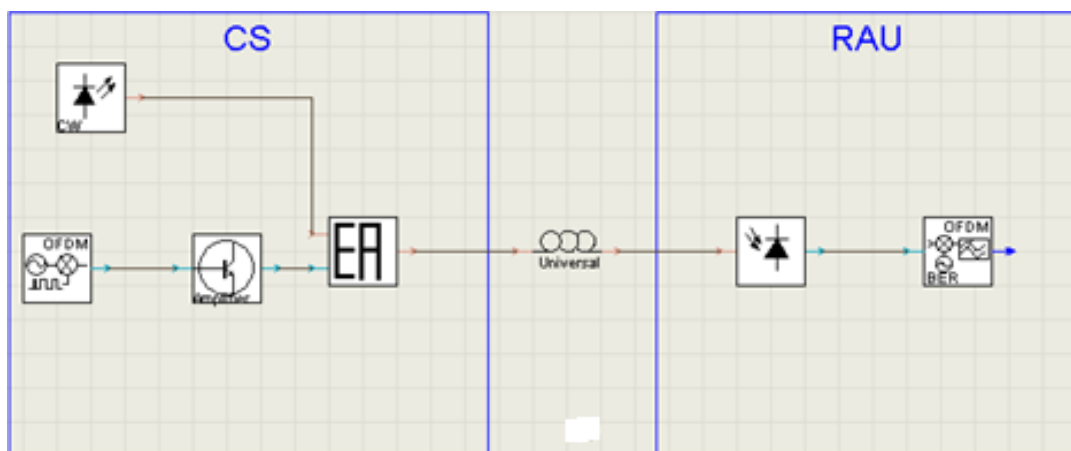


Figura 30: Sistema para envio de sinais OFDM

O sinal utilizado, neste estudo, apresenta características LTE, ou seja, está centrado na frequência 2.6 GHz e tem um débito binário de 100 Mbps. Como este estudo aborda diferentes modulações, o sinal irá apresentar larguras de banda diferentes, pois segundo a equação (4.1) o cálculo da largura de banda está dependente do número de bits por símbolo.

As modulações em estudo são a QPSK, a 16 QAM, a 64 QAM e a OFDM com QPSK, com 16 QAM e com 64 QAM. O objectivo deste estudo é analisar se existem vantagens na utilização de uma ou outra modulação na fibra. Na Figura 24, na Figura 31, e na Figura 32 é apresentado o espectro de cada sinal utilizado neste estudo. Como se pode ver por estas figuras à medida que o número de bits por símbolo aumenta, a largura de banda diminui, tal como era indicado pela equação (4.1).

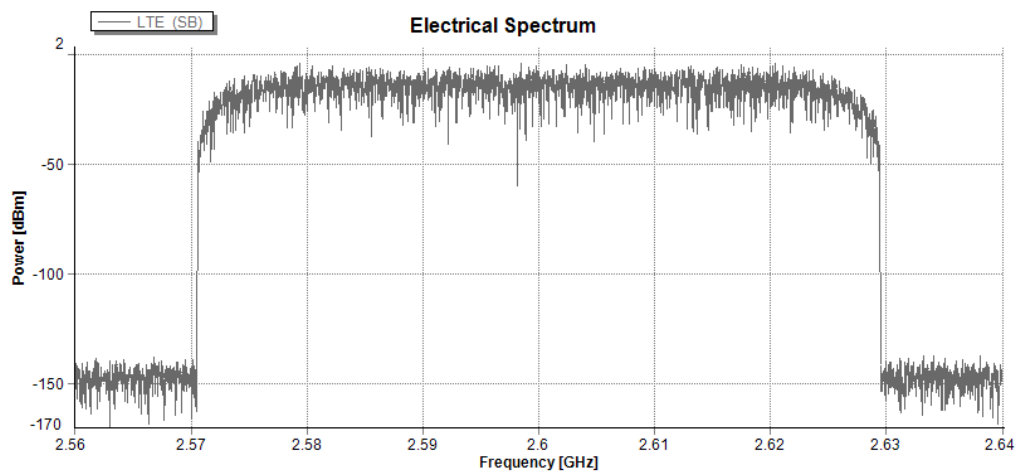


Figura 31: Espectro do sinal para a modulação QPSK e OFDM com QPSK

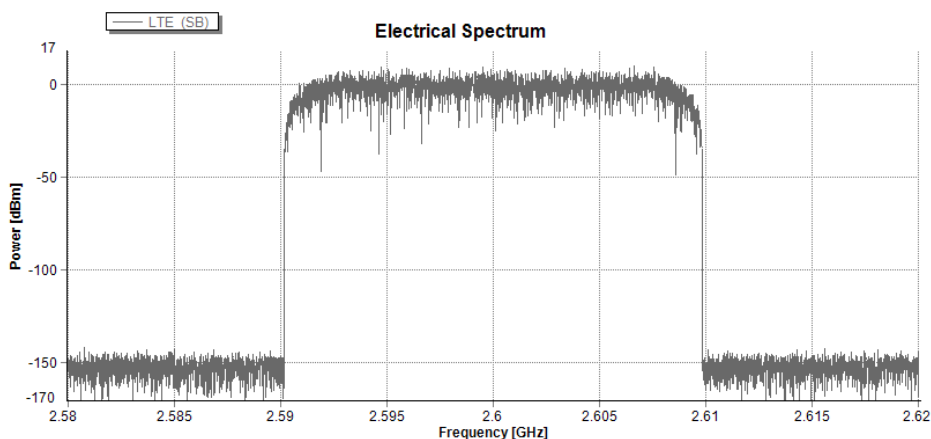


Figura 32: Espectro do sinal para a modulação 64 QAM e OFDM com 64 QAM

Neste estudo variou-se em primeiro lugar o índice de modulação, depois a potência de entrada e por último a distância, observando em cada situação o comportamento do EVM para cada modulação.

Ao analisar os gráficos da Figura 33, da Figura 34 e da Figura 35 pôde-se concluir que um sinal OFDM apresenta sempre um EVM superior ao das outras modulações, independentemente do valor do índice de modulação. Conclui-se também que no caso do OFDM com modulação 64 QAM, quando o índice de modulação toma valores entre 50% e 80%, o EVM encontra-se acima do valor imposto pela norma do 3GPP, para este tipo de sinal. É ainda de ressaltar que os valores mais baixos de EVM se encontram quando o índice de modulação toma valores entre 20% e 30%.

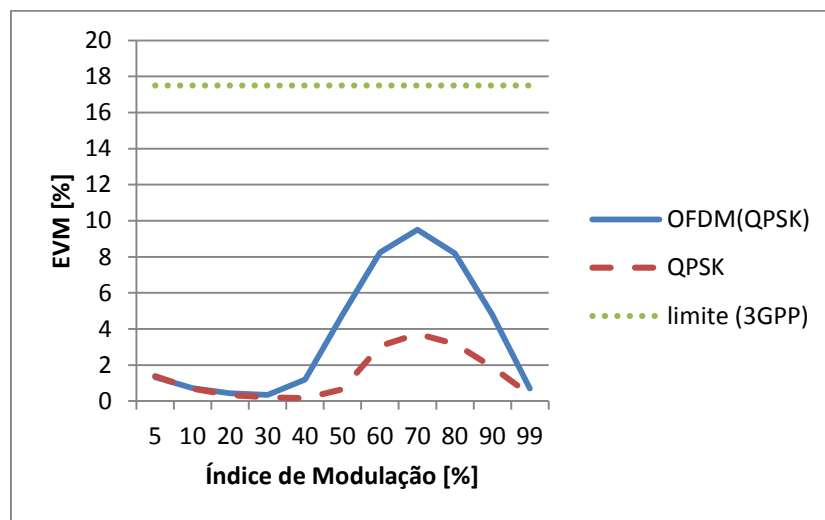


Figura 33: EVM em função do índice de modulação, para QPSK e OFDM com QPSK

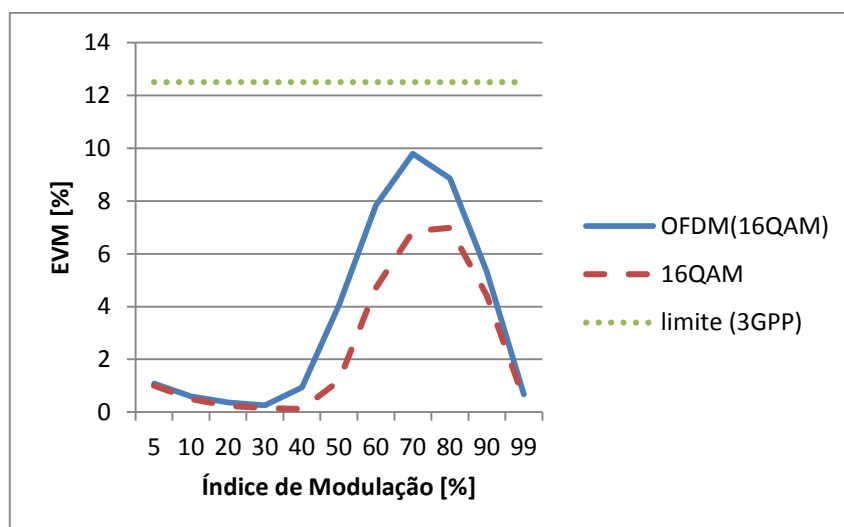


Figura 34: EVM em função do índice de modulação, para 16 QAM e OFDM com 16 QAM

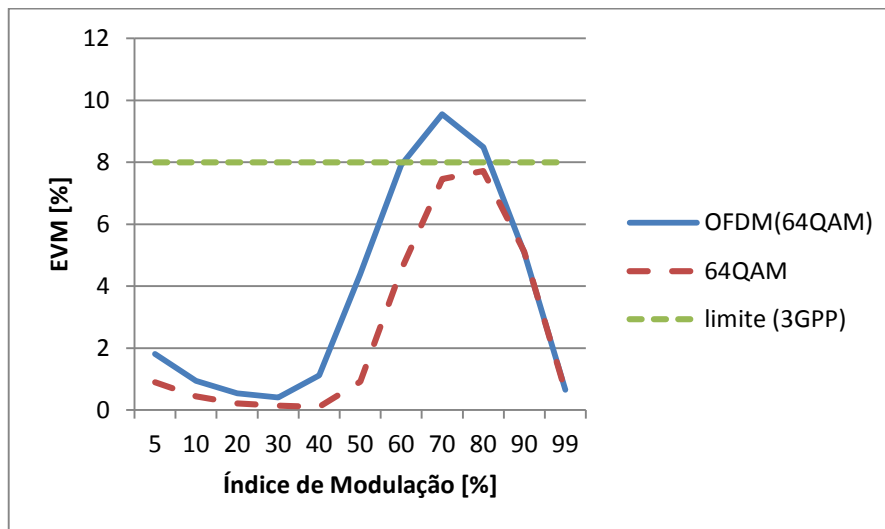


Figura 35: EVM em função do índice de modulação, para 64 QAM e OFDM com 64 QAM

A título de curiosidade observou-se quais seriam as diferenças que poderiam existir entre as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM e entre as modulações OFDM com QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Segundo os gráficos apresentados na Figura 36 e na Figura 37 pôde-se concluir que o EVM para os diferentes sinais OFDM se encontra muito próximo. Para os restantes sinais verifica-se que os sinais modulados em QPSK apresentam EVM menor e os modulados em 64 QAM apresentam EVM maior.

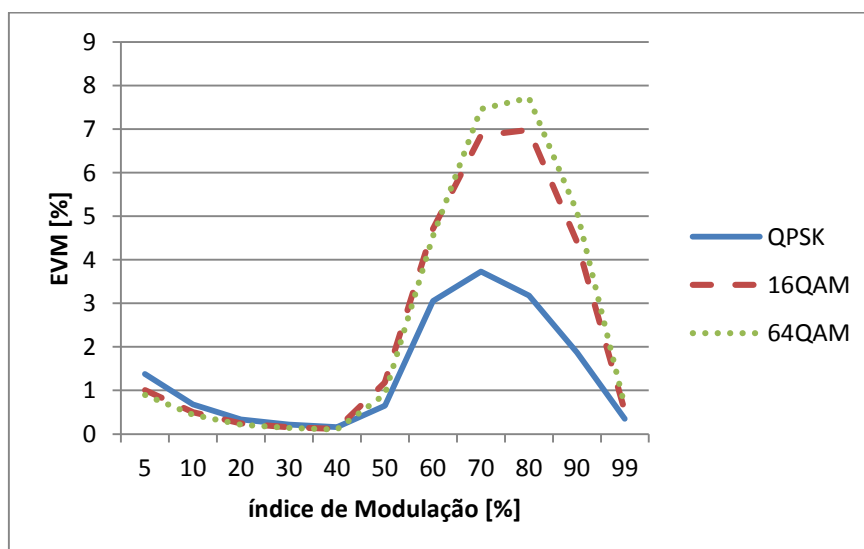


Figura 36: EVM em função do índice de modulação, para QPSK, 16 QAM e 64 QAM

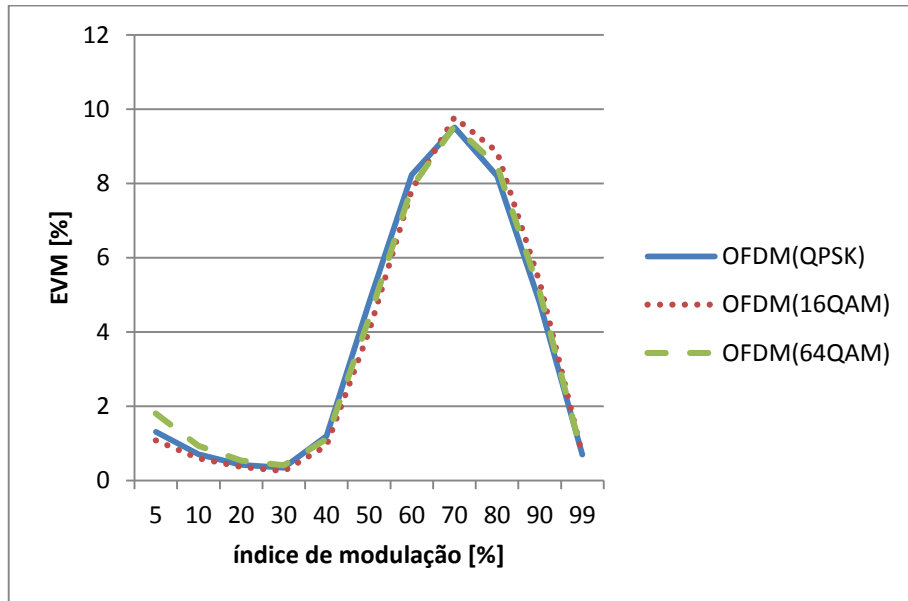


Figura 37: EVM em função do índice de modulação, para OFDM com QPSK, 16 QAM e 64 QAM

Posteriormente analisou-se qual seria o comportamento do EVM quando se varia a potência de entrada. Os resultados desta análise podem ser observados nos gráficos da Figura 38, da Figura 39 e da Figura 40. Segundo estes gráficos pôde-se concluir que o sinal OFDM continua a apresentar valores de EVM superiores aos das outras modulações. Pôde-se ainda concluir que os valores mais baixos de EVM verificam-se quando a potência de entrada toma valores entre -2 e 2 dBm

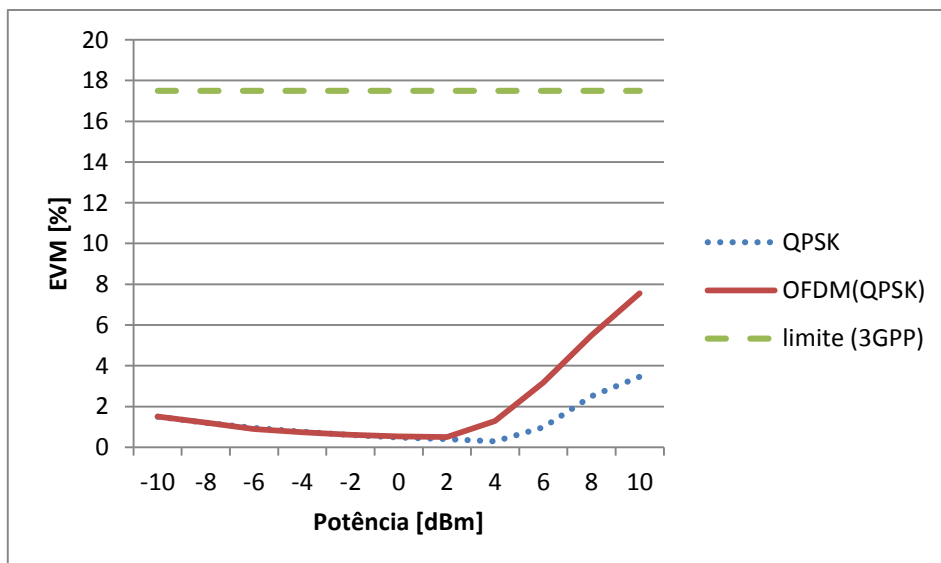


Figura 38: EVM em função da potência de entrada, para QPSK e OFDM com QPSK

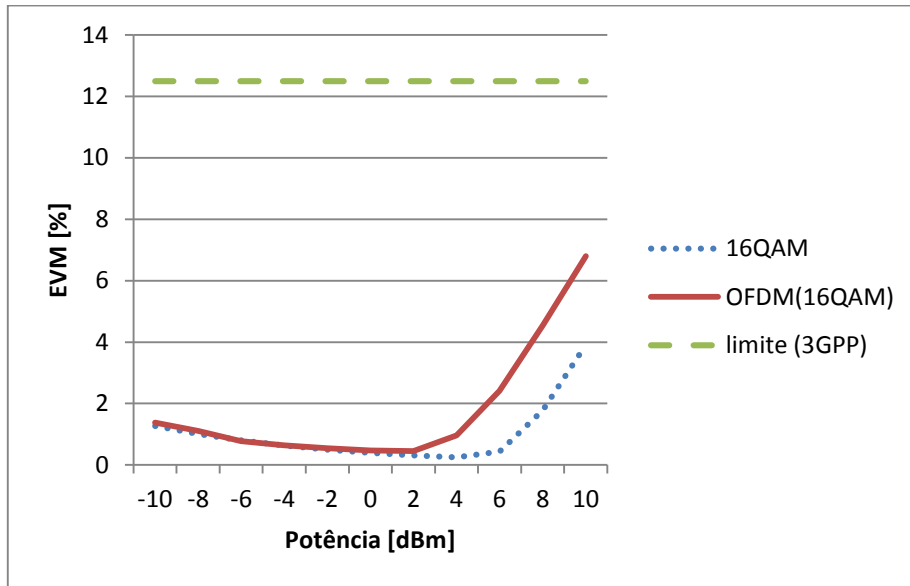


Figura 39: EVM em função da potência de entrada, para 16 QAM e OFDM com 16 QAM

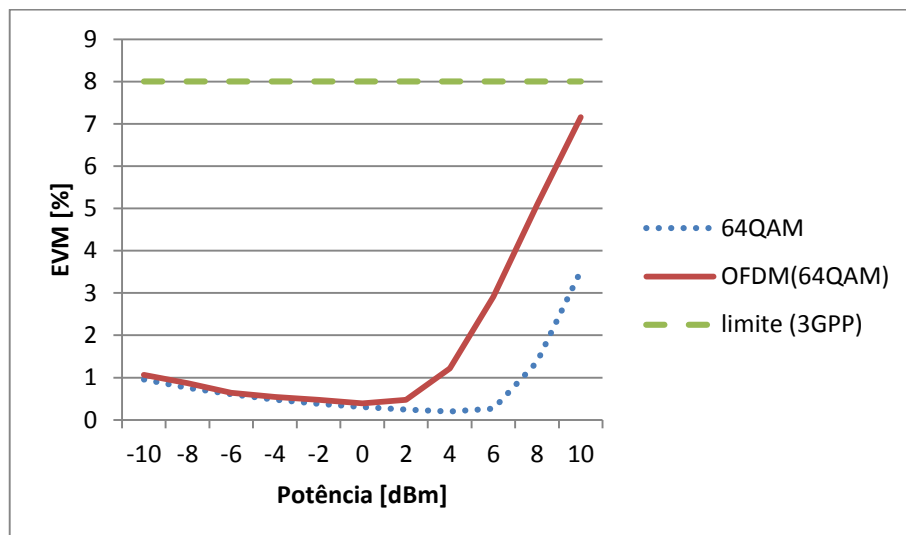


Figura 40: EVM em função da potência de entrada, para 64 QAM e OFDM com 64 QAM

Por último, observou-se qual seria a evolução do EVM em função da distância, para cada uma das modulações. Esse resultado é apresentado na Figura 41, na Figura 42 e na Figura 43. Em todos os casos à medida que se aumentava a distância, o EVM também aumentava.

É ainda de notar que as modulações 64 QAM e OFDM com 64 QAM são aquelas que apresentam maiores valores de EVM, pois é a modulação onde os símbolos se encontram mais próximos uns dos outros, existindo assim uma maior probabilidade de um símbolo ser

interpretado incorrectamente. Ainda assim abaixo do valor de EVM está abaixo do limite imposto pela norma.

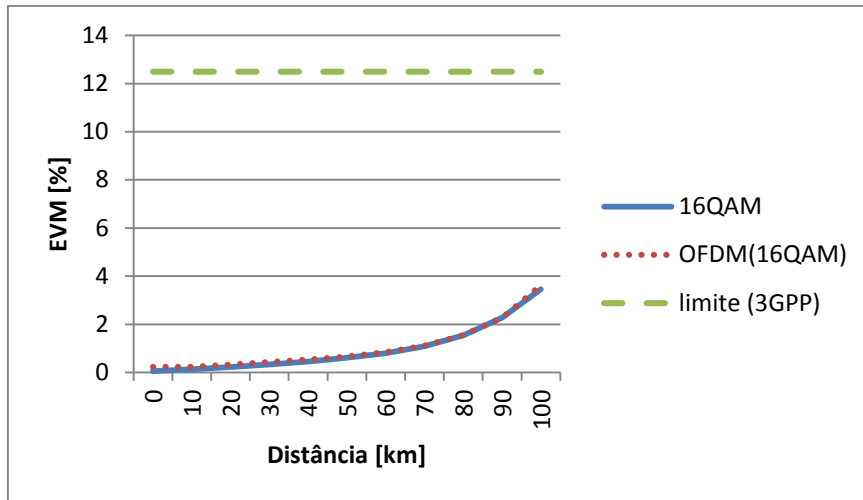


Figura 41: EVM em função da distância, para QPSK e OFDM com QPSK

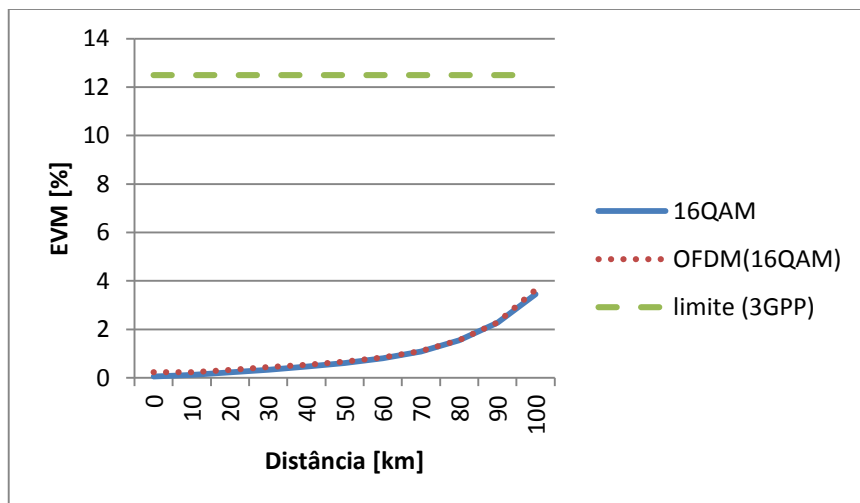


Figura 42: EVM em função da distância, para 16 QAM e OFDM com 16 QAM

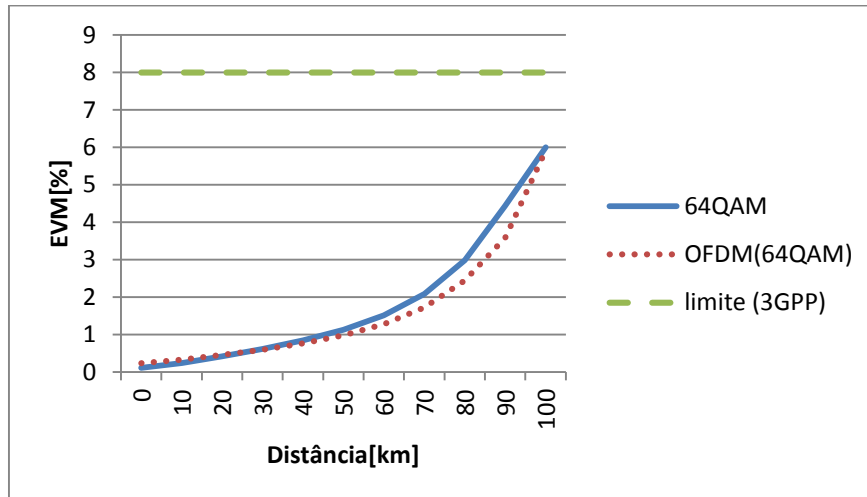


Figura 43: EVM em função da distância, para 64 QAM e OFDM com 64 QAM

Ao comparar a constelação da Figura 44 com a da Figura 45 pode-se entender o fenómeno descrito anteriormente, pois ao aumentar a distância, o símbolo recebido está mais afastado do seu local de referência. Uma das vantagens do LTE é a possibilidade de adaptar a modulação, pois apesar da modulação 64 QAM permitir débitos binários mais elevados, à medida que o móvel se afasta da estação base, se mantiver esta modulação, a probabilidade de ocorrência de erros será maior do que noutra tipo de modulação

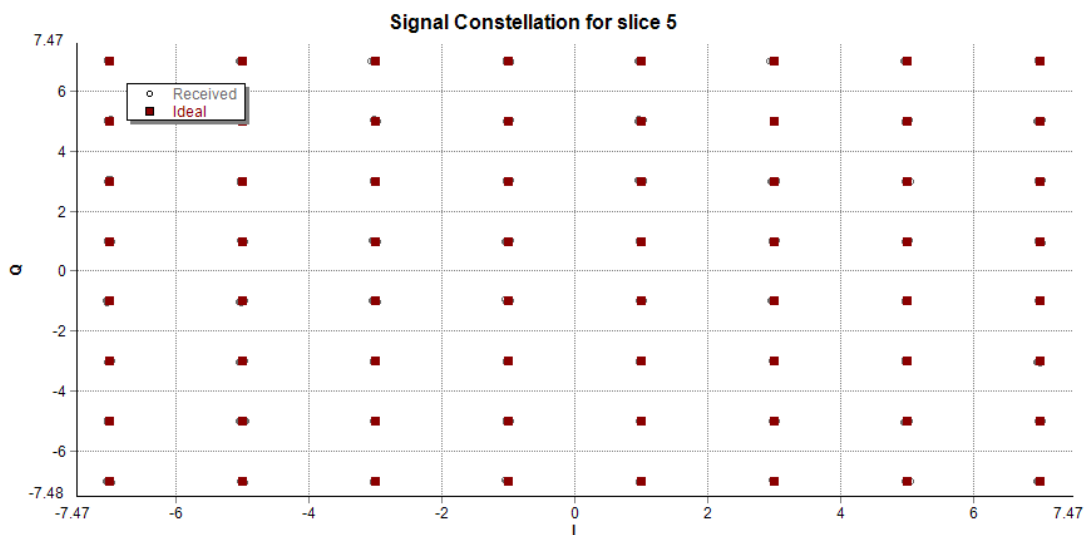


Figura 44: Constelação do sinal OFDM com modulação 64 QAM recebido, para uma distância igual a 30 km

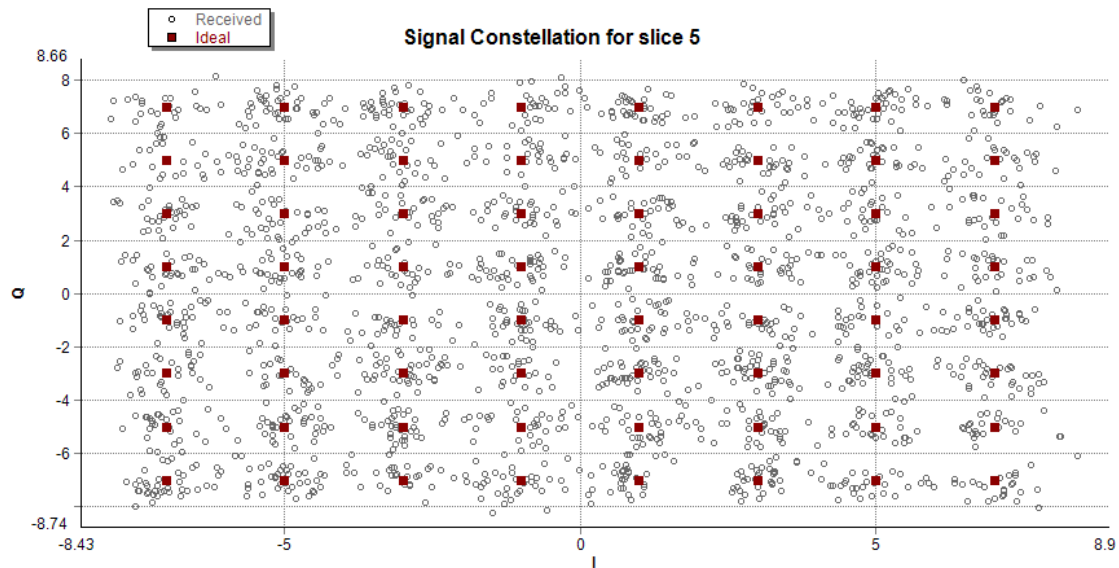


Figura 45: Constelação do sinal OFDM com modulação 64 QAM recebido, para uma distância igual a 100 km

Com este estudo pôde-se concluir que o sinal OFDM, em todas as situações, apresenta um EVM superior. Estes sinais quando chegarem à estação base vão ser radiados pela antena para chegarem ao móvel. Com isto pode dizer-se que apesar do sinal OFDM apresentar piores resultados, na fibra óptica, apresenta mais vantagens quando se trata da ligação rádio, nomeadamente em termos de multipercurso. Assim sendo, como a ligação rádio não pode ser ignorada, considerou-se que, apesar dos resultados, o envio do sinal em OFDM é uma solução mais adequada para estes casos, desde que se considere uma parametrização otimizada na ligação óptica, que liga a estação central à estação base. Segundo os resultados obtidos anteriormente, uma parametrização otimizada seria um índice de modulação entre 20% e 30 % com uma potência de entrada entre -2 e 2 dBm.

4.1.4 Estudo do efeito de sinais com características diferentes (com diferentes moduladores)

O objectivo das simulações, efectuadas neste ponto, consiste em observar quais as diferenças que existe ao enviar dois sinais com características diferentes. Tem também como objectivo observar o comportamento do EVM, referente a esses sinais, quando se altera o modulador óptico.

Os sinais utilizados apresentam características UWB e LTE, ou seja, um sinal OFDM com modulação QPSK, centrado na frequência 3.96 GHz e com débito binário de 200 Mbps e

outro sinal OFDM com modulação 16 QAM e com débito binário de 100 Mbps. O espectro destes sinais é apresentado na Figura 19 e na Figura 24, respectivamente.

Para as primeiras simulações, deste ponto, utilizou-se um sistema RoF composto por um laser CW, um fotodíodo, um modulador AM, uma fibra óptica e um amplificador. Na Tabela 2 é apresentada a parametrização utilizada para estes componentes.

O sistema RoF utilizado é apresentado na Figura 18, onde se pode observar como estão ligados os componentes referidos anteriormente. O amplificador eléctrico presente na CS tem como objectivo fixar um valor de potência de entrada.

No primeiro caso variou-se o índice de modulação e observou-se qual seria o comportamento do EVM, utilizando-se uma potência de entrada igual a 0 dBm.

Na Figura 46 pode observar-se a evolução do parâmetro EVM à medida que se aumenta o valor do índice de modulação. Segundo a Figura 46 concluiu-se que os melhores valores de EVM se obtêm quando o índice de modulação é aproximadamente 20% e 99%. Através desta análise poderia afirmar-se que para estes valores de índice modulação era esperado uma melhor qualidade do sinal. Contudo, quando o índice de modulação é igual a 99% existe uma elevada não linearidade, não sendo assim uma situação ideal [11]. Conclui-se ainda que em nenhuma situação é ultrapassado o valor limite de EVM para o UWB, que segundo a norma ECMA-368 é de 14.1%.

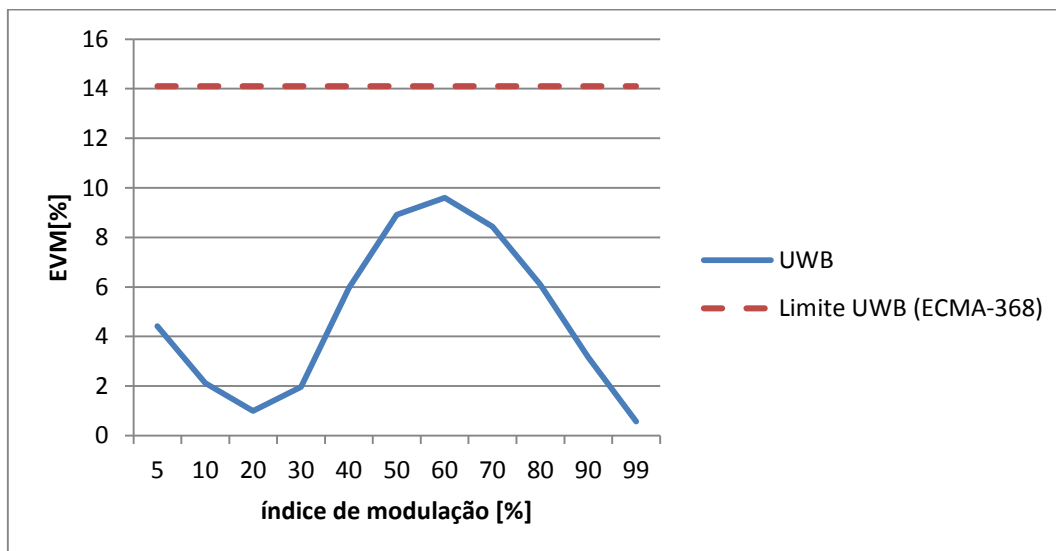


Figura 46: EVM em função do índice de modulação para o sistema RoF inicial

Para verificar se o comportamento do EVM seria igual, simulou-se o mesmo sistema com um sinal com características LTE.

Na Figura 47 observa-se os valores de EVM em função do índice de modulação, para os dois sinais descritos anteriormente. Ao analisar a Figura 47, concluiu-se que os melhores valores de EVM, no caso do LTE, situam-se para valores de índice de modulação entre 15% e 30%, aproximadamente, e para 99%. Pela mesma razão do caso anterior, apenas se considera o primeiro intervalo. Até ao índice de modulação igual a 70% o sinal, com características LTE, apresenta valores de EVM mais baixos do que o sinal com características UWB.

A degradação do sinal recebido também pode ser analisada através da constelação do mesmo. Quanto maior for a mancha em torno do local de referencia do símbolo, pior será a qualidade do sinal recebido.

Nos sinais analisados anteriormente constata-se que para um índice de modulação de 20%, o valor de EVM é baixo. Como tal ir-se-á observar a constelação de cada sinal, para este caso e para a situação onde os sinais apresentam EVM mais alto. Esta análise tem com finalidade de analisar quais as alterações visíveis na constelação quando se altera o índice de modulação.

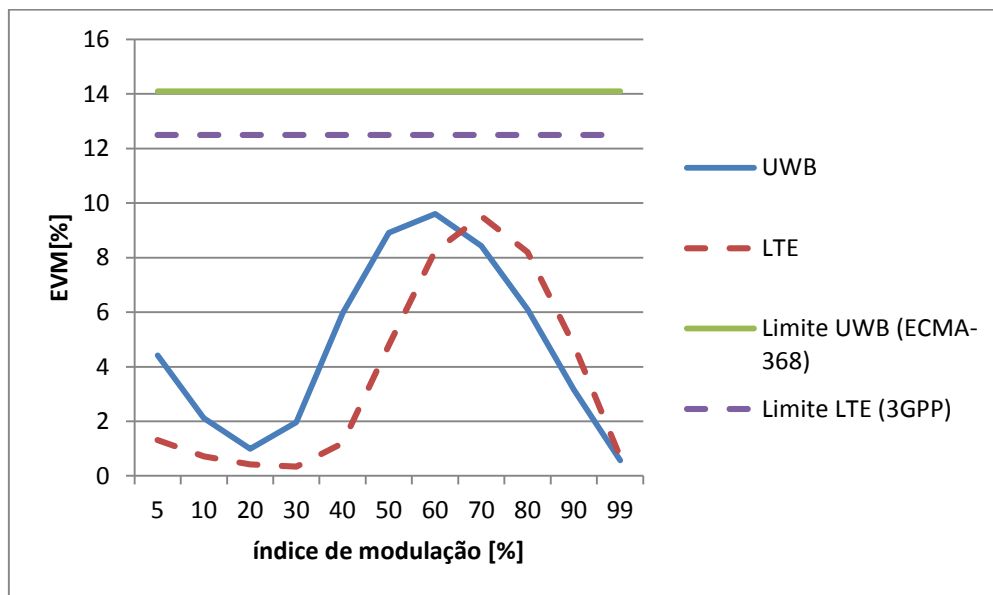


Figura 47: EVM em função do índice de modulação, para LTE e UWB

Na Figura 48 e na Figura 49 observa-se a constelação do sinal com características UWB e a constelação do sinal com características LTE, respectivamente. Ao analisá-las concluiu-se que a mancha em redor do local de referência do símbolo, indicado a vermelho, é maior no sinal UWB do que no sinal LTE. Este efeito reforça a indicação do gráfico da Figura

47, onde se constata que para o índice de modulação igual a 20%, o sinal LTE apresenta um valor de EVM mais baixo do que o sinal UWB.

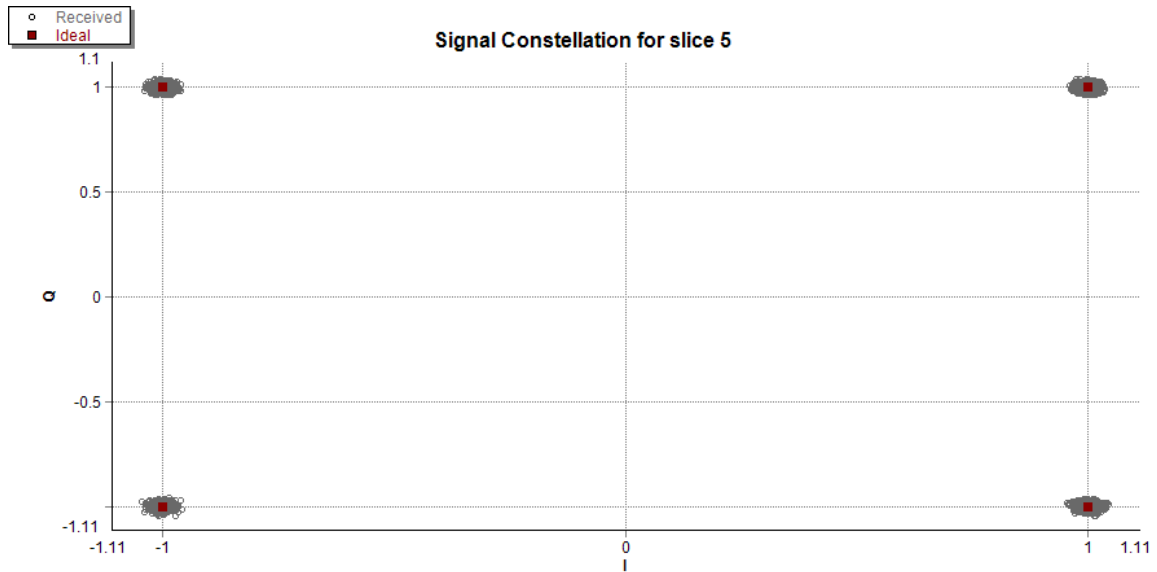


Figura 48: Constelação do sinal UWB para índice de modulação igual 20%

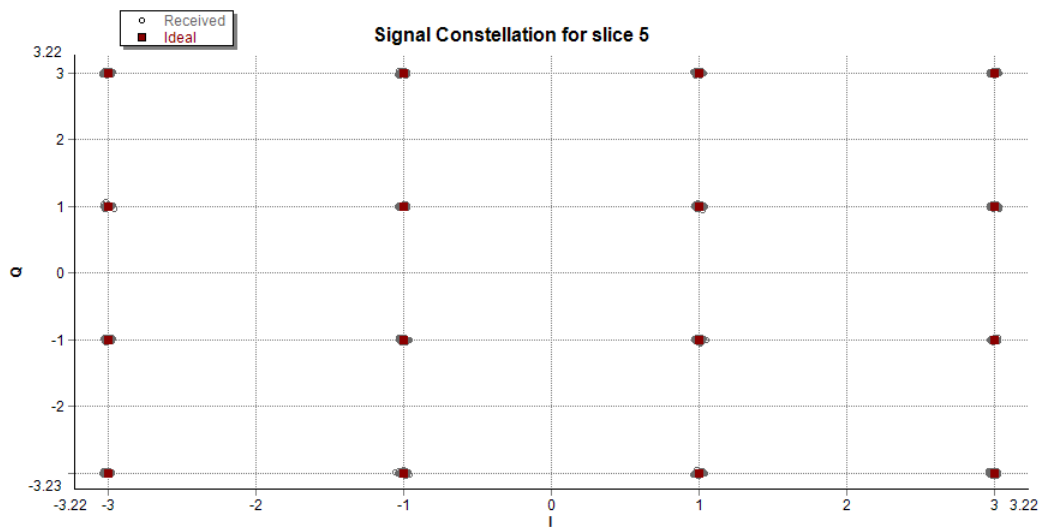


Figura 49: Constelação do sinal LTE para índice de modulação igual 20%

A Figura 50 e a Figura 51 ilustram a situação em que o EVM atinge o máximo. Para o sinal UWB este facto acontece quando o índice de modulação é igual a 60%. Para o sinal LTE acontece quando o índice de modulação é igual a 70%.

Comparando a Figura 48 e a Figura 49 com a Figura 50 e a Figura 51, respectivamente, observa-se que a mancha em torno do local de referência aumentou, tal

como esperado. Indicando assim que houve uma degradação sinal de uma situação para a outra.

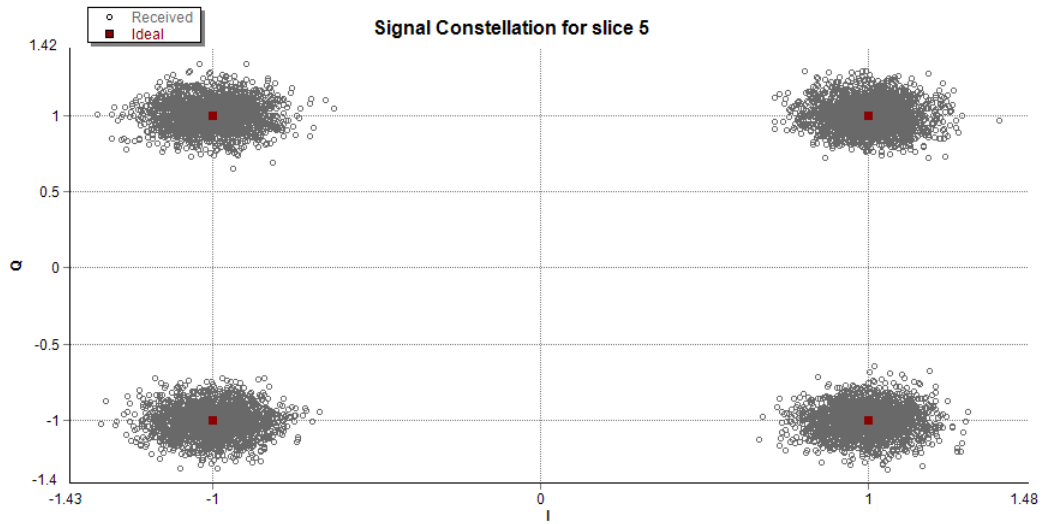


Figura 50: Constelação do sinal UWB para índice de modulação igual 60%

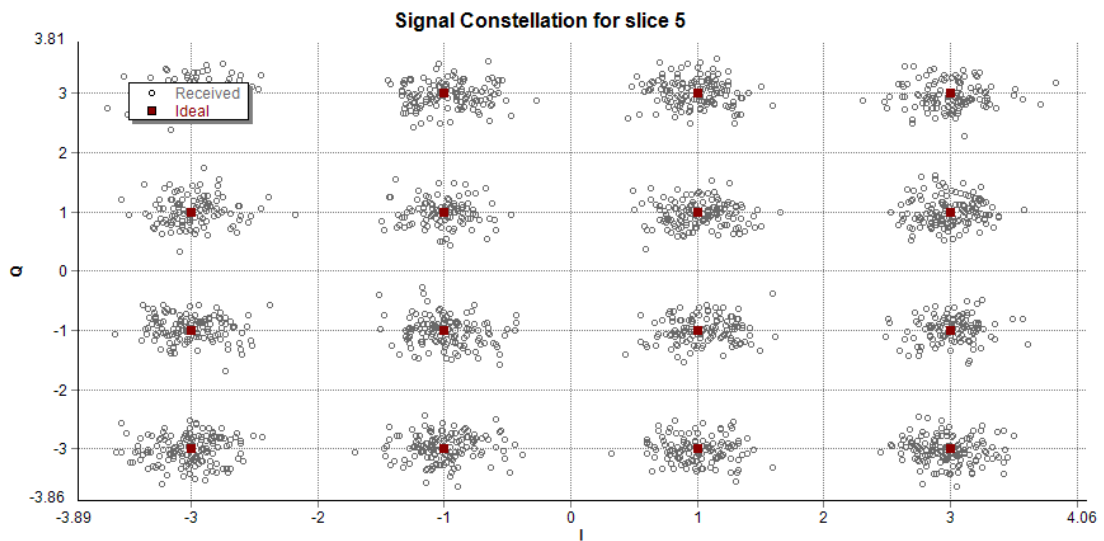


Figura 51: Constelação do sinal LTE para índice de modulação igual 70%

Um parâmetro que também influencia o valor de EVM é a potência do sinal de entrada. Como tal, para otimizar o sistema RoF, é necessário analisar qual o valor de potência do sinal de entrada que apresentará menor EVM. Para ajustar este valor de potência é necessário alterar o valor do ganho do amplificador elétrico, presente na CS.

Nas simulações que se seguem utilizou-se o índice de modulação igual a 20%, visto que foi o valor que apresentou um EVM mais baixo, para ambos os sinais.

Na Figura 52, é apresentado o gráfico corresponde à evolução do EVM em função da potência de entrada, para o sinal com características UWB e para o sinal com características LTE. Deste gráfico conclui-se que, para o sinal UWB, os valores de EVM são mais baixos quando a potência de entrada toma valores entre 0 dBm e 2 dBm. Quanto ao LTE é quando a potência de entrada toma valores entre 0 dBm e 4 dBm.

A distância também influencia o valor de EVM, sendo que o esperado seja que o sinal se degrade à medida que se aumenta a distância.

Segundo a Figura 53, onde é apresentado a evolução do EVM em função da distância, pôde-se concluir que ao aumentar a distância o valor de EVM aumenta, tal como era previsto. O sinal com características UWB apresenta valores de EVM superiores ao do LTE.

As constelações dos sinais recebidos, para o caso do EVM em função da potência de entrada e para o caso do EVM em função da distância, apresentam um “aspecto” semelhante em relação ao caso. Quer isto dizer que para valores de potência de entrada e de distância que apresentem valores baixo de EVM, existe uma mancha muito pequena e muito próxima do local de referência do símbolo. Para valores altos de EVM, a mancha em torno do local de referência do símbolo aumenta. Esta mancha indica o local onde o símbolo poderá aparecer.

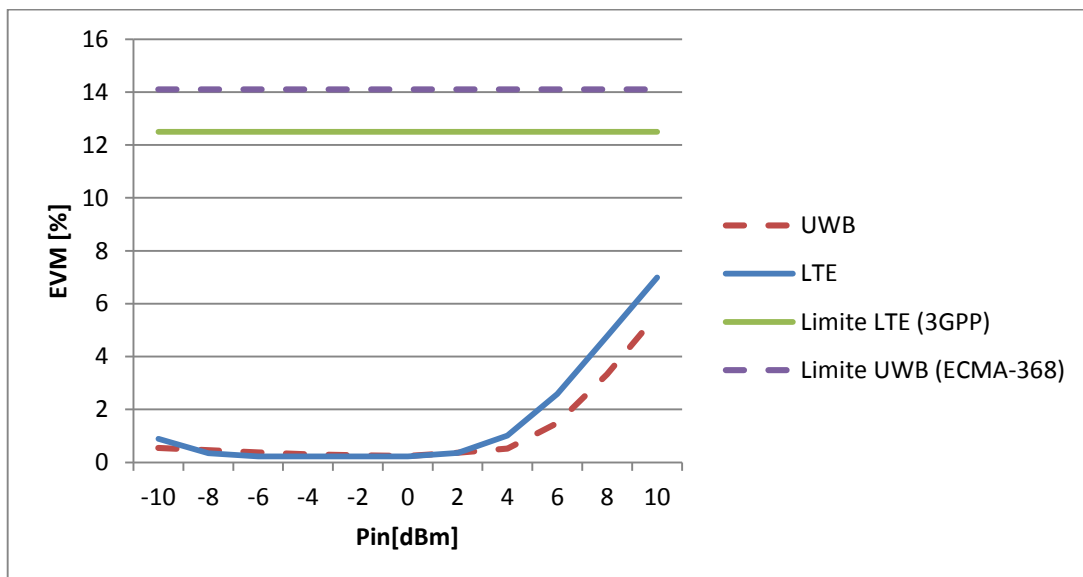


Figura 52: EVM em função da Pin, para LTE e UWB

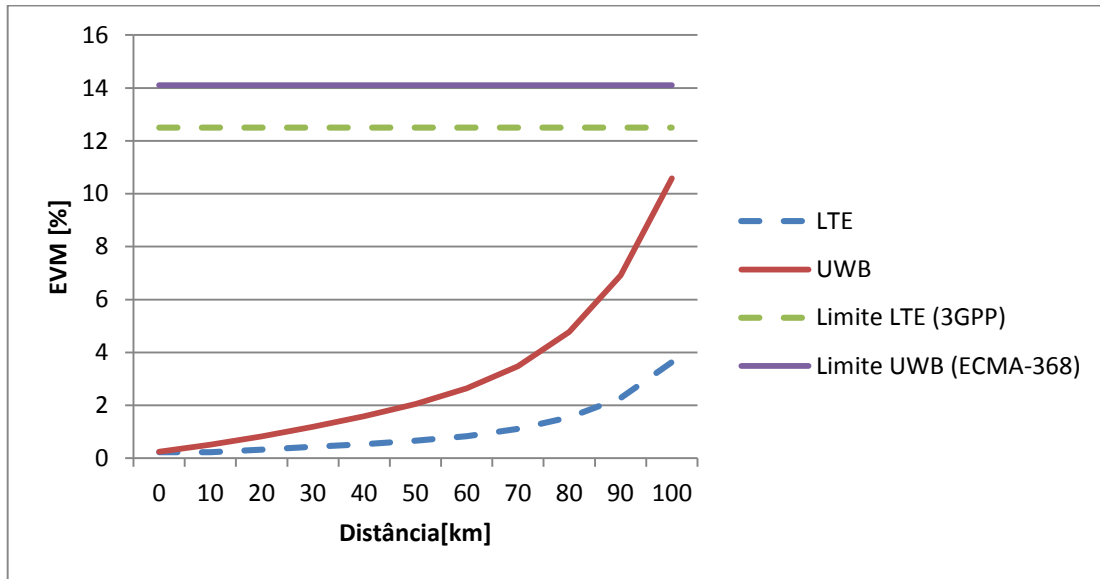


Figura 53: EVM em função da distância, para LTE e UWB

Para além do modulador AM analisou-se o comportamento do EVM quando se colocava um modulador EA. Estes dois moduladores permitem alterar o índice de modulação, um dos factores em análise.

Na Figura 54 é apresentado um outro sistema RoF, onde a única diferença a apontar é o modulador utilizado. Os outros componentes cumprem os mesmos objectivos do sistema anterior e têm a mesma parametrização.

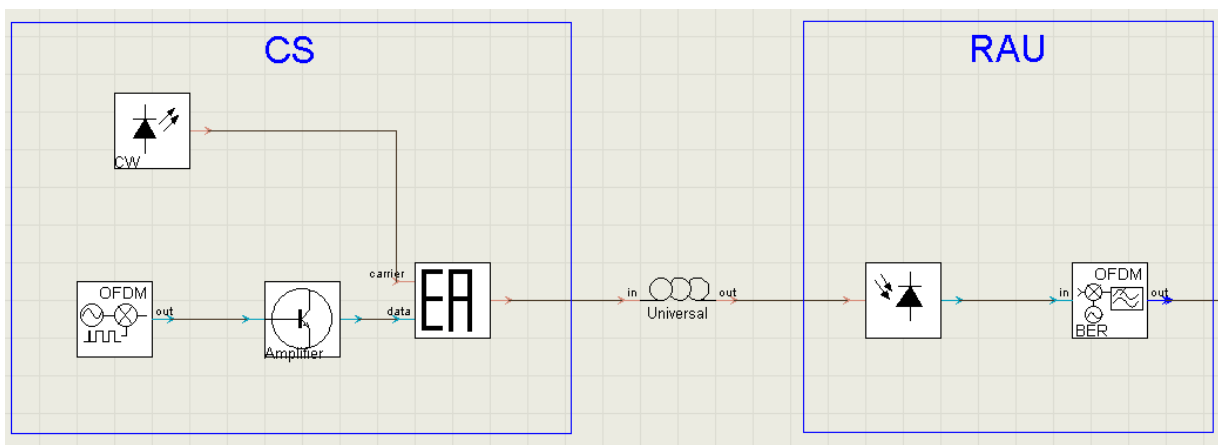


Figura 54: Sistema RoF utilizado, com modulador EA

Ao analisar os gráficos da Figura 55, da Figura 56 e da Figura 57 pôde-se concluir que o EVM tem um comportamento semelhante ao caso anterior. O EVM apresenta valores mais baixos quando o índice de modulação toma valores entre 20% e 30%, quando a potência de

entrada apresenta valores entre -2 e 2 dBm. Segundo estas figuras, pôde-se ainda concluir que à medida que se aumenta a distância, o valor de EVM aumenta. Por último, concluiu-se que o sinal com características UWB apresenta valores de EVM superiores aos do sinal com características LTE, pois possui um débito binário mais elevado.

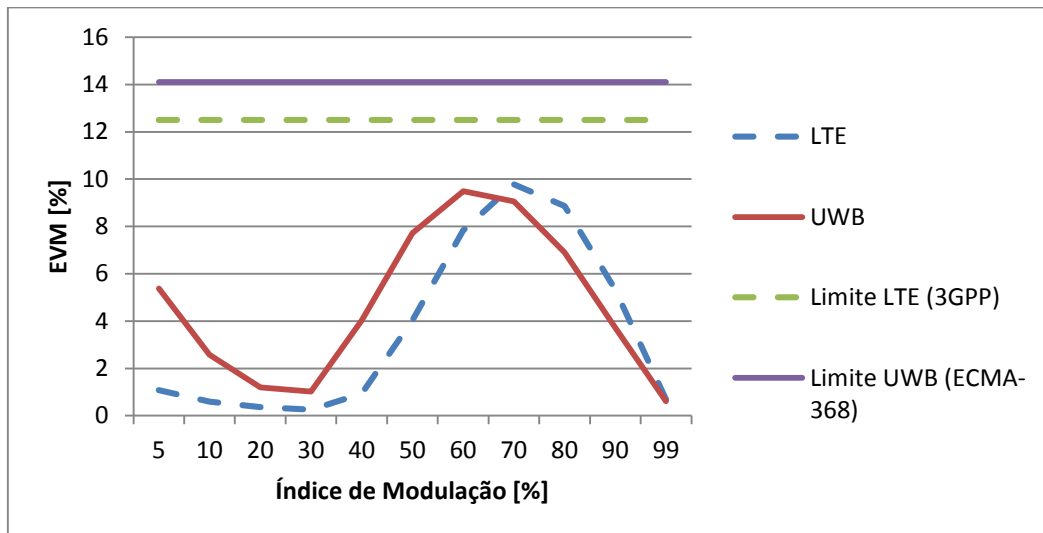


Figura 55: EVM em função do índice de modulação, com modulador EA

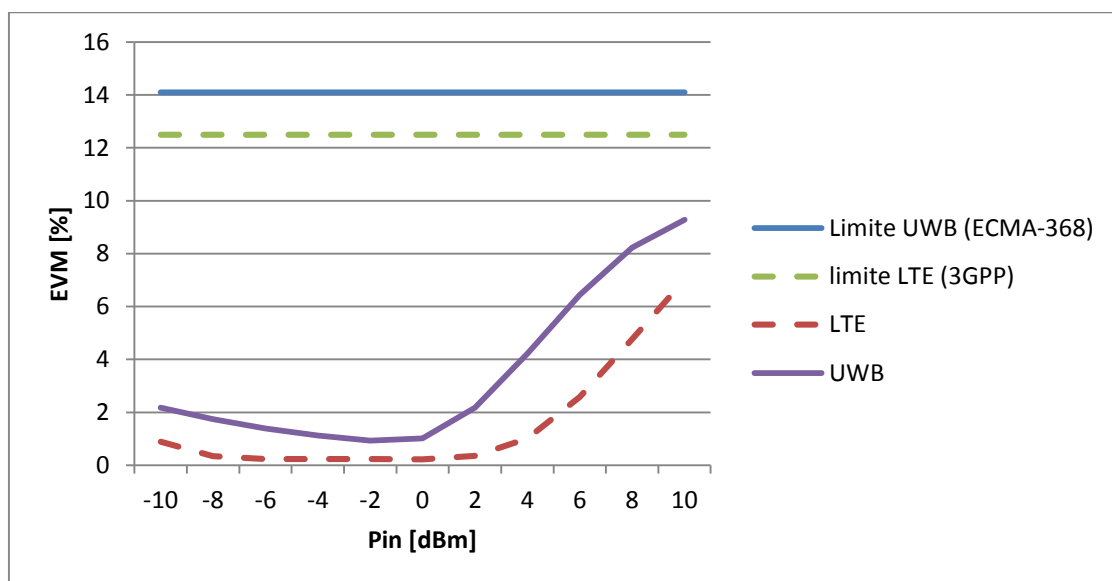


Figura 56: EVM em função da Potência de Entrada, com modulador EA

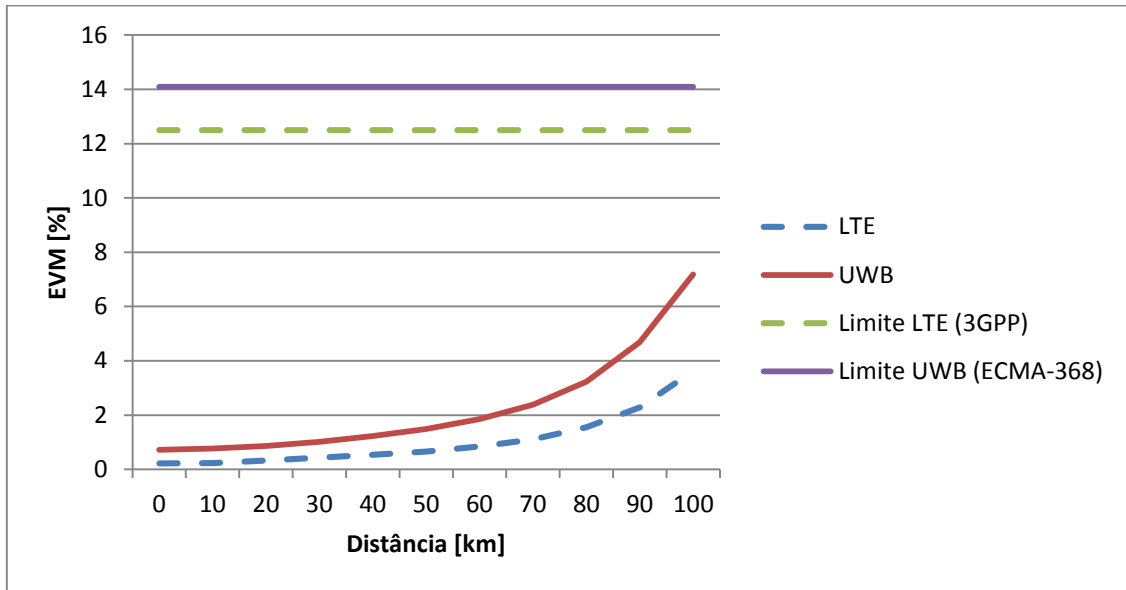


Figura 57: EVM em função da Distância, com modulador EA

Segundo estas últimas simulações os resultados do modulador EA são muito próximos dos resultados do modulador AM. Sabendo que o modulador AM simula um modulador ideal, pôde concluir-se que o modulador EA é uma boa opção para o sistema RoF.

Analisou-se, de seguida, qual seria o comportamento do EVM caso se utilizasse um modulador MZ. Este sistema é apresentado na Figura 58.

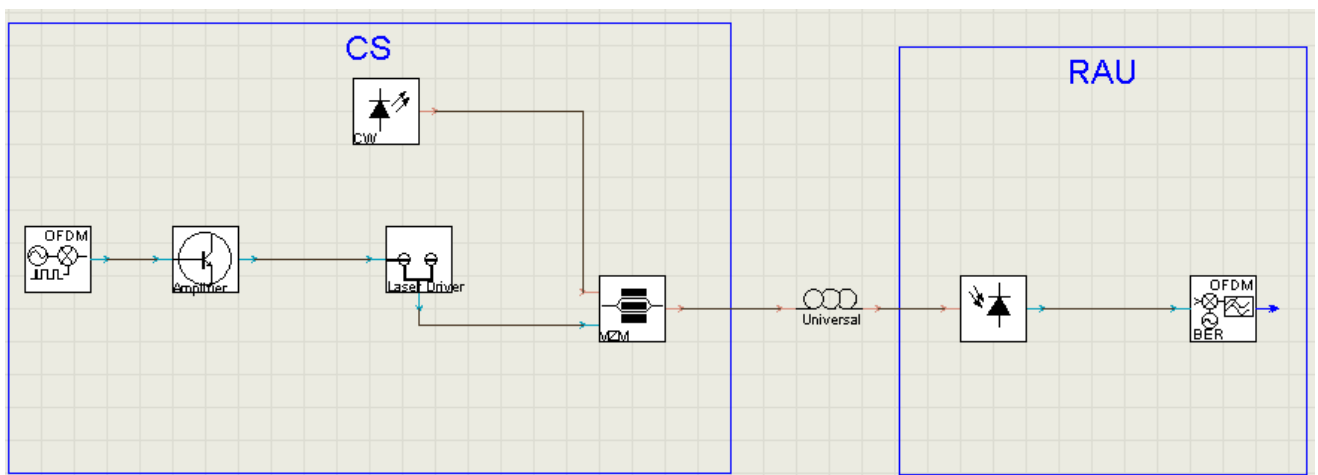


Figura 58: Sistema RoF, com modulador MZ

Analisando o gráfico da Figura 59 concluiu-se que um sinal UWB apresenta um EVM maior do que um sinal LTE, por causa do débito binário que um sinal UWB apresenta, como

já foi referido anteriormente. Neste caso à medida que se aumenta a potência de entrada, o EVM vai diminuindo.

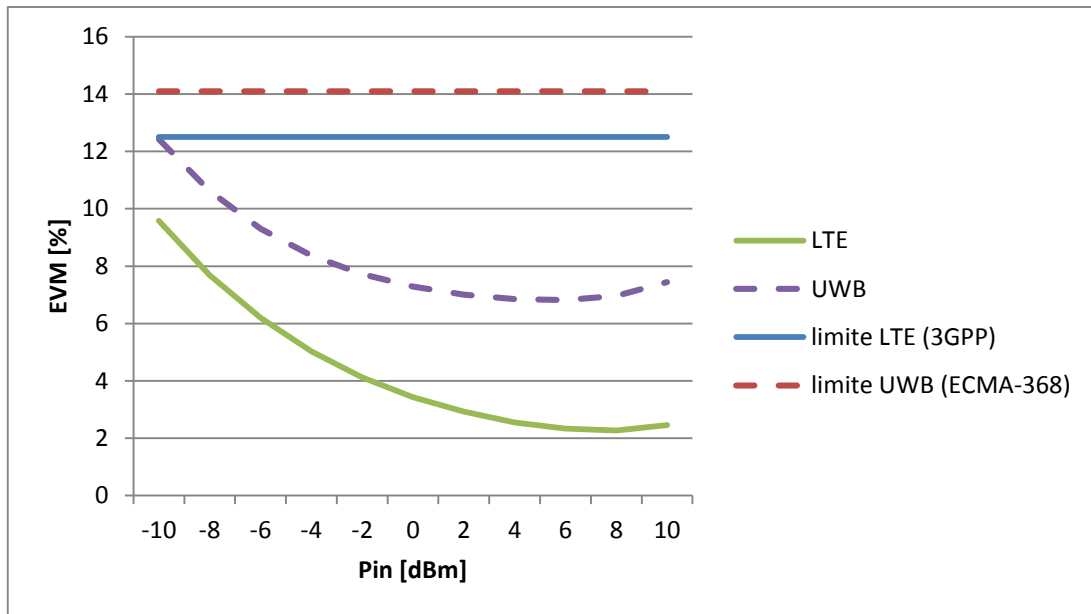


Figura 59: EVM em função da potência de entrada, com modulador MZM

Para se obter o gráfico apresentado na Figura 60 utilizou-se uma potência de entrada de 0 dBm, por se considerar um valor aceitável e que não apresentou um EVM muito elevado na situação anterior. Através da análise efectuada à Figura 60, concluiu-se que à medida que se aumenta a distância, o EVM também aumenta, como já tinha acontecido nos casos estudados anteriormente. Neste caso, este sistema com o modulador MZ não pode ser utilizado para o envio do sinal UWB para distâncias superiores a 40 km e não pode ser utilizado para o envio do sinal LTE para distâncias superiores a 60 km.

Ao utilizar um sistema RoF somente com um modulador MZ não é possível estudar qual o efeito do índice de modulação no sistema.

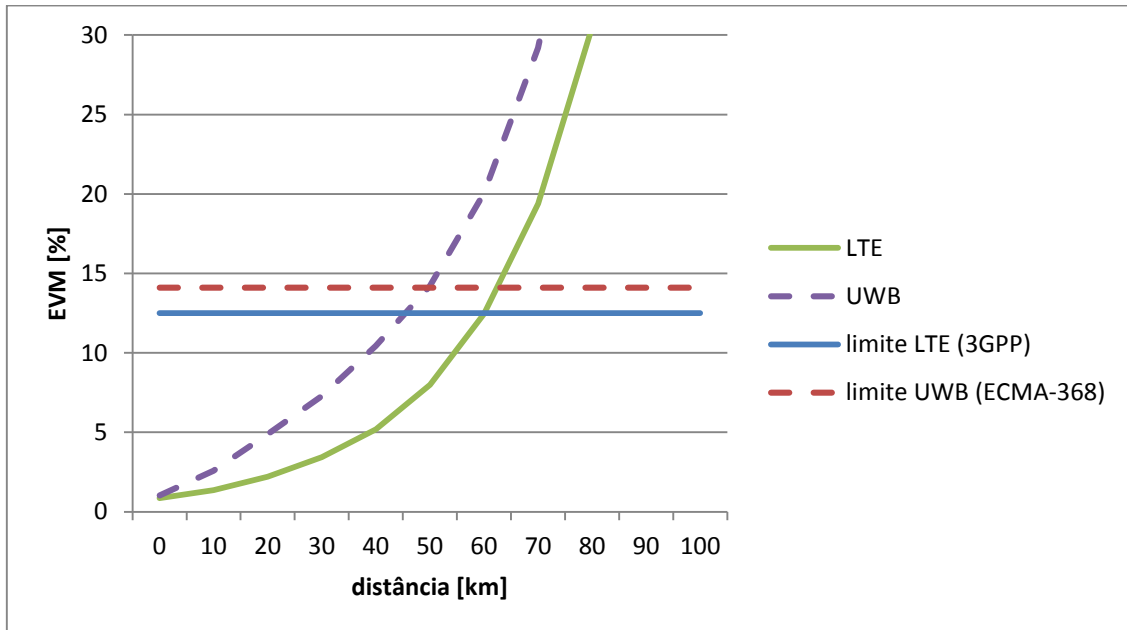


Figura 60: EVM em função da distância, com modulador MZM

Efectuou-se ainda os mesmos testes para o envio de um sinal com características WiMAX, ou seja, centrado na frequência 3.5 GHz e com um débito binário de 50 Mbps. Os resultados obtidos, para este caso, foram muito semelhantes aos dos casos anteriores. Pelo que se assumiu que os valores de potência de entrada, de índice de modulação e de distância encontrados eram também válidos para este caso.

Os sinais escolhidos para estes primeiros testes irão ser enviados, em simultâneo, no próximo sistema RoF simulado. As características destes e outros sinais estão descritas no Anexo A, tal como a descrição do OFDM. O principal objectivo destes primeiros testes era poder observar qual o comportamento de cada um dos sinais, quando enviado em separado, para se poder encontrar quais os valores de potência de entrada e de índice de modulação, que menos afectariam a qualidade do sinal recebido. E utilizar esses valores nas próximas simulações.

4.2 Sistema RoF para *Triple-Play*

No caso do *Triple-Play*, analisou-se qual seria o desempenho de um modulador EA e de um modulador MZ para esta situação.

No primeiro sistema RoF para *Triple-Play* estudado, utilizou-se um modulador EA, três amplificadores eléctricos, um laser, uma fibra óptica e um fotodíodo. Este sistema é

apresentado na Figura 61. A parametrização utilizada neste sistema é igual à indicada na Tabela 2.

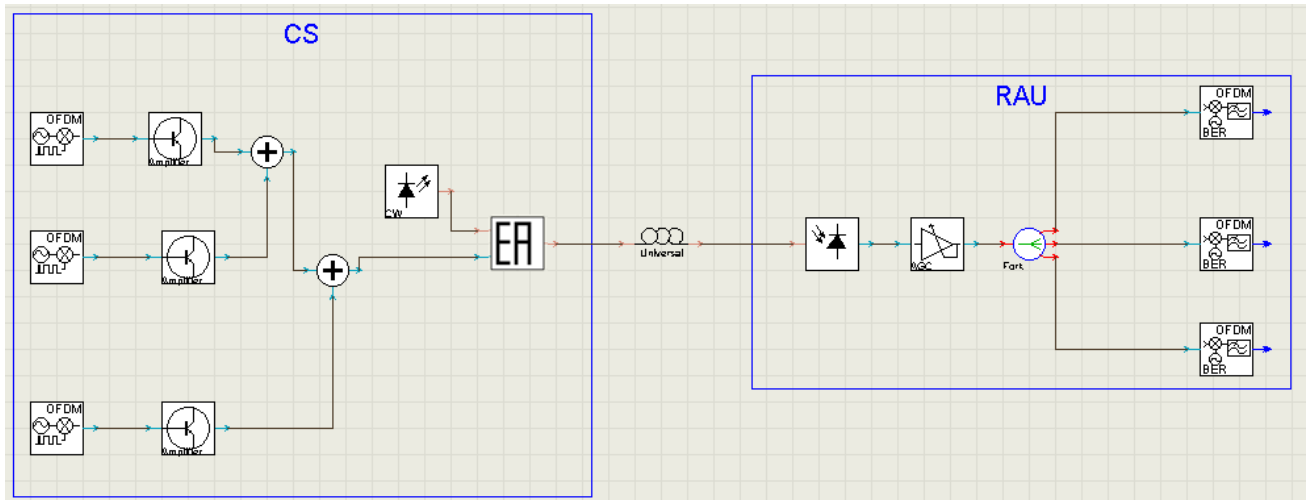


Figura 61: Sistema RoF para Triple-Play, com modificador EA

Cada bloco OFDM presente na CS representa um sinal do *Triple Play*. Neste sistema foram enviados dois sinais com as características dos sinais das simulações anteriores. E ainda mais um sinal OFDM, com modulação 16 QAM, centrado na frequência 3.5 GHz e com um débito binário de 50 Mbps. Para serem enviados todos juntos é necessário que estes sinais sejam multiplexados, obtendo-se assim o espectro apresentado na Figura 62. Este sistema utiliza a SCM para transmitir os sinais.

Para analisar este sistema RoF para *Triple Play* observou-se o comportamento do EVM quando se variava o índice de modulação, a potência de entrada e a distância. Os resultados das simulações, para estas situações, estão presentes nos gráficos da Figura 63, da Figura 64 e da Figura 65.

No gráfico da Figura 63 pode observar-se que o sinal UWB é o que apresenta o EVM mais alto e o sinal WiMAX é o que apresenta o EVM mais baixo. Pode ainda observar-se que em todos os sinais em estudo, o valor mais baixo de EVM é obtido quando o índice de modulação se encontra entre 20% e 30%. A potência de entrada utilizada para se obter este gráfico foi de 0 dBm.

Na Figura 64 pode visualizar-se o gráfico referente à evolução do EVM em função da potência de entrada. Para se obter este gráfico utilizou-se um índice de modulação igual a 30%. Segundo este gráfico todos os sinais apresentam um EVM mais baixo quando a potência de entrada toma valores entre -4 e -2 dBm.

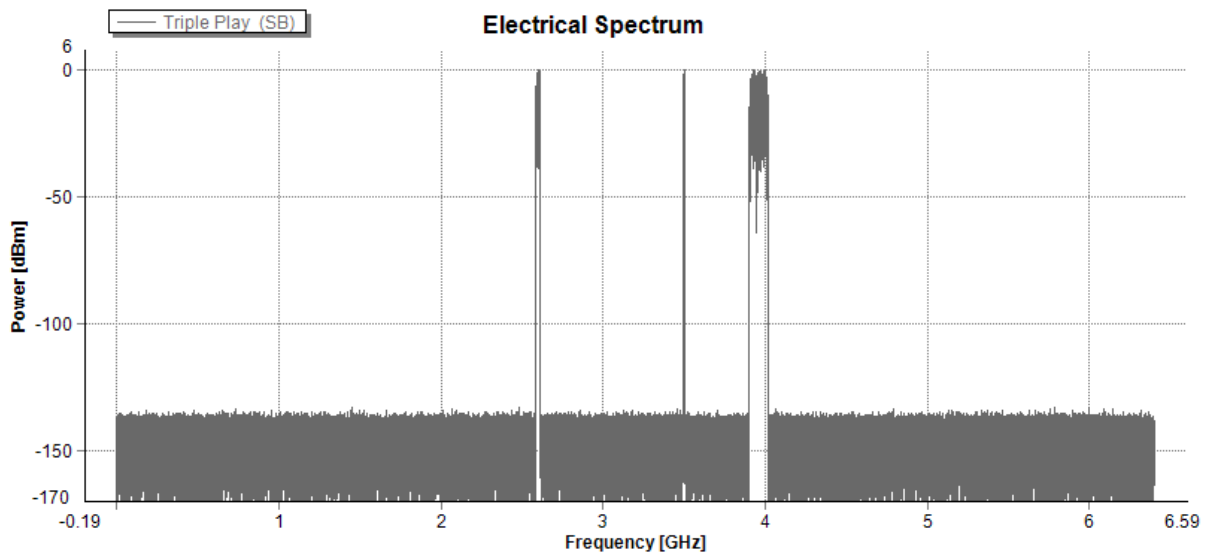


Figura 62: Espectro do Triple Play

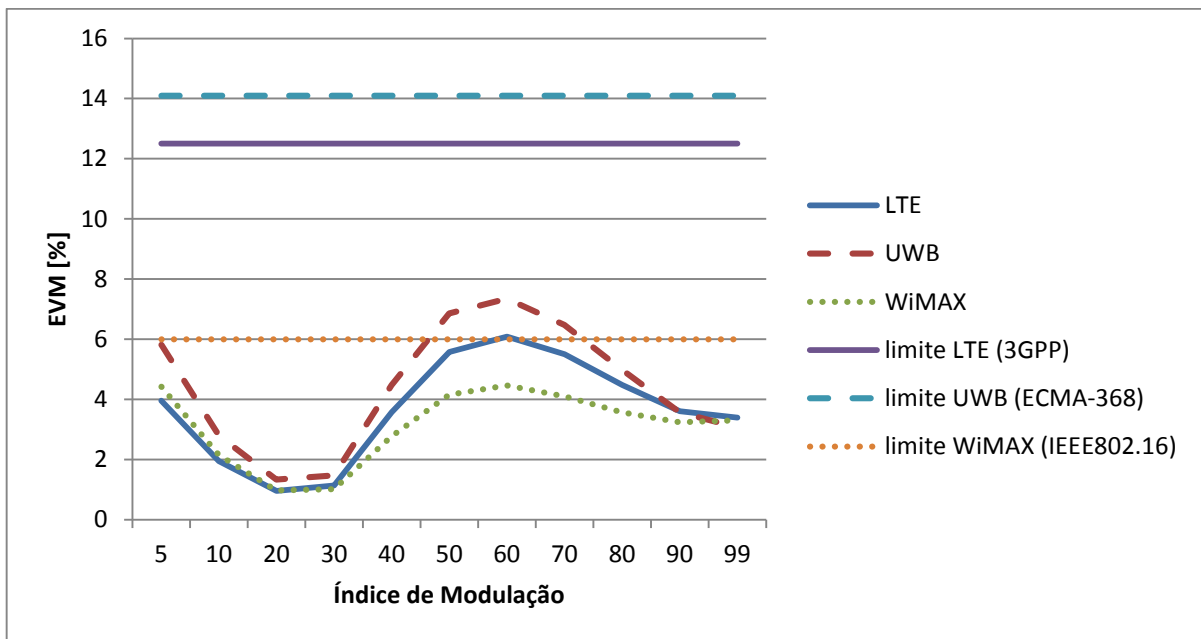


Figura 63: EVM em função do índice de modulação, em Triple Play com modulador EA

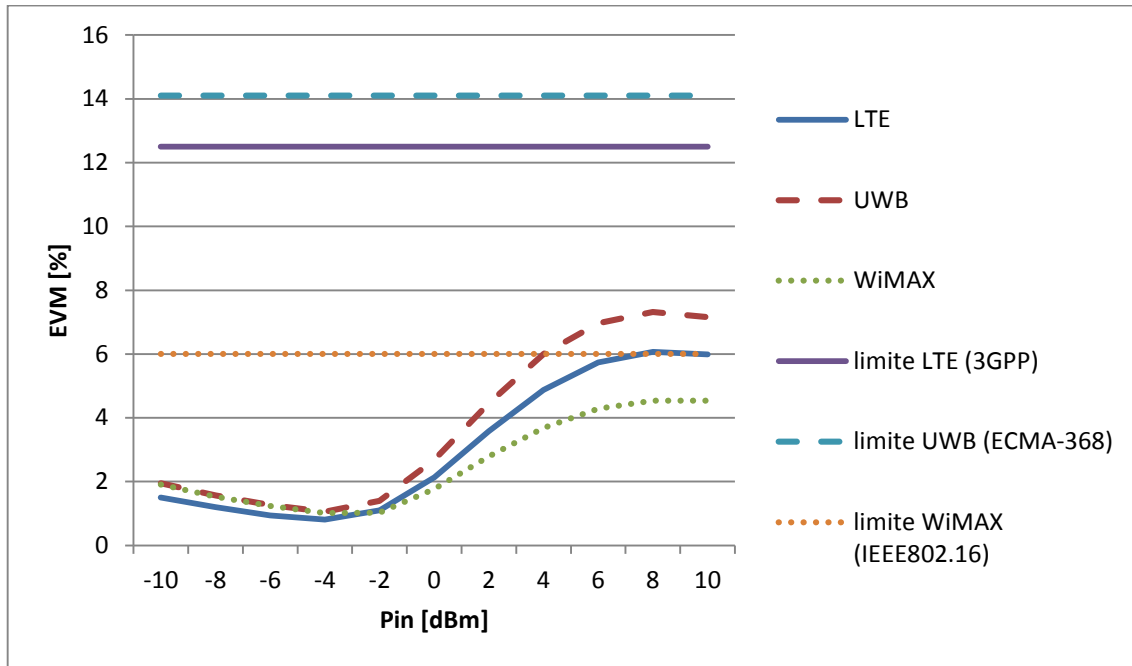


Figura 64: EVM em função da Potência de Entrada, em Triple Play com modulador EA

O gráfico da Figura 65 corresponde à evolução do EVM em função da distância. Para obter este gráfico utilizou-se uma potência de entrada igual a -2dBm e com um índice de modulação igual a 30%. Ao analisar este gráfico concluiu-se que este sistema não é indicado para distâncias superiores a 90 km, pois o limite definido para o WiMAX é ultrapassado pelo sinal WiMAX nessa distância. Ficando assim o sistema limitado a essa distância.

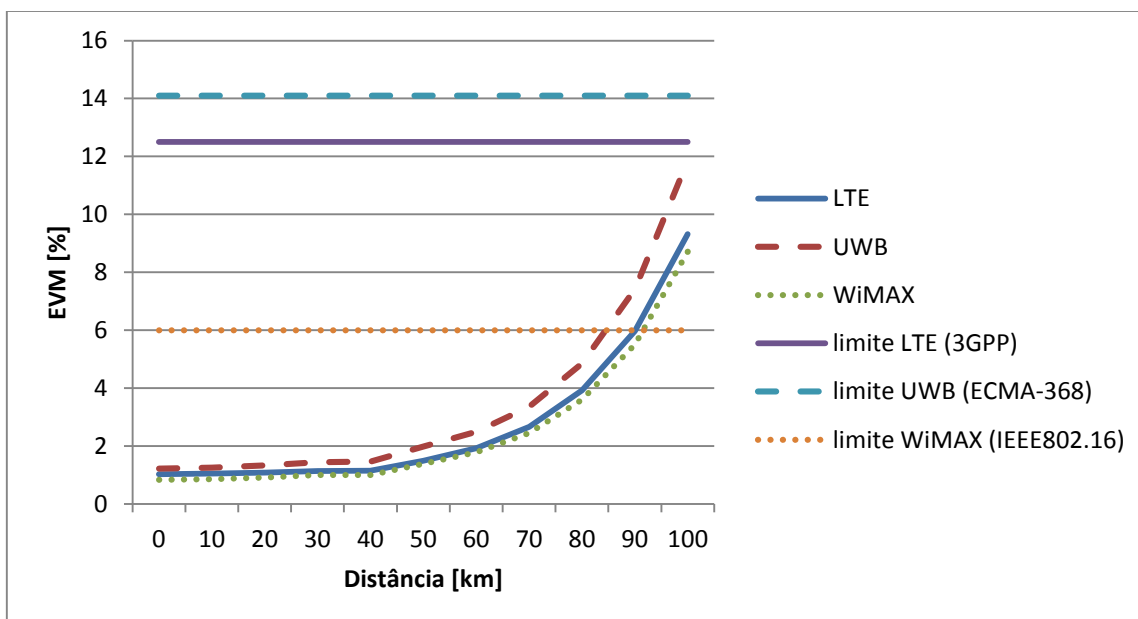


Figura 65: EVM em função da distância, em Triple Play com modulador EA

Os testes anteriores também foram realizados para o modulador AM. Os resultados obtidos com o modulador AM são muito próximos aos obtidos com o modulador EA.

Por último, realizou-se um sistema *Triple Play* com um modulador MZ e observou-se qual seria o comportamento do EVM quando se variava a potência de entrada e a distância. O sistema utilizado para este estudo é apresentado na Figura 66.

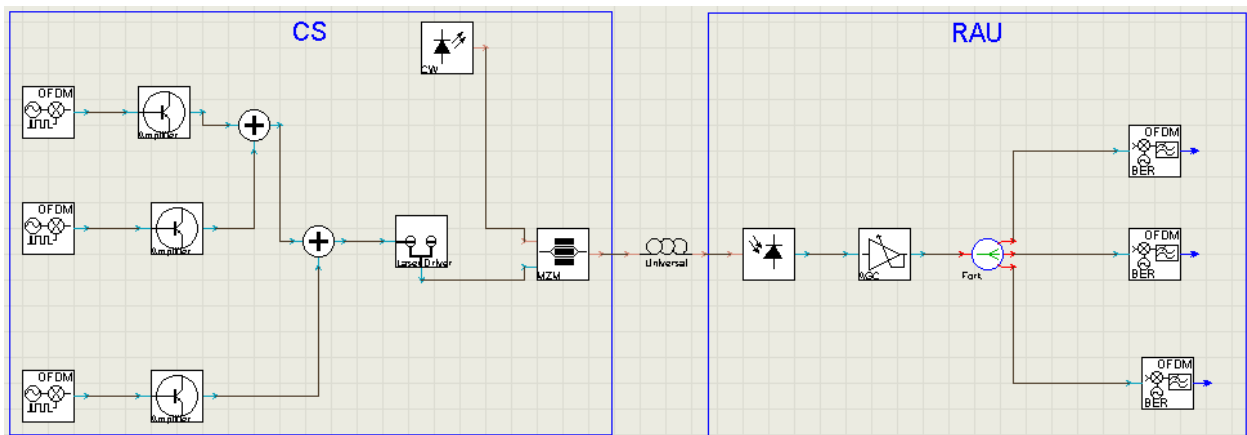


Figura 66: Sistema RoF para Triple-Play, com modulador MZ

Na Figura 67 é apresentado o gráfico da evolução do EVM em função da potência de entrada. Neste gráfico pode observar-se que para potências inferiores a -4 dBm, o limite imposto pela norma do WiMAX é ultrapassado pelo sinal WiMAX, concluindo-se assim que este sistema não é indicado para essas potências. Concluiu-se ainda o EVM é mais baixo quando a potência de entrada toma valores entre 0 e 6 dBm.

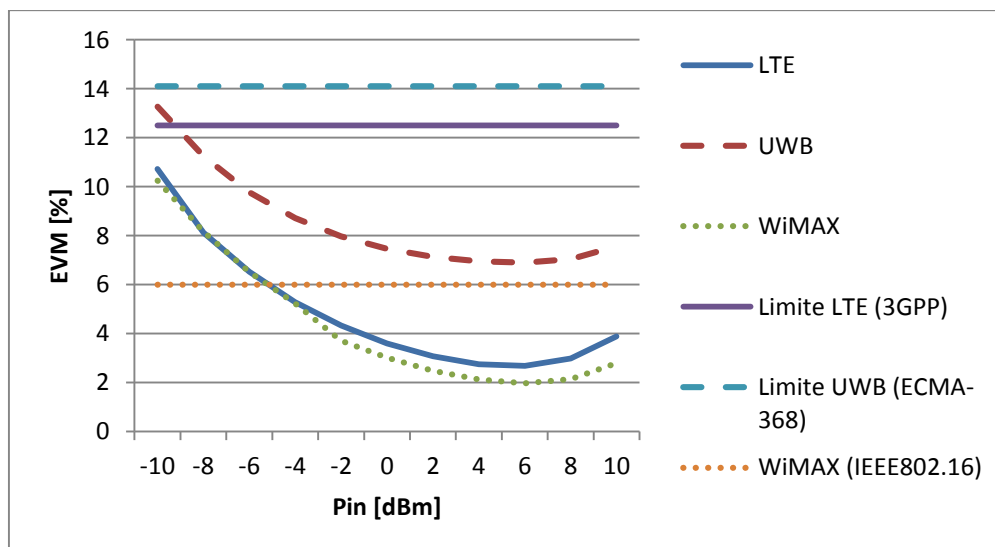


Figura 67: EVM em função da Potência de Entrada, em Triple Play com modulador MZ

No gráfico da Figura 68 pode observar-se que à medida que a distância aumenta, o EVM também aumenta. Pode ainda observar-se que os diferentes limites impostos pelas normas são ultrapassados em distâncias diferentes, ou seja, o limite do WiMAX é ultrapassado numa distância de 40 km, o do LTE quando a distância é igual a 60 km e o do UWB quando a distância é igual a 50 km, aproximadamente. Assim sendo, concluiu-se que este sistema para além de estar limitado pela potência de entrada, está também limitado a distâncias inferiores a 40 km.

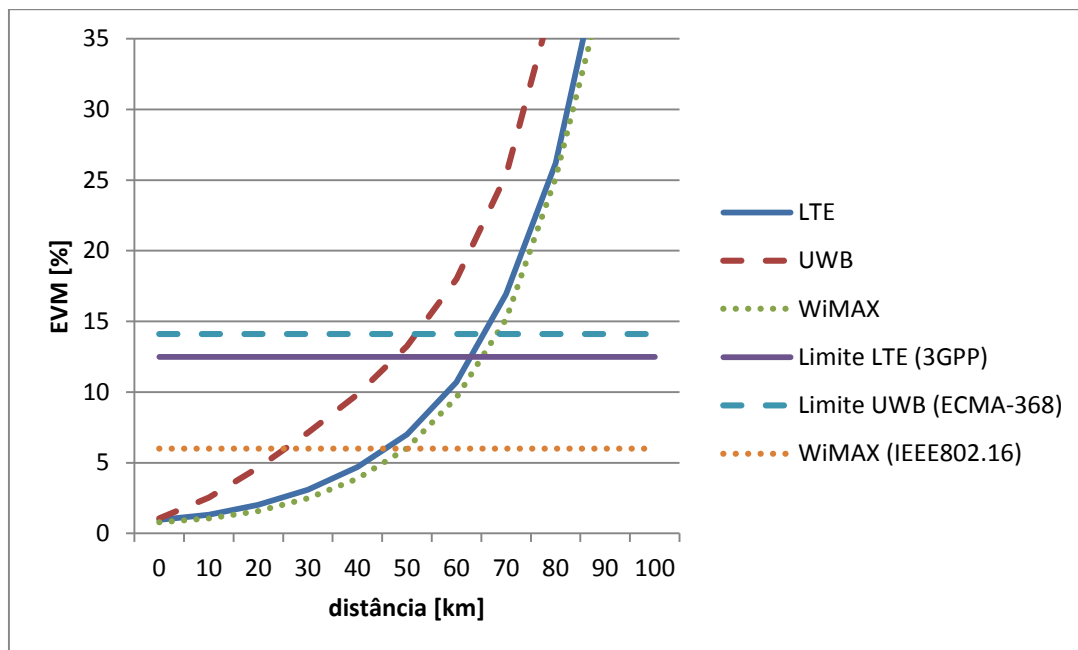


Figura 68: EVM em função da distância, em Triple Play com modulador MZ

Segundo estas últimas simulações pôde concluir-se que, em princípio, o sistema RoF com um modulador EA é o mais indicado para o envio de três sinais, pois não apresentou grandes limitações como o sistema com o modulador MZ. Esta última afirmação foi efectuada tendo em atenção que este estudo foi efectuada para sinais como o LTE, o WiMAX e o UWB.

Segundo estes últimos testes concluiu-se que para o envio de três sinais em simultâneo, o modulador EA é o mais indicado.

É necessário de ter o cuidado de não se utilizar potências muito elevadas, por causa dos efeitos não lineares da fibra.

As limitações relacionadas com a distância, apontadas em diversas situações, não são problemáticas, uma vez que este tipo de sistema não é utilizado em grandes distâncias. Este tipo de sistema está preparado para realizar cobertura para pico e micro células, pelo que não

se exige umas distâncias de ligação por fibra óptica muito elevadas. Realizou-se um estudo para distâncias tão elevadas para se poder analisar o comportamento deste sistema nessas situações.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalho Futuro

Neste capítulo apresenta-se uma conclusão sobre todos os casos estudados e apresenta-se algumas sugestões para trabalho futuro.

5.1 Conclusão

O sistema RoF permite o envio de sinais rádio através da fibra óptica. Com este sistema é possível simplificar as estações base, pois como o sinal enviado já está em RF não é necessário existir nova conversão de frequências neste local. Com este sistema as estações base só necessitam de ter um conversor eléctrico-óptico, e vice-versa, e uma antena. A parte complexa estará numa estação central, à qual estão ligadas várias estações base. Este sistema é uma solução de baixo custo, que combina as vantagens das comunicações ópticas com as vantagens das comunicações sem fios.

O objectivo fulcral desta dissertação era analisar qual a qualidade do sinal rádio e/ou vídeo recebido num sistema RoF. Para cumprir este objectivo realizaram-se dois tipos de simulações. Nas primeiras simulações apenas se enviou um sinal. Nas posteriores simulou-se um sistema RoF para *Triple Play*, onde são enviados três sinais em simultâneo. Cada sinal representa uma tecnologia diferente, como por exemplo o LTE, para o serviço de telefone móvel, o WiMAX, para o serviço de *Internet* e o UWB, para disponibilizar a HDTV.

Para analisar a qualidade do sinal recebido variou-se alguns parâmetros que a poderiam influenciar, nomeadamente o índice de modulação, a potência de entrada e a distância.

Em primeiro lugar analisou-se qual seria o efeito que índice de modulação tinha sobre o sinal óptico a ser enviado. Onde se concluiu que à medida que se aumenta este parâmetro, a potência do sinal óptico também aumenta.

Realizou-se depois uma comparação entre os resultados da modulação externa com os resultados da modulação directa. Desta comparação pôde concluir-se que na maior parte dos casos a modulação directa apresentava piores resultados, ou seja, apresentava valores de EVM mais altos. Existiam algumas excepções, nomeadamente para valores de potência de entrada superiores a 8 dBm e para valores de índice de modulação superiores a 50 % e inferiores a 90%.

De seguida, estudou-se quais seriam as diferenças na utilização de modulações como o OFDM, o QPSK, o 16 QAM e o 64 QAM. Deste estudo concluiu-se que apesar do sinal OFDM apresentar EVMs superiores em todas as situações, seria mais vantajoso utilizá-lo, uma vez que este sinal quando chega à estação base vai ser radiado. Numa ligação rádio este tipo de sinal é melhor por estar imune ao multipercurso.

Para o estudo do envio de um sinal utilizaram-se três sistemas RoF diferentes, um com modulador EA, outro com modulador AM e outro modulador MZ e utilizaram-se dois sinais diferentes. Concluiu-se que os resultados do modulador EA e do modulador AM eram muito próximos. O modulador AM simula um modulador ideal, pelo que se concluiu que o modulador EA seria uma boa opção para o sistema RoF. Os resultados obtidos com o modulador MZ eram piores, uma vez que apresentava valores de EVM mais altos relativamente aos dos outros dois moduladores.

Deste estudo pôde-se ainda concluir que o índice de modulação, que apresentava valores de EVM mais baixo, se situava entre os 20% e os 30%. A potência de entrada adequada a estes sistemas seria entre -2 e 2 dBm. Ao variar a distância concluiu-se que à medida que esta aumenta, o EVM também aumenta. Pôde-se ainda concluir que o sistema RoF com o modulador MZ estava limitado a distâncias superiores a 40 km, quando se enviava um sinal UWB, e a distâncias superiores a 60 km, quando se enviava um sinal LTE. Observou-se ainda as constelações destes sinais e concluiu-se que quando o EVM apresentava valores baixos a mancha em torno do local de referência do símbolo era pequeno, à medida que os valores de EVM aumentavam essa mancha também aumentava. Essa mancha indica o local onde o símbolo poderá aparecer.

No caso do *Triple Play* analisou-se a influência do índice de modulação, da distância e da potência na qualidade do sinal recebido para dois tipos de sistemas, um com um modulador EA e outro com um modulador MZ. Através desse estudo concluiu-se que o sistema com o modulador MZ estava, novamente, mais limitado que o outro sistema. O sistema RoF para *Triple Play* com modulador MZ não é indicado para potências de entrada inferiores a -4 dBm e para distâncias superiores a 40 km. A potência de entrada indicada para este sistema situa-se entre 0 e 6 dBm.

O sistema RoF, para *Triple Play*, com modulador EA está limitado a distâncias superiores a 70 km. O índice de modulação que apresenta EVM mais baixo situa-se entre 20% e 30%. A potência de entrada indicada para este sistema situa-se entre -4 e 0 dBm.

Segundo estes últimos testes concluiu-se que para o envio de três sinais em simultâneo, o modulador EA é o mais indicado.

Com as simulações efectuadas anteriormente, pôde-se analisar o comportamento do EVM em diferentes situações. Tomando-se assim consciência das limitações de cada sistema RoF e estas simulações podem servir como um filtro, ou seja, permitem seleccionar determinadas características como a potência de entrada e o índice de modulação, que à partida, optimizam a ligação.

As limitações apontadas em relação à distância, nos diversos casos, não são problemáticas, porque este tipo de sistema é utilizado para efectuar a cobertura de micro e pico células. A distância de ligação, nestes casos, não é muito elevada.

5.2 Trabalho Futuro

As comunicações ópticas estão em constante evolução e existem várias soluções para efectuar essas comunicações.

Existem diversas propostas possíveis para trabalho futuro, uma das quais seria realizar um estudo semelhante ao efectuado nesta dissertação mas para a ligação em *Uplink*. Normalmente, para esta ligação utiliza-se o comprimento de onda igual a 1330nm.

Outra proposta seria encontrar um sistema que simulasse a ligação *Downlink* juntamente com a ligação *Uplink*.

Poder-se-ia ainda realizar o mesmo estudo utilizando fibra multimodo e analisar quais seriam as diferenças e as vantagens da utilização de um ou outro tipo de fibra.

Referências

- [1] [Online]. Available: <http://www.arrownac.com/solutions-applications/machine-to-machine/files/atd-wifi.pdf>. [Acedido em 2012 11 2].
- [2] X. Qian, "Optically-Amplified Radio over Fiber Systems," PhD Thesis, University of Cambridge, 2006.
- [3] A. S. Damas, "Fibra Óptica na Rede de Acesso: Planeamento e Optimização de Custos," Master's Thesis, Universidade de Aveiro, 2011.
- [4] [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>. [Acedido em 25 9 2012].
- [5] I. A. M. Fortes, "Análise Comparativa das técnicas de transmissão com modulação externa ODSB, OSSB e OCS," Master's Thesis, Universidade do Algarve, 2009.
- [6] R. Lin e J. Y. H. Chen, "Millimeter-wave Radio over Fiber System for Broadband Wireless Communication," ISBN: 978-953-7619-67-1, InTech, Shanghai University, 2010.
- [7] F. Yunazar, "Modeling and Performance Analysis of OFDM Scheme for Radio over Fiber System," Master's Thesis, University Tecnology Malaysia, 2009.
- [8] K. R. Muhammad Imran Khan, "Measurement of optical impairments in OFDM based radio over fiber communication systems," em *21st International Conference on Noise and Fluctuations*, Toronto, 2011.
- [9] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, 2ª Edição ed., McGraw-Hill Seris in Electrical Engineering, 1991.
- [10] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, *Optical Networks*, 3ª Edição ed., Elsevier, 2010.
- [11] M. Almeida, "Geração e propagação de sinais rádio sobre fibra (RoF)," Master's Thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [12] A. Ng'oma, "Radio over Fiver Techonology for Broadband Wireless Communication Systems," PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [13] T. V. Azevedo, "Estudo de Técnicas de Pré-compensação das Penalidades no Downlink em sistemas "Wireless Radio over Fiber", usando sinais OFDM," Master's Thesis, Universidade do Porto, 2009.
- [14] [Online]. Available:

- http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:111527/datastreams/file_7990855/content.
[Acedido em 3 11 2012].
- [15] A. J. Cooper, “Fibre/Radio for the Provision of Cordless/Mobile Telephony Services in the Access Network,” *Electronic Letters*, 1990.
- [16] [Online]. Available: <http://www.nadya-anscombe.com/downloadlibrary/radio%20over%20fibre.pdf>. [Acedido em 23 Março 2012].
- [17] [Online]. Available: <http://www.thefreelibrary.com/Allen+Telecom%27s+Radio-Over-Fiber+Technology+Powers+Mobile...-a065566735>. [Acedido em 23 Março 2012].
- [18] H. Al-Raweshidy e S. Komaki, em *Radio over fiber technologies for mobile communications networks*, Artech House, 2002.
- [19] [Online]. Available: <http://www.ict-futon.eu/private/docs/Deliverables/D1.1.pdf>. [Acedido em 20 4 2012].
- [20] [Online]. Available: <http://www.ict-futon.eu/private/docs/Deliverables/D8.4.pdf>. [Acedido em 20 4 2012].
- [21] R. Llorente, S. Walker, I. Tafur Monroy, M. Beltrán, M. Morant, T. Quinlan e J. Jensen, “Triple Play and 60GHz Radio over Fiber Techniques for Next Generation Optical Access Networks,” em *16th European Conference on Network and Optical Communications*, 2011.
- [22] [Online]. Available: <http://www.ict-fiver.eu/description.php>. [Acedido em 30 10 2012].
- [23] R. Llorente, M. Morant, T. Quinlan, N. Medina e S. Walker, “Optical Architectures Evaluation for Triple-Play Distribution in Fiver Project,” em *Future Network & MobileSummit 2011 Conference Proceedings*, 2011.
- [24] [Online]. Available: <http://www.hjnews.com.br/noticias/34-noticias/566-tecnologia-estudada-na-unicamp-cria-wi-fi-com-alcance-de-ate-3km.html>. [Acedido em 30 10 2012].
- [25] F. Fortes, “Apontamentos de Sistemas de Electronica e Telecomunicações,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.
- [26] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems.
- [27] 3GPP TS 36.101 V8.8.0 (2009-12), Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE)

- radio transmission and reception (Release 8).
- [28] ECMA-368 International Standard, “High Rate Ultra WideBand PHY and MAC Standard,” 2007.
- [29] J. Laferrière, G. Lietaert, R. Taws e S. Wolszczak, *Reference Guide to Fiber Optic Testing*, France: Second Edition, Volume 1, JSDU, 2011.
- [30] G. Gonçalves, “Geração e distribuição de sinais RoF,” Master's Thesis, Universidade de Aveiro, 2011.
- [31] J. M. Senior, *Optical Communication Networks- Principles and Practice*, 3rd edition, Prentice Hall, 2009.
- [32] M. F. S. Ferreira, *Nonlinear Effects in Optical Fibers*, John Wiley & Sons, 2011.
- [33] C. Silva, “Redução das emissões de CO₂,” Master's Thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [34] J. Silva, “Desenvolvimento de um sistema para distribuição de sinais rádio sobre fibra óptica,” Master's Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [35] F. M. Ferreira, “Modulation Techniques for Radio over Fiber System with Subcarrier Multiplexing in Millimeter Waves,” Master's Thesis, Universidade de Coimbra, 2009.
- [36] H. B. Kim, “Radio over Fiber based Network Architecture,” PhD Thesis, Technischen Universit at Berlin, 2005.
- [37] [Online]. Available: http://www.globalspec.com/m2optics/ref/Defining_OMI.pdf. [Acedido em 3 11 2012].
- [38] P. Andrade, “Distribuição de Sinais OFDM e Vídeo sobre fibra,” Master's Thesis, Universidade de Aveiro, 2011.
- [39] R. Leitão e P. Marques, “Sincronização em OFDM recorrendo à autocorrelação do sinal e à estimação do canal,” Artigo, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2008.
- [40] M. P. V. Araújo, “Planamaneto e dimensionamento de redes WiMAX,” Master's Thesis, Universidade de Aveiro, 2008.
- [41] J. Schiller, *Mobile Communications*, Addison Wesley, 2003.
- [42] ETSI, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); UTRA repeater radio transmission and reception*, 3GPP TS25.106 version 7.2.0 Release 7, 2008.
- [43] 3. T. R. #. “Overview of 3GPP Release 5,” 2003.

- [44] J. Lopes, “Performance Analysis of UMTS/HSDPA/HSUPA at the Cellular Level,” Master's Thesis, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [45] R. Preguiça, “Comparison between UMTS/HSPA+ and WiMAX/IEEE 802.16e in Mobility Scenarios,” Master's Thesis, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [46] 3. T. RAN, “Future Evolution Workshop,” Toronto, Canadá, 2004.
- [47] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold e P. Beming, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, 1st edition, Elsevier, 2007.
- [48] P. Carvalhais, “Interferência dos Parques Eólicos sobre a Transmissão deTV,” Master's Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [49] V. Escaleira, “TV Digital: A Competição das Alternativas,” Artigo, Instituto Superior Técnico.
- [50] W. Fisher, Digital Video and Audio Broadcasting Technology, 3rd Edition, Springer, 2010.
- [51] [Online]. Available:
http://www.img.lx.it.pt/~fp/cav/ano2007_2008/Slides/CAV_8_DVB_2008_Port_Web.pdf.
[Acedido em 28 8 2012].
- [52] P. Assunção, “Sistema DVB para Transmissão de Televisão digital,” Artigo, Instituto Politécnico de Leiria.
- [53] B. M. R. e. S. Rés, “Soluções Tecnológicas e Impacto da Mobilidade numa Rede WiMAX,” Master Thesis, Universidade de Aveiro, 2008.

Anexo A

OFDM e descrição dos sinais de rádio e vídeo

A.1 OFDM

A modulação OFDM consiste em dividir a informação, a transmitir a um débito elevado, por múltiplas subportadoras, em paralelo, com um débito binário mais baixo. Cada subportadora é modulada em QAM ou em PSK [39].

O OFDM é muito similar à FDM (*Frequency Division Multiplexing*), com a excepção que no OFDM as subportadoras têm de ser ortogonais entre si. Essa ortogonalidade é conseguida garantindo que o espaçamento entre as frequências das subportadoras seja igual ao inverso do tempo útil de símbolo [39].

A modulação e desmodulação são efectuadas recorrendo à IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) e à FFT (*Fast Fourier Transform*), respectivamente.

Este tipo de modulação consegue que a interferência intersimbólica (*Intersymbol Interference* - ISI) seja praticamente eliminada com a introdução de um tempo de guarda entre cada símbolo. Este tempo de guarda pode ser ocupado com uma cópia da parte final símbolo anterior (extensão cíclica) ou com uma amplitude praticamente zero. A duração do tempo de guarda é escolhida de forma a ser superior ao atraso causado pelo multipercurso [39].

O OFDM ao permitir a transmissão de subportadoras em paralelo apresenta algumas vantagens, nomeadamente uma maior eficiência espectral, imunidade à ISI, imunidade ao efeito multipercurso. Apesar destas vantagens a existência dessas subportadoras também torna o sistema mais sensível a desvios de frequência. Para além disso, apresenta ainda como desvantagem a elevada relação entre a potência de pico e a potência média (*Peak to Average Power Ratio* - PAPR), sendo esta uma das razões por se utilizar o OFDM preferencialmente em *Downlink* [38].

Na Figura 69 pode observar um esquema de transmissão utilizando a modulação OFDM e as várias etapas para gerar um símbolo OFDM e descodifica-lo no receptor.

O OFDM é utilizado em diversas tecnologias nomeadamente em WiFi, WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), *digital TV broadcast*, como por exemplo o DVB-T, DAB (*Digital Audio Broadcasting*) e sistemas de redes móveis, como o LTE [38].

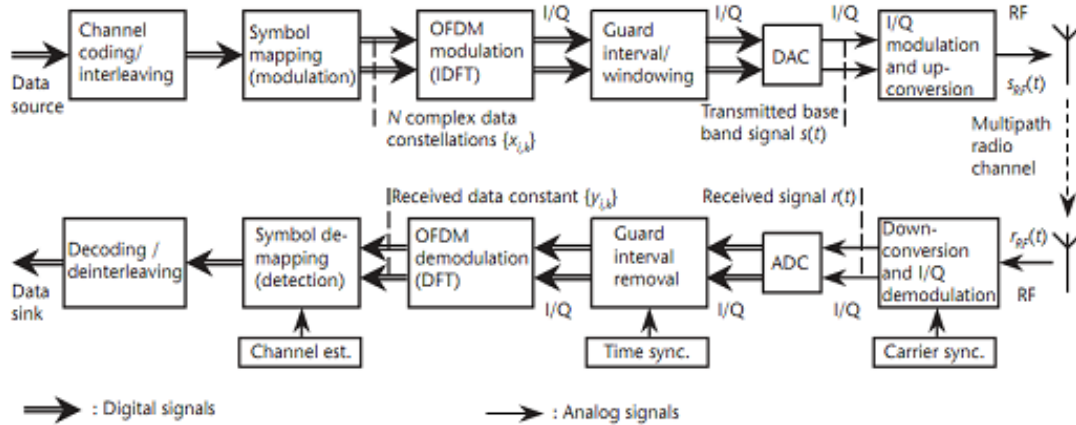


Figura 69 - Esquema de transmissão ponto a ponto utilizando OFDM [38]

O LTE utiliza OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) no acesso rádio, em Downlink, esta tecnologia é uma extensão do OFDM. Esta tecnologia é indicada para sistemas de multi-utilizador, pois permite que as subportadoras possam ser distribuídas por vários utilizadores ao mesmo tempo [40]. Esta distribuição é realizada através do escalonamento existente no LTE, em que de 1 em 1 ms são atribuídos recursos aos utilizadores. Um exemplo de escalonamento em LTE pode ser observado Figura 70.

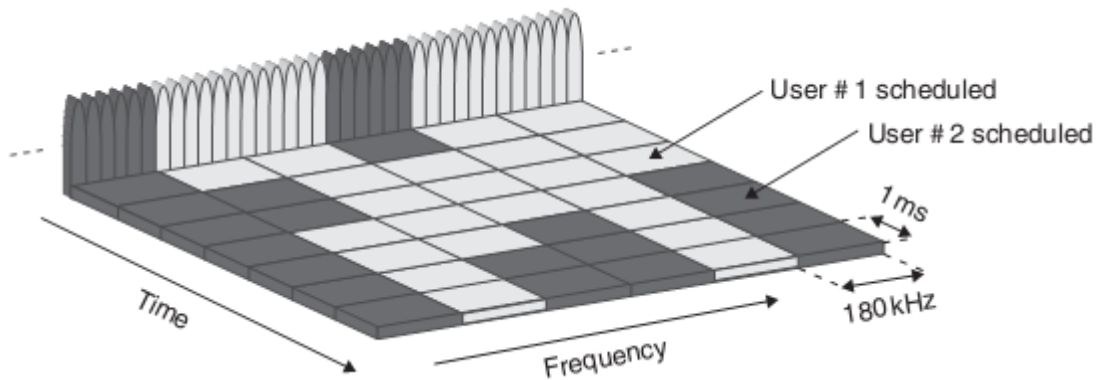


Figura 70 - Escalonamento em LTE

A.2 Comunicações móveis

Neste ponto realizar-se-á uma descrição de sinais rádio das diferentes gerações. Focando, principalmente, o tipo de modulação, a banda de frequências e o débito binário de

cada um. Estas são as características necessárias para definir um sinal na ferramenta de simulação utilizada.

A.2.1 GSM (2G)

Na 2ª geração de redes móveis, o sistema de comunicação é totalmente digital, contrariamente ao que acontecia na geração anterior, foi por isso formado o *Groupe Speciale Mobile* em 1982, posteriormente designado por *Global System for Mobile Communication*. A especificação desta tecnologia esteve a cargo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), ficando posteriormente à responsabilidade do 3 GPP (*Third Generation Partnership Project*) quando surgiu o UMTS [41].

O GSM utiliza, na Europa, a banda entre 890 e 915 MHz para *Uplink* e a banda entre 935 e 960 MHz para o *Downlink*, este sistema é denominado por GSM 900. Posteriormente, surgiu o GSM 1800 que utiliza a banda entre 1710 e 1785 MHz para *Uplink* e a banda entre 1805 e 1880 MHz para o *Downlink* [41].

Nos serviços de transmissão de dados, o GSM, permite débitos até 9.6 kbps. Estes serviços não incluem a voz. O mecanismo utilizado por esta tecnologia para aumentar a qualidade de transmissão é o FEC (*Foward Error Correction*). O FEC introduz redundância na trama de dados, para ajudar a reconstruir os dados originais no receptor. Dependendo do tipo de FEC, consegue-se obter débitos binários de 2.4, de 4.8 ou de 9.6 kbps. Um canal GSM apresenta uma largura de banda de 200 kHz. O GSM utiliza a modulação GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) [41].

A.2.2 UMTS (3G)

A 3G pode apresentar diferentes nomes consoante a parte do mundo que se trata. No caso da Europa adoptou-se a terminologia UMTS. Esta terminologia segue a perspectiva da ETSI [42].

O UMTS utiliza uma nova técnica de acesso rádio, o WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). O WCDMA é a evolução do CDMA. O CDMA foi utilizado para fins militares, pois esta técnica permite que os sinais sejam transmitidos abaixo do patamar de ruído. O WCDMA permite multi-serviço, ou seja, permite voz e dados. Alguns dos serviços possíveis com o WCDMA são a vídeo chamada, o acesso à Internet, entre outros [42].

As especificações da rede UMTS estão descritas na Release 99 do 3GPP e foram terminadas em 2000.

Na Europa a gama de frequências utilizadas para *Uplink* é entre 1920 e 1980 MHz e para *Downlink* é entre 2110 e 2170 MHz, para UMTS. A largura de banda do *Uplink* e do *Downlink* é de 60 MHz e as portadoras estão centradas em 1950 MHz e 2140 MHz, respectivamente. O método que “vingou” para separação do *Downlink* do *Uplink* foi o FDD (*Frequency Division Duplex*), visto que quando surgiu o UMTS eram sugeridos dois métodos para separação de *Downlink* e de *Uplink*, o FDD e o TDD. Esta geração apresenta débitos até 2 Mbits/s e a largura de banda de um canal é de 5 MHz. A modulação utilizada é o QPSK [42].

A.2.3 HSPA

Neste ponto apresenta-se um resumo das tecnologias que sucederam ao UMTS e que antecederam o LTE, ou seja, o HSDPA, o HSUPA e o HSPA+. As suas características estão descritas na *Release 5*, *6* e *7*, respectivamente. Estas *Releases* são da responsabilidade do 3GPP.

Com HSDPA, o débito binário do *Downlink* aumenta para valores superiores a 10 Mbps (≈ 14.4 Mbps). Esta tecnologia está projectada para serviços que necessitem de débitos binários altos em *Downlink* e baixos em *Uplink* [43].

Com HSPDA introduziu-se o AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) e o HARQ (*Hybrid Automatic Retransmission Query*). Em suma, o AMC permite, com base nas medidas que o móvel envia a estação base sobre as condições da ligação, ajustar a modulação. As modulações utilizadas nesta tecnologia são o 16 QAM e o QPSK, quando as condições de ligação são boas utiliza-se a modulação 16 QAM. O HARQ é um mecanismo de detecção de erros na ligação, em que o receptor informa o transmissor que o bloco de informação recebido tinha erros e o transmissor reenvia-o. E combina as técnicas de ARQ com as técnicas de FEC [43].

Com a evolução do tipo de serviços fornecidos, que exigiam uma resposta do “mais forte” do *Uplink*. Como resposta a essa exigência surge o HSUPA que permite débitos de 5.76 Mbps em *Uplink*. Utiliza como modulação o BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Esta tecnologia também utiliza o mecanismo HARQ [44].

Por último, o HSPA+ que possibilita a utilização da modulação 64 QAM, para além da modulação 16 QAM e QPSK, em *Downlink* e 16 QAM em *Uplink*. Com a modulação de maior ordem, esta tecnologia, consegue oferecer débitos binários até 21.6 Mbps, em *Downlink*. Na *Release 7* está incluído a possibilidade de utilizar antenas MIMO 2x2,

utilizando 16 QAM, conseguido atingir assim débitos até 28 Mbps. A *Release 8*, que também está relacionada com esta tecnologia, permite utilizar MIMO com 64 QAM, aumentando o valor máximo de débito binário para 43.2 Mbps [45, 40].

A.2.4 LTE (4G)

As especificações do LTE tiveram início em 2004, em Toronto. Nesta altura reuniram-se diferentes empresas da área de telecomunicações, como a Nokia, a Ericsson, a Vodafone entre outras, onde indicaram alguns requisitos para a nova geração [46].

O LTE é uma tecnologia que induz uma mudança na implementação das redes de comunicações móveis, pois são puramente redes de comutação por pacotes. Todos os serviços disponibilizados, mesmo o de voz, passarão a ser efectuados através de comutação por pacotes [47].

Actualmente o LTE é disponibilizado na banda dos 2.6 GHz mas futuramente poderá ser disponibilizado na banda dos 2.1 GHz e dos 700 MHz. A largura de banda de um canal é variável, podendo tomar valores entre 1.4 MHz e 20 MHz. No acesso rádio em Uplink utiliza a SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiplex*) e em Downlink utiliza o OFDMA. Os esquemas de modulação utilizados para cada subportadora são o QPSK, o 16 QAM e o 64 QAM. Estes esquemas de modulação são utilizados consoante a qualidade da ligação, ou seja, quando o móvel está perto da estação base pode usar uma modulação mais alta. Isto é possível porque o LTE utiliza codificação e a AMC, ou seja, altera a modulação consoante as condições existentes no canal. O LTE utiliza ainda antenas MIMO. Os débitos disponibilizados pelo LTE podem chegar aos 100 Mbps. Para separar o Uplink do Downlink, o LTE, permite a utilização de TDD ou de FDD [47].

A.3 Sinais de Vídeo

Neste ponto apresenta-se uma breve análise das diferenças entre a TV analógica e a TV digital. Ainda neste ponto, é apresentada uma breve descrição dos diferentes sistemas utilizados para implementar a TV digital.

A.3.1 TV Analógica vs TV Digital

Desde o seu aparecimento, em 1926, o conceito de televisão tem evoluído bastante. Em Portugal as primeiras emissões de televisão, da RadioTelevisão Portuguesa (RTP), aconteceram em 1956. Esta evolução é referente a vários níveis desde o próprio aparelho

televisivo, passando pelos conteúdos até ao modo como é transmitido o sinal de vídeo. No início, a TV, tinha uma imagem a preto e branco e era um “caixote”, actualmente a imagem é a cores e a TV tem o formato de um “quadro”, que em alguns casos pode ser pendurado na parede [48].

O sinal vídeo transmitido, inicialmente, era analógico sob a forma de ondas rádio. Este sinal podia ser difundido na banda VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), que corresponde à faixa de frequências rádio entre 30 até 300 MHz e à faixa entre 300 MHz até 3 GHz (de 470 a 890 MHz para TV), respectivamente. Existiam três tipos de formatos para a distribuição de imagem a cores e som, sendo eles [48]:

- PAL (*Phase Alternation Line*);
- NTSC (*National Television System(s) Committee*);
- SECAM (*Séquentiel couleur à mémoire*).

O formato adoptado na maior parte da Europa, incluindo Portugal, foi o PAL.

Um sinal de vídeo analógico, durante a sua transmissão, está sujeito à ocorrência de distorções e interferências, que irão afectar directamente na qualidade do vídeo e são visíveis na maioria dos casos. Algumas das situações responsáveis por gerar interferências relacionam-se com as condições atmosféricas, os edifícios altos e as fontes de energia electromagnética.

Em Portugal existiu recentemente um *switch-off* do sinal analógico, ou seja, com este fenómeno o sinal de vídeo é difundido somente em digital.

Com a difusão da TV em digital conseguiu-se libertar grande parte do espectro ocupado pelo sinal de TV analógico. Isto porque a largura de banda ocupada por um canal analógico é utilizada para vários canais digitais. O número de canais digitais vai depender do tipo de compressão de imagem que é utilizada. Com este tipo de transmissão a imagem que chega ao televisor não irá sofrer o efeito de “chuva” provocado pela presença de interferências, pois se o receptor receber símbolos com erros vai conseguir corrigi-los utilizando o FEC, que é implementado neste tipo de sistemas. Se a taxa de erros for muito elevada o vídeo irá parar [48].

O sinal digital antes de ser transmitido tem de ser codificado. Os métodos utilizados para codificação são o MPEG-2 (*Moving Picture Experts Group-2*) e o MPEG-4, sendo o primeiro o mais comum e o segundo mais direccionado para HDTV (*High-definition Television*).

Para implementar a TV digital existem diversos sistemas/normas, aquele que é utilizado na Europa é o DVB. Este sistema é dividido em DVB-T (terrestre), DVB-S

(satélite), em DVB-H (móvel) e em DVB-C (cabo), ou seja para cada meio de transmissão tem uma designação diferente. Para além do DVB-T, utilizado na Europa, existem ainda outras soluções para a TV Digital, como por exemplo o ATSC (*Advanced Television Systems Committee*), utilizado na América do Norte, o ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting –Terrestrial*) utilizado no Japão, e o SBTVD-T (Sistema Brasileiro de Televisão Digital –Terrestre) baseado na solução japonesa [49] [50].

Na Figura 71 observa-se um esquema que ilustra a difusão da TV analógica e outro que ilustra a difusão da TV digital.

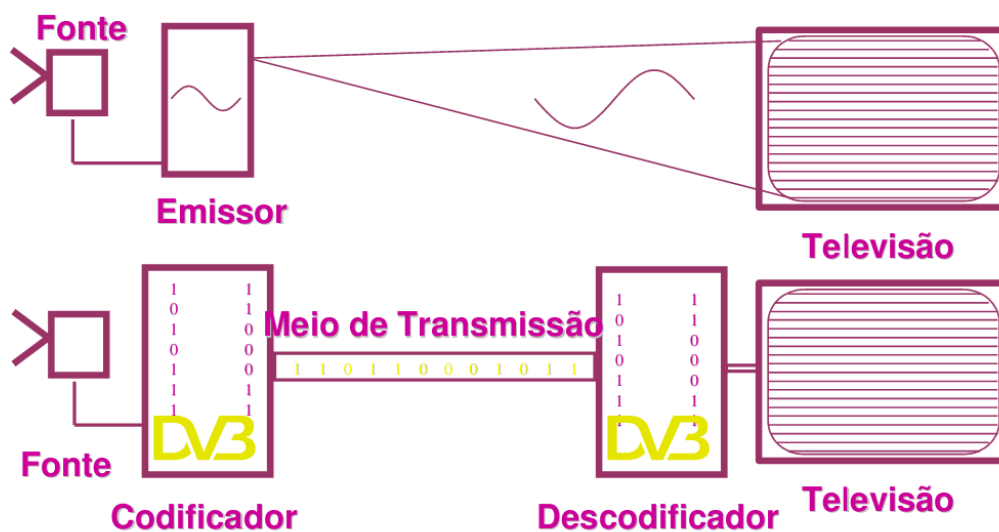


Figura 71: TV analógica vs TV digital [51]

A.3.1.1 DVB-T

O DVB-T utiliza a modulação OFDM que quando combinado com códigos de detecção e correção de erros dá pelo nome de COFDM (*Coded OFDM*). Neste sistema as portadoras podem ser moduladas em QPSK, EM 16 QAM ou em 64 QAM [38] [50].

Este sistema tem dois modos de operação o 2K e o 8K, que determinam o número de portadoras a utilizar. No modo 2K utiliza-se 2048 portadoras com um espaçamento de 4.464 kHz entre elas e no modo 8K utiliza-se 8192 portadoras com um espaçamento de 1.116 kHz. Algumas dessas portadoras servem para sincronização e outras são colocadas a zero para diminuir a interferência com canais RF adjacentes, utilizando-se então para transmissão de dados 1512 e 6048 portadoras, respectivamente [50] [52].

A largura de banda de um canal pode ser de 6,7 e 8 MHz. Na Europa são utilizados canais com largura de banda igual a 8 MHz [38].

A.3.1.2 DVB-C

A transmissão de TV digital por cabo (coaxial ou fibra) é realizada utilizando o DVB-C. As modulações possíveis são a 16 QAM, a 32 QAM, a 64 QAM, a 128 QAM e a 256 QAM, variando para tal o número de bits que representam um símbolo. O factor *roll-off* utilizado tem um valor de 0.15. Quanto maior for o número de bits utilizados para definir um símbolo, maior será o débito binário e menor será a imunidade ao ruído. A largura de banda de um canal é de 8 MHz [50] [52].

Neste sistema é utilizado um bloco de mecanismo de protecção de erros *Reed Solomon* (204,188), o que significa que a cada pacote com 188 *bytes* acrescenta 16 *bytes*, obtendo-se como dimensão final 204 *bytes* e conseguindo-se corrigir até 8 *bytes* errados ($16/188=8.5$) [52].

A.3.1.3 DVB-S

O método de modulação utilizado pelo DVB-S é o QPSK. Uma transmissão, por satélite, requiere um método de modulação que seja relativamente resistente ao ruído e que seja capaz de lidar com várias não linearidades [38].

Um canal num sistema deste tipo pode ter uma largura de banda entre 26 a 36 MHz. Para a transmissão em *Uplink* é utilizada a banda entre 14 a 19 GHz e para *Downlink* é utilizada a banda entre 11 a 13 GHz. Os débitos obtidos são de 55 Mbps [38].

A.4 WPAN (*Wireless Personal Area Networks*) e WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*)

Os sistemas WPAN são utilizados em comunicações de curtas distância, apenas alguns metros, e com um consumo de potência baixo. Um exemplo de uma tecnologia que esteja inserida neste sistema é o UWB (*Ultra WideBand*).

Os sistemas WMAN são utilizados para comunicações na rede de acesso local, apresentando distâncias superiores aos sistemas anteriores. Um exemplo deste sistema é o WiMAX.

A.4.1 WiMedia MB-OFDM signals (ECMA-368)

O ECMA-368 é um *standard* que especifica as características da camada física do UWB e que utiliza MB-OFDM para o envio de informação. Estes sinais utilizam a banda de frequências entre 3.1 e 10.6GHz, suportando débitos binários de 53,3 Mbps, 80 Mbps, 106,7 Mbps, 160 Mbps, 200 Mbps, 320 Mbps, 400 Mbps, e 480 Mbps [28].

O espectro está dividido em 14 bandas, cada uma com uma largura de banda de 528 MHz. Na Figura 72 é possível observar como é feita essa distribuição no espectro. Em cada banda existem 122 subportadoras, das quais 100 são para enviar informação, 10 são utilizadas como portadoras de guarda e 12 são utilizadas como portadoras pilotos. Cada portadora pode ser modulada em QPSK ou em DCM (*Dual-Carrier Modulation*), dependendo do débito binário, ou seja, para débitos binários superiores a 320 Mbps utiliza-se a DCM. Neste *standard* também é referido que os códigos FEC permitidos são 1/3, 1/2, 5/8 e 3/4 [28].

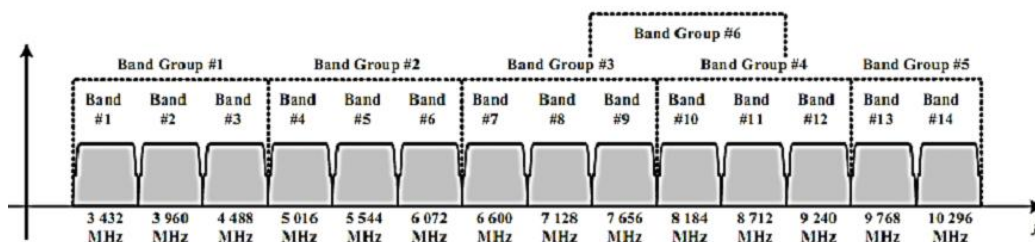


Figura 72: Distribuição de bandas no espectro do UWB [28]

A.4.2 WiMAX

As características da tecnologia WiMAX estão especificadas na norma IEEE802.16. A primeira norma referente ao WiMAX surgiu em 2001 e tem sofrido diversas alterações ao longo dos anos, nomeadamente em relação ao tipo de modulação, à banda de frequências que utiliza, o tipo de acesso, entre outro. O grupo IEEE é responsável por especificar as características das tecnologias, sendo assim foi criado o grupo *WiMAX Forum* que é responsável por desenvolver e certificar os produtos, baseados nessas normas [53].

Na primeira norma, desta tecnologia, a banda de frequências utilizada situava-se entre 10 e 66 GHz e a ligação teria de ser feita em linha de vista. Em 2005 foi aprovada uma norma que garantia suporte à mobilidade. A banda de frequência utilizada situa-se entre os 2 e 6 GHz. O tipo de modulação utilizado é o OFDM, onde cada portadora pode ser modulada em

QPSK, em 16 QAM ou em 64 QAM. Segundo esta norma pode-se garantir débitos binários até 75 Mbps, dependendo do tipo de modulação e largura de banda do canal utilizada. A largura de banda de um canal pode tomar valores de 3.5 MHz, 5 MHz, 7 MHz, 10 MHz, 14 MHz ou 20 MHz [40] [53].

Na Tabela 3 pode observar-se a evolução das características do WiMAX nas diferentes normas.

Tabela 3: Tabela resumo do WiMAX [40]

	802.16	802.16d	802.16e
Aprovada	Dezembro 2001	Junho 2004	2005
Espectro	10-66GHz, licenciado	2-11GHz, licenciado, não licenciado	2-6GHz, licenciado, não licenciado
Condições do canal	Linha de vista requerida (LOS)	Linha de vista não requerida (NLOS)	Linha de vista não requerida (NLOS)
Débito	Até 134Mbps com canais de 28MHz	Até 75Mbps com canais de 20MHz	Até 75Mbps com canais de 20MHz
Modulação	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256 subportadoras, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 128 a 2048 subportadoras, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Mobilidade	Fixo	Fixo, nómada	Portabilidade nomádica, mobilidade
Eficiência espectral	< 4.8bps/Hz	< 3.75bps/Hz	< 3bps/Hz
Larguras de banda do canal	20, 25 e 28 MHz	Escalável 1.25 a 20 MHz	Escalável 1.25 a 20 MHz
Raio típico da célula	2-5km (LOS)	1-15km (max. 50km)	1-5km