



Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Serviço de Documentação e Publicações

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

Geração e propagação de sinais rádio sobre fibra
(RoF)

MÁRCIO JOSÉ REIS SILVA ALMEIDA
(Licenciado)

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

Orientador(es):

Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho
Prof. Fernando Manuel Valente Ramos (FCUL)

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Pereira Vestias

Vogais:

Prof. Doutor António Luís Jesus Teixeira (UA)
Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Dezembro de 2011

Agradecimentos

Um agradecimento ao Professor Pedro Pinho pela excelente orientação, disponibilidade e por ter apostado e acreditado em mim para a realização desta dissertação.

Ao Professor Fernando Ramos pelo interesse demonstrado no meu trabalho e pela disponibilidade e apoio fundamental.

Ao Abdelgader Abdalla do IT - Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro pela disponibilidade nos vários emails trocados, que me ajudarem a resolver problemas fundamentais na realização desta dissertação.

Aos meus colegas do ISEL, em particular ao meu colega e amigo André Martins que me acompanhou ao longo de todo o meu percurso académico e com o qual passei grande parte do meu tempo enquanto aluno nesta instituição, apoiando-me e ajudando-me sempre que necessário.

Aos meus amigos da Residência Maria Beatriz, pelos longos anos de amizade e convívio que marcarão para sempre a minha vida.

Por fim, um agradecimento especial ao meu pai, por tudo o que fez por mim, pelos sacrifícios que fez para que eu pudesse tirar um curso superior e por sempre ter acreditado em mim.

A todos um muito obrigado!

Resumo

As tecnologias de rádio sobre fibra associam as comunicações rádio com as comunicações ópticas, sendo estas os dois tipos de comunicações com maior desenvolvimento nos últimos anos, ao permitirem débitos e larguras de banda elevadas e simultaneamente uma elevada mobilidade. Neste sentido, no mercado das telecomunicações têm sido desenvolvidos sistemas com alta performance, tentando reduzir o quanto possível os custos associados aos sistemas, tendo assim uma especial relevância os designados sistemas de baixo custo.

Nesta dissertação de Mestrado estuda-se a propagação de sinais rádio sobre fibra, variando o tipo de modulação óptica utilizada e tendo como base os sistemas de baixo custo. Estes sistemas de baixo custo são sistemas que utilizam apenas uma fonte óptica para o sentido descendente, remodulando a portadora na estação remota com o sinal do sentido ascendente.

Começa-se por fazer um estudo sobre o estado da arte da tecnologia rádio sobre fibra e tecnologias envolvidas. De seguida, é apresentado um estudo teórico sobre o sistema rádio sobre fibra, desde a sua arquitectura, figuras de mérito e seus componentes. Posteriormente, são apresentadas as modulações ópticas utilizadas em sistemas rádio sobre fibra. A avaliação dos sistemas e apresentação de resultados é efectuada recorrendo a simulações.

De acordo com os resultados obtidos pode verificar-se que a utilização de modulação de fase no sentido descendente e modulação de intensidade no sentido ascendente é a solução que melhores resultados apresenta como sistema de baixo custo. No entanto, caso se pretenda uma melhor performance em detrimento da redução de custos, deve-se optar por um sistema convencional com duas fontes ópticas, uma para cada sentido.

Palavras-chave: Rádio Sobre Fibra, Modulações Ópticas Analógicas, Sistemas de Baixo Custo.

Abstract

Radio over fiber technology have an increasingly important role in communication systems due to the association of radio and optical communications. The integration of the two types of communication systems which have experienced greater development in recent years results in a system offering the best of both: high throughput, bandwidth and mobility. Thus, the telecommunication markets have developed systems with high performance, with the aim to reduce as much as possible the systems cost.

In this Master's thesis the objective is to study the propagation of radio signals over fiber, using different modulation types and optical systems based on low cost. These low-cost systems use a single optical source to downlink and remodulation of the optical carrier in the uplink direction.

We start with a study of the state of the art of radio over fiber, followed by a theoretical analysis on radio over fiber systems architecture, figures of merit and components. Next, optical modulations used in radio over fiber systems are presented. The systems evaluation and results are performed by means of simulations.

The results indicate that phase modulation for downlink and intensity modulation for uplink is the solution with best results for low-cost systems. However, if the objective is the best performance instead of low-cost, the conventional systems using two optical sources are the best solutions.

Key-words: Radio Over Fiber, Analog Optical Modulations, Low-Cost Systems.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Comunicações ópticas	1
1.2	Comunicações sem fios	3
1.3	Rádio sobre fibra	5
1.3.1	Arquitectura	6
1.3.2	Vantagens do RoF	7
1.3.3	Limitações do RoF	9
1.3.4	Aplicações do RoF	10
1.3.5	Estado da arte em RoF	11
1.4	Objectivos da dissertação	13
1.5	Organização da dissertação	13
1.6	Contribuições originais da dissertação	13
2	Sistema Rádio sobre Fibra	15
2.1	Componentes de um sistema Rádio sobre Fibra	15
2.1.1	Fibra óptica	16
2.1.2	Moduladores electro-ópticos	22
2.1.3	Fontes ópticas	24
2.1.4	Fotodíodos	28
2.2	Figuras de mérito de um sistema Rádio sobre Fibra	30
2.2.1	Ganho e relação sinal-ruído	30
2.2.2	Linearidade	31
2.2.3	Diagrama de constelação e vector de erro	32
3	Multiplexagem e modulações ópticas	35
3.1	Multiplexagem de sub-portadora	35
3.1.1	Vantagens de SCM	37
3.1.2	Desvantagens e limitações de SCM	38
3.2	Multiplexagem por divisão de comprimento de onda	39
3.2.1	Vantagens de WDM	39

3.2.2	Desvantagens de WDM	40
3.3	Modulação em intensidade	41
3.4	Modulação de fase	41
3.4.1	Vantagens na utilização de PM	42
3.4.2	Desvantagens na utilização de PM	44
3.4.3	Desmodulação PM	44
3.5	Índice de modulação óptico	45
4	Simulação de sistemas rádio sobre fibra	49
4.1	Sistema RoF convencional	49
4.1.1	Variação do comprimento da fibra no sistema convencional	54
4.2	Sistema RoF de baixo custo utilizando IM nos dois sentidos	56
4.3	Sistema RoF de baixo custo utilizando PM e IM	61
4.3.1	Ligação de <i>downlink</i>	61
4.3.2	Ligação de <i>uplink</i>	67
4.4	Sistema RoF de baixo custo utilizando PM nos dois sentidos	69
5	Conclusões e trabalho futuro	73
5.1	Conclusões	73
5.2	Trabalho futuro	74

Lista de Figuras

1.1	Exemplos de aplicações para as várias frequências do espectro electromagnético.	2
1.2	Número de utilizadores de Internet nos últimos 10 anos.	3
1.3	Número de utilizadores das redes móveis nos últimos 10 anos.	4
1.4	Sistema RoF simplificado.	6
1.5	Ligação RoF unidireccional simplificada.	6
1.6	Janelas de transmissão da fibra óptica.	8
1.7	Cenário <i>indoor</i> com aplicação RoF.	11
2.1	Componentes de uma ligação RoF utilizando modulação directa.	16
2.2	Componentes de uma ligação RoF utilizando modulação externa.	16
2.3	Constituição de uma fibra óptica.	16
2.4	Tipos de fibras ópticas.	17
2.5	Relação entre débito e distância nas MMFs.	19
2.6	Dispersão cromática em função da frequência.	20
2.7	Dispersão de polarização.	20
2.8	Modulador MZ.	23
2.9	Estrutura geral de um laser.	25
2.10	Espectro de um laser MLM.	26
2.11	Espectro de um laser SLM.	27
2.12	Estrutura de um laser DFB.	27
2.13	Estrutura de um laser VCSEL.	28
2.14	Estrutura de um fotodíodo PIN.	29
2.15	Estrutura de um fotodíodo APD.	30
2.16	Variação da potência de saída das primeiras três harmónicas em função da potência de entrada.	32
2.17	Constelação 16-QAM.	33
2.18	Constelações distorcidas devido às várias limitações do sistema.	33
2.19	Ilustração da definição de EVM.	34
3.1	Multiplexagem de sub-portadora.	36
3.2	Modulação de sub-portadora.	36

3.3	Esquema de uma ligação RoF utilizando SCM e modulação externa.	37
3.4	Espectro óptico de um sinal RF modulado sobre uma portadora óptica.	37
3.5	Linearidade entre a potência óptica e a corrente eléctrica.	38
3.6	Efeito de <i>clipping</i>	39
3.7	Exemplo de uma arquitectura WDM-RoF.	40
3.8	Espectro óptico DWDM-RoF.	41
3.9	Modulação IM no domínio do tempo.	42
3.10	Portadora óptica com modulação de fase.	43
3.11	Esquema de um receptor PM utilizando um DLI e um receptor balanceado. . . .	45
3.12	Sinal utilizado na desmostração do OMI.	46
3.13	Influência do OMI na modulação óptica em intensidade.	47
4.1	Arquitectura de um sistema RoF convencional.	50
4.2	Sinais enviados no sistema RoF convencional.	50
4.3	EVM em função do OMI para a arquitectura convencional.	51
4.4	Sinais recebidos no DL.	52
4.5	Sinais recebidos no UL.	53
4.6	Sinais recebidos no DL para o pior caso.	54
4.7	Variação do EVM com a distância de ligação.	55
4.8	Sinal recebido para uma distância de 120km utilizando uma fibra DSF.	55
4.9	Sinal recebido para uma distância de 90km utilizando uma fibra NDSF.	56
4.10	Arquitectura de um sistema RoF de baixo custo utilizando IM-IM.	56
4.11	EVM em função da distância no UL.	57
4.12	Potência de recepção no UL.	58
4.13	EVM em função do OMI no UL.	58
4.14	Sinais recebidos no UL no melhor caso.	59
4.15	EVM no UL em função do OMI no DL	59
4.16	Sinais recebidos no UL para um OMI no DL não optimizado.	60
4.17	Arquitectura de um sistema RoF de baixo custo utilizando PM-IM.	61
4.18	Fasores de uma constelação 16-QAM.	62
4.19	EVM em função do OMI para PM.	62
4.20	Efeito PM-to-IM gerado pela CD da fibra.	63
4.21	Esquema do bloco DLI utilizado.	64
4.22	Supressão da banda lateral superior por parte do DLI.	65
4.23	EVM e potência recebida em função do atraso no DLI.	65
4.24	Sinal recebido utilizando um atraso de 25ps.	66
4.25	EVM em função da distância no DL.	67
4.26	EVM no UL em função do OMI do DL.	68

4.27	Ruído PM-to-IM no receptor de UL.	68
4.28	Arquitectura de um sistema RoF de baixo custo utilizando PM-PM.	69
4.29	EVM em função do OMI no UL.	70
4.30	EVM do UL em função do OMI no UL.	70
4.31	Recepção do sinal de UL no sistema PM-PM.	72

Lista de Tabelas

4.1	Parametrização dos componentes para o sistema convencional.	51
-----	---	----

Lista de acrónimos

<i>APD</i>	Avalanche Photodiode
<i>CATV</i>	Cable Television ou Community Antenna Television
<i>CD</i>	Chromatic Dispersion
<i>CS</i>	Central Station
<i>CW</i>	Continuous Wave
<i>DAS</i>	Distributed Antenna System
<i>DBWS</i>	Distributed Broadband Wireless Systems
<i>DD</i>	Direct Detection
<i>DFB</i>	Distributed Feedback
<i>DL</i>	Downlink
<i>DLI</i>	Delay Line Interferometer
<i>DPSK</i>	Differential Phase Shift Keying
<i>DR</i>	Dynamic Range
<i>DSB</i>	Double Side Band
<i>DSF</i>	Dispersion Shifted Fiber
<i>DWDM</i>	Dense Wavelength-Division Multiplexing
<i>EAM</i>	ElectroAbsorption Modulator
<i>EDFA</i>	Erbium Doped Fiber Amplifier
<i>EMI</i>	ElectroMagnetic Interference
<i>E-O</i>	Electro-Optic
<i>EVM</i>	Error Vector Magnitude
<i>FDM</i>	Frequency Division Multiplexing
<i>FM</i>	Frequency Modulation
<i>FP</i>	Fabry-Perot
<i>FTTH</i>	Fiber To The Home
<i>FWM</i>	Four Wave Mixing
<i>IM</i>	Intensity Modulation
<i>IMD</i>	Inter-Modal Dispersion
<i>IP3</i>	third-order Intercept Point
<i>ISI</i>	Inter-Symbol Interference

<i>ITU</i>	International Telecommunication Union
<i>LASER</i>	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
<i>LED</i>	Light-emitting diodes
<i>LTE</i>	Long Term Evolution
<i>MIMO</i>	Multiple-Input Multiple-Output
<i>MLM</i>	Multiple-Longitudinal Mode
<i>MMF</i>	Multi Mode Fiber
<i>MS</i>	Mobile Station
<i>MZI</i>	Mach-Zehnder Interferometer
<i>MZM</i>	Mach-Zehnder Modulator
<i>NDSF</i>	Non-Dispersion Shifted Fiber
<i>O-E</i>	Opto-Electronic
<i>OMI</i>	Optical Modulation Index
<i>PM</i>	Phase Modulation
<i>PMD</i>	Polarization Mode Dispersion
<i>PolM</i>	Polarization Modulation
<i>PON</i>	Passive Optical Network
<i>QAM</i>	Quadrature Amplitude Modulation
<i>RBS</i>	Radio Base Station
<i>RF</i>	Radio Frequency
<i>RIN</i>	Relative Intensity Noise
<i>RoF</i>	Rádio over Fiber
<i>RU</i>	Remote Unit
<i>SBS</i>	Simulated Brillouin Scattering
<i>SCM</i>	SubCarrier Multiplexing/Modulation
<i>SFDR</i>	Spurious-Free Dynamic Range
<i>SLM</i>	Single-Longitudinal Mode
<i>SMF</i>	Single Mode Fiber
<i>SNR</i>	Signal to Noise Ratio
<i>SPM</i>	Self Phase Modulation
<i>SRS</i>	Simulated Raman Scattering
<i>SSB</i>	Single Side Band
<i>TEM</i>	Transversal ElectroMagnetic
<i>UL</i>	Uplink
<i>UMTS</i>	Universal Mobile Telecommunications System
<i>UWB</i>	Ultra WideBand
<i>V-MIMO</i>	Virtual MIMO
<i>VCSEL</i>	Vertical-Cavity Surface Emitting Laser

WDM Wavelength-Division Multiplexing
WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access
XPM Cross Phase Modulation

Capítulo 1

Introdução

A evolução tecnológica tem vindo a acentuar-se bastante nos últimos anos, dando origem a novas tecnologias e novos serviços, nomeadamente nas comunicações sem fios e comunicações ópticas. As novas tecnologias e serviços emergentes têm requisitos cada vez mais exigentes, tais como velocidade de transmissão elevada, elevada largura de banda e elevada mobilidade, justificando a aposta nas comunicações sem fios e comunicações ópticas, que apresentam estas características.

Nas comunicações eléctricas actuais existe uma necessidade de utilizar frequências cada vez mais elevadas, de forma a disponibilizar maior largura de banda e a aliviar a utilização do espectro em frequências mais baixas, que se encontra sobrecarregado. No entanto, a utilização de frequências mais elevadas torna os sistemas mais complexos e mais sujeitos às suas limitações intrínsecas.

Assim, a utilização das comunicações ópticas satisfaz a necessidade de elevada largura de banda, pois utiliza frequências elevadas, ao passo que as comunicações sem fios satisfazem as necessidades de mobilidade nas comunicações. A tecnologia de Rádio sobre fibra (*Radio over Fiber*, RoF) é uma solução que tem as vantagens das comunicações ópticas e das comunicações sem fios, disponibilizando o melhor das duas tecnologias.

1.1 Comunicações ópticas

Nas comunicações ópticas a informação é transmitida utilizando feixes de luz. No espectro electromagnético a gama óptica está situada entre os 50nm (gama ultravioleta) e os 100 μ m (gama infravermelho), tal como apresentado na figura 1.1. No entanto, para as comunicações em fibras ópticas apenas é utilizada a gama dos 800nm aos 2550nm, devido à menor atenuação dos sinais nesta gama [1].

As comunicações de dados sobre fibra óptica trazem grandes vantagens devido à elevada largura de banda disponível, que é aproximadamente de 50THz [1]. Esta elevada largura de banda traduz-se numa elevada capacidade dos sistemas de transmissão óptica, pois segundo o

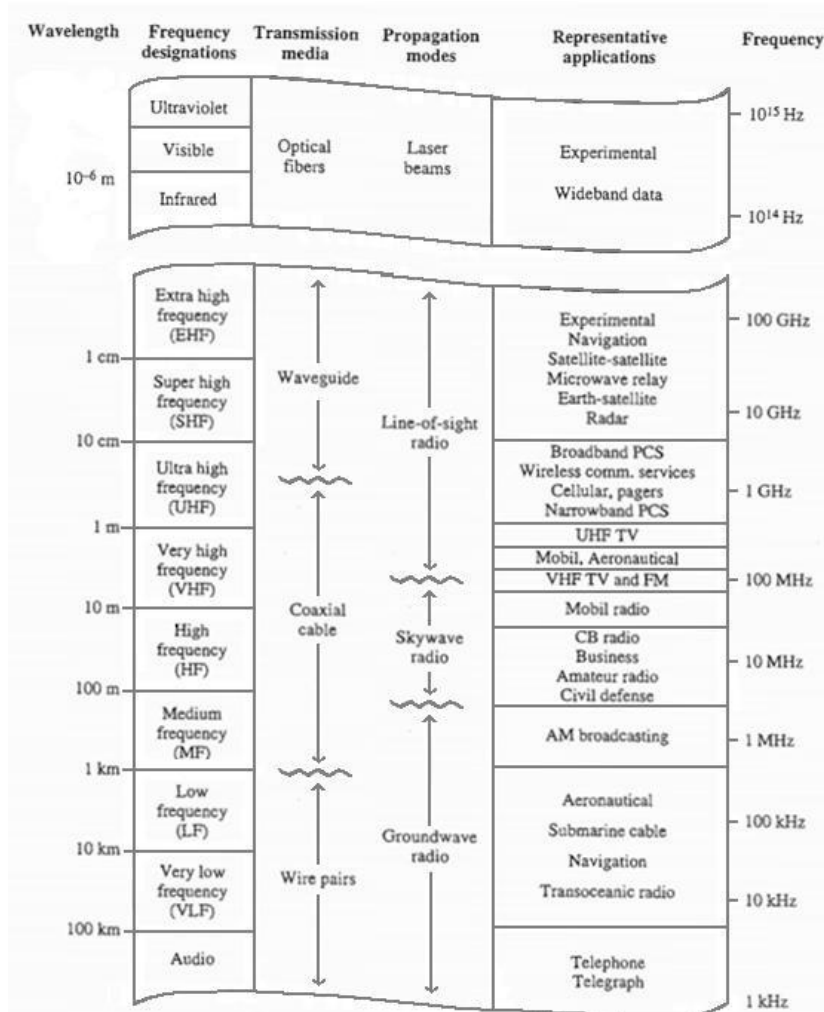


Figura 1.1: Exemplos de aplicações para as várias frequências do espectro electromagnético [2].

teorema de *Shannon-Hartley* a capacidade de um sistema é proporcional à sua largura de banda [2].

O espaço livre também pode ser utilizado como meio de transmissão óptico, dando origem às comunicações ópticas sem fios. No entanto este tipo de comunicação torna-se limitada devido à necessidade de linha de vista e à elevada atenuação existente. Na actualidade as comunicações ópticas sem fios são bastante utilizadas para as comunicações entre satélites, devido à existência de linha de vista mesmo para distâncias muito elevadas [3].

Desde o aparecimento do primeiro laser, desenvolvido por Maiman [4] em 1960, as comunicações ópticas têm apresentado um elevado desenvolvimento. A necessidade de existir um guia de onda capaz de transportar sinais ópticos, levou K. C. Kao e G. A. Hockham, em 1966, a propor a primeira fibra óptica [5]. Mais tarde, em 1970, foi apresentada a primeira fibra óptica dopada, com uma atenuação inferior a 20dB/km [6]. Em 1976, em Atlanta, foi implementado

o primeiro sistema óptico experimental, desenvolvido pela Bell Labs [7]. Em 1988, foi instalado o primeiro sistema óptico transoceânico, ligando a Europa aos EUA [8].

Actualmente, o elevado crescimento do tráfego digital, devido ao número cada vez maior de utilizadores e da maior exigência de largura de banda e capacidade dos novos serviços, levou ao desenvolvimento de técnicas avançadas de modulação e multiplexagem óptica, visando o aumento da eficiência dos sistemas ópticos. Neste momento existem sistemas com capacidade de 100Gb/s por canal e com uma capacidade total de 10Tb/s [9].

A utilização de fibra óptica tem apresentado também um elevado crescimento em redes de acesso local, nomeadamente a tecnologia *Fiber To The Home* (FTTH), devido ao crescimento cada vez maior de assinantes de serviços de banda larga (e.g. IPTV, Internet) e ao crescente interesse dos fornecedores de serviços em abranger um maior número de assinantes, pois a fibra oferece vantagens relativamente à capacidade e largura de banda, comparativamente às tecnologias de acesso local baseadas em condutores de cobre (e.g. ADSL e cabo coaxial) [10]. Na figura 1.2 é apresentado o resultado de um estudo do *International Telecommunication Union* (ITU) sobre o aumento do número de utilizadores de Internet em todo mundo, onde se pode verificar que nos últimos 10 anos o número de utilizadores quadruplicou.

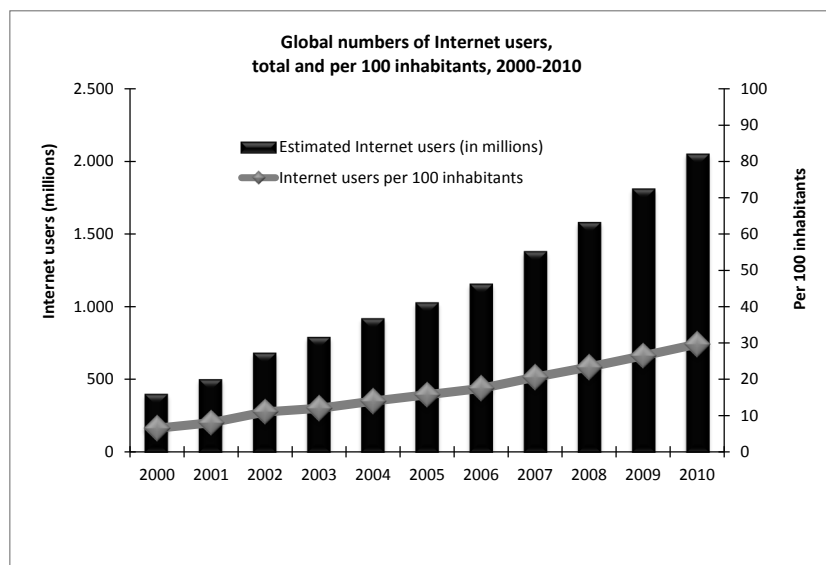


Figura 1.2: Número de utilizadores de Internet nos últimos 10 anos [11].

1.2 Comunicações sem fios

As comunicações sem fios, conhecidas pelo anglicismo *wireless*, são outro modo de transmissão de dados em grande crescimento nos últimos anos, e consiste na propagação de ondas

electromagnéticas em espaço livre. Como se pode verificar na figura 1.1, todas as ondas electromagnéticas apresentadas podem ser transmitidas sem fios, desde a gama áudio até à gama óptica. Por essa razão existem inúmeras aplicações que utilizam comunicações sem fios.

O teorema básico da propagação de ondas electromagnéticas no espaço foi apresentado em 1864 por James C. Maxwell na publicação “*A dynamical theory of the electromagnetic field*”. No entanto, só em 1901 foi efectuada a primeira comunicação sem fios transatlântica, realizada por Guglielmo Marconi [12]. Desde então, durante todo o século XX, as comunicações sem fios tornaram-se cada vez mais comuns, dando origem ao aparecimento de diversas tecnologias, que revolucionaram as telecomunicações e o estilo de vida da população mundial (e. g. Televisão, Rádio, Redes celulares, Internet sem fios).

Actualmente, o desenvolvimento de tecnologias de comunicações sem fios continua a fazer-se a um ritmo elevado, principalmente devido à globalização das comunicações móveis. Na figura 1.3 é apresentado outro gráfico do estudo realizado pelo ITU, onde se verifica que na última década houve um crescimento exponencial de utilizadores de telefones móveis, com um total superior a 5000 milhões de utilizadores em 2010.

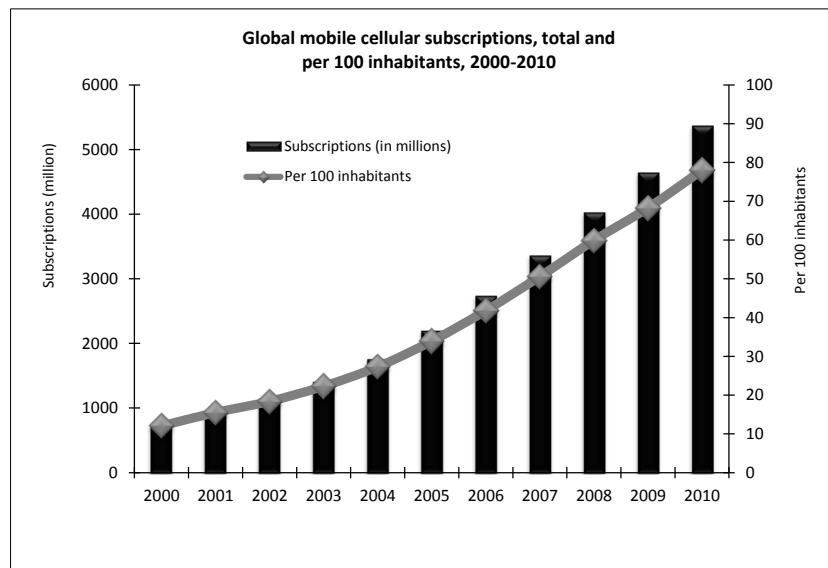


Figura 1.3: Número de utilizadores das redes móveis nos últimos 10 anos [11].

Um dos principais factores para o sucesso das comunicações sem fios é a mobilidade, permitindo que os utilizadores comuniquem em qualquer lugar, sem estarem dependentes da existência de estruturas e pontos de acesso físicos para a comunicação.

A partilha de recursos, nomeadamente nas redes de acesso local, torna-se mais simples nas redes sem fios, pois é possível atribuir recursos aos utilizadores dinamicamente. Como exemplo, pode-se atribuir um canal rádio a um determinado utilizador, sendo mais tarde esse mesmo canal rádio atribuído a outro utilizador. Nas redes com fios existe sempre um canal

físico (i.e. cabo) para cada utilizador, mesmo que este não esteja a utilizar o serviço.

Embora existam todas estas vantagens, a utilização de redes sem fios também apresenta algumas desvantagens relativamente às redes com fios, principalmente em relação às redes ópticas, tais como:

- A elevada atenuação das ondas electromagnéticas no espaço livre quando se comunica com sinais de altas frequências. Esta atenuação aumenta com a frequência e com a distância [13]. Consequentemente, conclui-se que quanto maior for a frequência menor será o alcance do sinal rádio para a mesma potência de emissão;
- A degradação do sinal devido ao multipercusso, pode ser uma desvantagem, pois numa transmissão sem fios existem vários percursos possíveis para um único sinal rádio. Este facto leva a que exista, no receptor, uma interferência entre as várias componentes do sinal, que pode provocar uma degradação do próprio sinal, diminuindo assim a relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio*, SNR);
- O ambiente de propagação bastante variável agrava ainda mais o problema do multipercusso, pois impede que os sistemas compensem os efeitos de multipercusso de um modo totalmente eficiente. Esta variação deve-se principalmente à mobilidade de veículos e pessoas, ao aparecimento de novas construções e às constantes variações climáticas;
- A limitação na largura de banda, devido ao meio físico das transmissões sem fios ser partilhado por vários sistemas. Cada banda de frequências é atribuída a um determinado sistema por uma entidade reguladora. Assim, cada canal tem uma largura de banda limitada, de modo a não interferir com canais vizinhos, o que leva a uma limitação de capacidade do próprio sistema.

1.3 Rádio sobre fibra

RoF é uma tecnologia que permite a transmissão de sinais de radiofrequência (*Radio-Frequency*, RF) em ligações de fibra óptica, permitindo a combinação de redes sem fios e de redes ópticas. Esta combinação permite tirar partido das vantagens dos dois sistemas, obtendo-se assim um sistema com elevada largura de banda, baixa atenuação e elevada mobilidade.

A utilização de RoF permite ainda a simplificação das estações base rádio (*Radio Base Stations*, RBSs), que passam a ser compostas por estações centrais de processamento (*Central Station*, CS) e por unidades remotas (*Remote Units*, RUs), ligadas por fibra óptica. Na figura 1.4 é apresentado um sistema RoF simplificado.

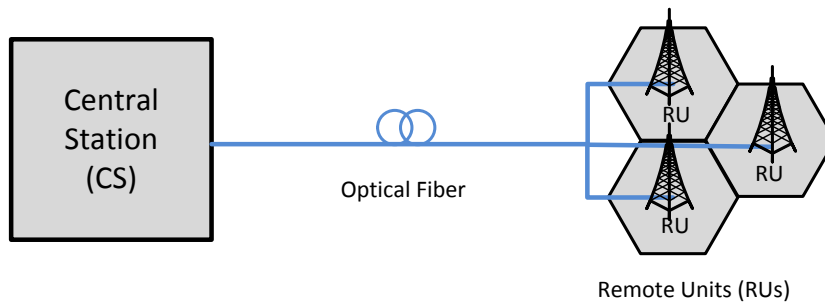


Figura 1.4: Sistema RoF simplificado.

1.3.1 Arquitectura

Um sistema RoF é composto por uma CS e uma ou várias RUs que cobrem uma determinada área. No sentido descendente (*downlink*, DL) a CS realiza a multiplexagem, modulação e todo o processamento do sinal a enviar para a RU. No sentido ascendente (*uplink*, UL) a CS realiza o processo contrário, ou seja, a desmultiplexagem e desmodulação do sinal recebido da RU. Esta centralização de processamento simplifica as RUs, que no DL apenas necessitam de efectuar funções opto-electrónicas (*Opto-Electronics*, O-E) para conversão dos sinais ópticos, passando os sinais a estarem aptos para serem amplificados e radiados pela antena. No UL, os sinais eléctricos que chegam à antena, vindos das estações móveis (*Mobile Station*, MS), têm de ser convertidos para ópticos através de um conversor electro-óptico (*Electro-Optic*, E-O), para serem transmitidos pela fibra óptica para a CS.

O método mais utilizado para transportar sinais RF sobre portadoras ópticas designa-se por Modulação de Intensidade com Detecção Directa (*Intensity Modulation with Direct Detection*, IM-DD). Neste método o sinal RF é utilizado para modular directamente, em intensidade, um díodo laser ou um modulador externo, sendo o sinal óptico resultante transportado por fibra óptica até à RU onde é recuperado por fotodetecção, utilizando um fotodíodo. Na figura 1.5 é apresentado um esquema simplificado de uma ligação RoF unidireccional.

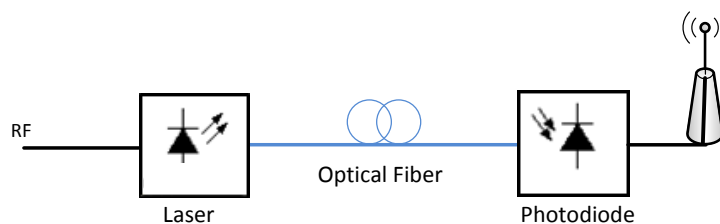


Figura 1.5: Ligação RoF unidireccional simplificada.

1.3.2 Vantagens do RoF

Algumas das vantagens da utilização da tecnologia RoF estão relacionadas com a utilização de fibra óptica para transportar os sinais RF. No entanto, existem outras vantagens relacionadas com o processamento centralizado, característico do RoF. Assim, as principais vantagens do RoF são as seguintes:

- Baixa atenuação;
- Elevada largura de banda;
- Mobilidade no acesso;
- Imunidade a interferências electromagnéticas;
- Fácil manutenção e instalação;
- Consumo de potência reduzido;
- Vários operadores e vários serviços;
- Alocação dinâmica de recursos.

Baixa Atenuação

A baixa atenuação é uma consequência da utilização da fibra óptica como meio de transmissão dos sinais RF. Tal como descrito anteriormente, a comunicação sem fios com sinais de altas frequências apresenta uma atenuação que aumenta bastante com a distância. Em linhas de transmissão também existem perdas elevadas, pois a atenuação aumenta bastante com a frequência, mesmo para distâncias curtas [13]. Por isso, torna-se dispendioso e difícil a comunicação com sinais eléctricos de alta frequência, para distâncias elevadas ou em linhas de transmissão.

A fibra óptica é uma boa solução para o transporte de sinais em RF, pois apresenta baixas perdas por atenuação, independente da frequência do sinal transportado sobre a portadora óptica, tornando viável o transporte de sinais em RF e dispensando os moduladores RF das RUs.

As fibras ópticas comerciais standards, como as fibras mono-modo (*Single Mode Fiber*, SMF), têm perdas por atenuação abaixo de 0,2dB/km e 0,5dB/km nas janelas de transmissão de 1550nm e os 1300nm, respectivamente [1]. Por exemplo, estas perdas são muito inferiores relativamente às perdas provocadas por um cabo coaxial de 50 Ω (RG-214), que são da ordem dos 458dB/km para uma frequência de 2,4GHz [14].

Elevada largura de banda

A elevada largura de banda é outra vantagem do RoF, resultante da utilização da fibra óptica, pois estas oferecem uma enorme largura de banda, devido à combinação de três principais janelas de transmissão, situadas nos comprimentos de onda de 850nm, 1310nm, e 1550nm que apresentam perdas por atenuação relativamente reduzidas, tal como apresentado na figura 1.6.

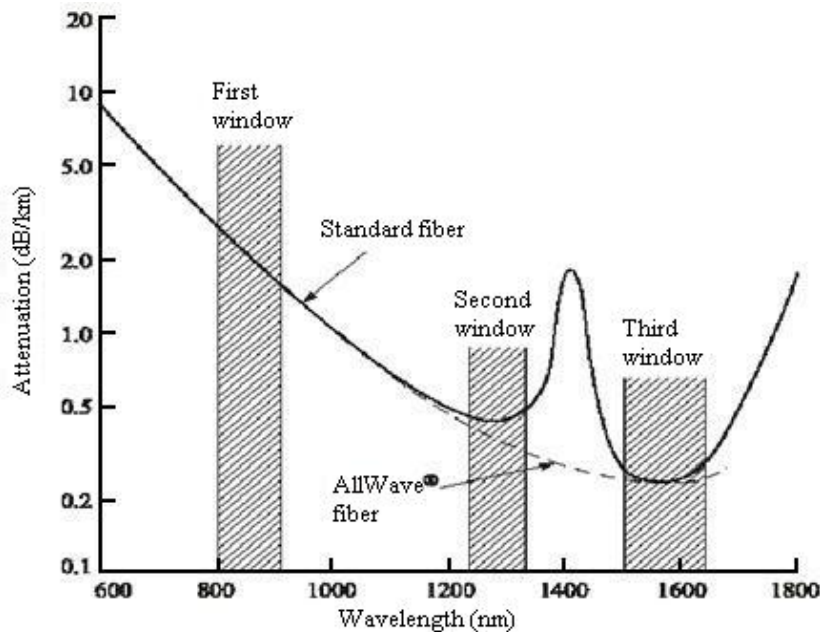


Figura 1.6: Janelas de transmissão da fibra óptica [1].

Nas SMF a combinação das larguras de banda destas três janelas de transmissão podem exceder os 50THz [1]. No entanto, na actualidade os sistemas de transmissão ópticos apenas utilizam uma fracção desta largura de banda, devido a diversas limitações existentes nos componentes ópticos, tais como a dispersão da fibra, que será abordada posteriormente nesta dissertação, e limitação na largura de banda dos amplificadores ópticos [15, 16]. Porém, continuam-se a desenvolver métodos para explorar a capacidade total da fibra, como por exemplo a utilização de modulações e multiplexagens avançadas [17].

Mobilidade no acesso

A mobilidade é uma vantagem resultante da utilização de sinais rádio e da utilização de uma arquitectura de acesso baseada em redes sem fios. Tal como referido anteriormente, as redes sem fios permitem uma maior mobilidade pois dispensa a existência de um meio físico para comunicação. Durante a comunicação a MS pode estar em movimento, não dependendo de um canal de comunicação fixo.

Imunidade a interferências electromagnéticas

Os sinais ópticos, porque utilizam um meio de transmissão dieléctrico, são imunes a interferências electromagnéticas (*ElectroMagnetic Interference*, EMI). Este facto origina também uma grande vantagem relativamente à segurança e privacidade das comunicações, pois torna a ligação imune a “*eavesdropping*”.

Fácil manutenção e instalação

Nos sistemas RoF todo o equipamento complexo está na CS, levando à existência de RUs mais simples. As RUs podem ser apenas constituídas por um fotodiodo, um amplificador RF e uma antena, para o DL, e um laser para o UL. É também necessário um circulador óptico para a multiplexagem dos dois sentidos. Este reduzido número de componentes torna as RUs mais pequenas e mais leves, permitindo a sua fácil instalação e manutenção. Os custos associados são reduzidos substancialmente num sistema RoF, pois as RUs são em número elevado mas têm custos reduzidos [18].

Consumo de potência reduzido

O consumo de potência reduzido é uma consequência de ter RUs com equipamento reduzido [18]. O equipamento mais complexo e energeticamente mais exigente está na CS. As RUs permite também arrefecimento passivo tornando-as energeticamente eficientes [19].

Vários operadores e vários serviços

O sistema RoF permite uma operação flexível, podendo ser transmitidos sinais relativos a vários operadores e serviços, numa única ligação. Com a utilização de técnicas de modulação e multiplexagem óptica é possível tornar o sistema RoF totalmente transparente [20], servindo apenas de meio de transmissão dos sinais.

Alocação dinâmica de recursos

Como as funções de processamento dos sinais estão centralizadas na CS, torna-se possível a alocação dinâmica de recursos. Por exemplo, torna-se possível aumentar a capacidade de uma determinada RU em períodos de maior tráfego de dados, adicionando assim mais canais de comunicação para a RU pretendida.

1.3.3 Limitações do RoF

Os sistemas RoF são fundamentalmente sistemas analógicos, podendo no entanto transmitir sinais digitais. Sendo um sistema analógico torna-se importante ter em conta o ruído e

a distorção típico deste tipo de sistemas, pois estas limitações minimizam a capacidade das transmissões ópticas.

As principais limitações dos sistemas RoF devem-se às limitações dos componentes ópticos, nomeadamente devido ao meio de transmissão que é a fibra óptica. O sistema pode ser limitado pela atenuação, pois embora seja reduzida face a outros sistemas de transmissão, a atenuação na fibra existe e tem de ser considerada, principalmente para distâncias elevadas.

Outra limitação importante é a dispersão. A fibra óptica, não sendo um sistema ideal, introduz dispersão nos sinais ópticos, o que leva ao alargamento dos impulsos. Este alargamento pode provocar uma sobreposição de impulsos vizinhos dando origem a uma Interferência Inter-Simbólica (*Inter-Symbol Interference*, ISI).

Nas fibras ópticas existem também efeitos não-lineares que geram sinais indesejados, causando interferência com os sinais transmitidos. Além destas limitações, também existe limitações devido ao ruído introduzido pela fonte óptica e pelo fotodíodo.

Estas limitações serão descritas com maior pormenor no capítulo seguinte, juntamente com as figuras de mérito utilizadas para as quantificar.

1.3.4 Aplicações do RoF

As aplicações mais propícias para a utilização de RoF são sistemas celulares com células de tamanho reduzido (i.e. micro, pico e nano células), favorecendo a partilha de recursos e respectiva centralização de processamento. O RoF é também propício para tecnologias que tirem partido das vantagens da fibra óptica, como por exemplo tecnologias de banda larga e com frequências elevadas.

As aplicações que melhor reúnem estas condições são aplicações *wireless indoor*, redes móveis de banda larga (e.g. 3^a e 4^a geração móvel), redes de dados sem fios e redes de banda ultra larga (*Ultra WideBand*, UWB). As redes que partilham recursos centralizados podem ter várias antenas remotas controladas por uma única CS, designando-se por Sistema de Antenas Distribuídas (*Distributed Antenna System*, DAS). O RoF pode ser utilizado, devido ao tamanho reduzido das RUs, para reforçar a cobertura de redes sem fios pré-instaladas, em zonas de difícil cobertura (e.g. túneis) onde seja necessário uma pequena célula e onde a instalação de equipamento volumoso não seja viável.

Além destas aplicações, outras aplicações de banda larga e elevados débitos como as redes ópticas passivas (*Passive Optical Network*, PON) são propícias à utilização da fibra como meio de transporte dos sinais rádio, devido à transparência dos sistemas RoF, podendo ser enviados sinais de vários serviços na mesma ligação de fibra óptica e permitindo que as redes PON não necessitem de converter os sinais RF antes destes serem entregues ao cliente final.

Na figura 1.7 é apresentado um cenário de aplicação de um sistema RoF com vários serviços em ambiente *indoor*. Neste exemplo existem varias aplicações como: serviço de televisão, serviço

sistema de fibra óptica baseado em pico-células de redes móveis designado por “*Tekmar Sistemi’s BriteCell*”, que suportava o elevado tráfego gerado pela grande concentração de utilizadores presentes no local. Este sistema teve um excelente desempenho, pois suportou uma elevada quantidade de tráfego, múltiplos operadores e múltiplos serviços, com um elevado sucesso [27]. O sucesso do RoF foi mais tarde comprovado, quando em 2004 nos jogos olímpicos de Atenas foi utilizado um sistema para cobertura móvel não suportado por RoF, tendo sido um fracasso. Este sistema apresentou valores de falhas de serviço de cerca de 20%, enquanto em Sydney tinha sido de apenas 1% [28].

Para o sucesso do RoF durante estes últimos anos também contribuiu o desenvolvimento das redes móveis e redes de banda larga, que gerou um aumento no número de RBSs e pontos de acesso nas redes sem fios [29]. Também a utilização de frequências mais elevadas em redes de banda larga (e.g. 60 GHz) e redes *indoor* [30] tornou os sistemas RoF mais comuns, aumentando assim o número de DAS [31, 32]. As vantagens dos sistemas RoF em ambiente *indoor* eram tais que um estudo efectuado pela *ABI Research* em 2004 [33], previa que em 2009 mais de metade das redes sem fios *indoor*, em todo mundo seriam implementadas sobre fibra óptica.

Algumas tecnologias móveis de última geração, como por exemplo o *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), são bastante associadas ao RoF [34, 35], pois são tecnologias de grande mobilidade e elevados débitos. O RoF associado ao WiMAX é visto também como uma tecnologia que vem reduzir os custos a cargo das operadoras devido à redução da complexidade das estações base [36]. Estas vantagens e estudos efectuados sobre o WiMAX podem também ser associados às redes móveis de terceira geração designadas por *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), pois a tecnologia UMTS também apresenta alta mobilidade e um elevado número de células [37].

No último ano, com a implementação dos sistemas de quarta geração de redes móveis designada por *Long Term Evolution* (LTE) e com os sistemas *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) a serem cada vez mais utilizados, a tecnologia RoF passou a ser também associada a estas tecnologias. Um dos projectos mais recentes relativo à tecnologia RoF é o projecto *FUTON* [38]. Este projecto, iniciado em 2008 e com fim em 2010, teve como objectivo desenvolver e implementar uma arquitectura RoF que permite o tratamento conjunto de informação de várias RBSs, assente no sistema LTE. Assim, reduz-se os custos da implementação de uma rede LTE permitindo mesmo assim débitos elevados e um elevado número de RBSs. Esta arquitectura assenta sobre os conceitos de sistema sem fios de banda larga distribuído (*Distributed Broadband Wireless Systems*, DBWS) e sistema de MIMO virtual (V-MIMO). Os aspectos gerais do projecto FUTON foram apresentados em 2009 [39], sendo no ano seguinte apresentada a sua conclusão [40] e o seu primeiro protótipo [41].

1.4 Objectivos da dissertação

Nesta dissertação pretende-se analisar o desempenho de vários tipos de modulações ópticas analógicas, em particular modulação em intensidade (*Intensity Modulation*, IM) e modulação em fase (*Phase Modulation*, PM), em comunicações de rádio sobre fibra. Será feito um estudo relativamente à qualidade dos sinais recebidos utilizando as diferentes modulações ópticas e também variando alguns parâmetros dos componentes ópticos utilizados.

Serão ainda comparadas várias arquitecturas RoF de baixo custo, utilizando apenas uma fonte óptica centralizada na CS.

1.5 Organização da dissertação

A organização da presente dissertação é a seguinte:

Neste primeiro capítulo foi feita uma breve apresentação das tecnologias de comunicação utilizadas num sistema RoF, bem como apresentado o estado da arte dessas mesmas tecnologias e da própria tecnologia RoF;

No segundo capítulo será apresentada uma revisão geral dos principais componentes utilizados num sistema RoF, e suas limitações. Dar-se-á especial destaque, aos moduladores ópticos, fontes ópticas, fibras ópticas e fotodíodos. Ainda neste capítulo serão apresentadas as figuras de mérito utilizadas para avaliar a qualidade de uma ligação RoF;

No terceiro capítulo será apresentado um estudo sobre as modulações e tipos de multiplexagem abordadas nesta dissertação;

No quarto capítulo será utilizado o simulador VPIsystems® para efectuar algumas simulações que comprovem os estudos efectuados das várias modulações em comunicações RoF;

Por fim, no quinto capítulo serão apresentadas as conclusões retiradas na realização desta dissertação e apresentados alguns tópicos de trabalho futuro.

1.6 Contribuições originais da dissertação

Com base neste trabalho foram efectuadas as seguintes publicações:

- Almeida, M.; Pinho, P.; Ramos, F.M.V.; “Evaluation of a Low-Cost Radio-Over-Fiber System”; IX Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors (SEON2011), 1 Julho 2011, Aveiro, Portugal
- Almeida, M.; Pinho, P.; Ramos, F.M.V.; “A Comparison of Low-Cost Radio-Over-Fiber Systems”; Conference on Electronics, Telecommunications and Computers (CETC 2011), 24-25 Novembro 2011, Lisboa, Portugal

Capítulo 2

Sistema Rádio sobre Fibra

Um sistema RoF pode ser descrito de uma forma simples por um sinal RF que é modulado sobre uma portadora óptica, sendo transmitido numa fibra óptica e recebido por um fotodetector. Estes sistemas têm o objectivo de simplificar as RBSs, pois toda a geração e processamento dos sinais transmitidos está centralizado numa CS, sendo os sinais apenas enviados por uma fibra de forma transparente, até uma RU, onde na sua forma mais simples pode ser descrita apenas por um sistema de conversão O-E/E-O e uma antena para recepção e emissão dos sinais RF.

2.1 Componentes de um sistema Rádio sobre Fibra

Num sistema RoF a portadora óptica pode ser gerada por um *Light-emitting diodes* (LED) ou por um *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER).

O laser pode ser modulado directamente com o sinal RF ou utilizando um modulador externo. Caso se opte pela modulação externa, a portadora óptica é gerada por um laser de onda contínua (*Continuous Wave, CW*). Os tipos de modulação utilizada nos sistemas RoF são modulações ópticas analógicas. Estas podem ser: modulação em intensidade (*Intensity Modulation, IM*); modulação em frequência (*Frequency Modulation, FM*); modulação em fase (*Phase Modulation, PM*) ou modulação em polarização (*Polarization Modulation, PolM*). Podem ainda ser transmitidos vários sinais RF sobre uma única ligação RoF, recorrendo à multiplexagem óptica. Os tipos de multiplexagem associados às comunicações ópticas podem ser: SCM, onde cada sinal RF é modulado com uma frequência eléctrica diferente antes de modular a portadora óptica, ou multiplexagem por divisão de comprimento de onda (*Wavelength-division multiplexing, WDM*) onde cada sinal é enviado na fibra num comprimento de onda diferente.

Quanto à fotodeteccção, esta pode ser directa ou coerente, sendo que a mais comum nos sistemas RoF, tipicamente sistemas IM-DD, é a fotodeteccção directa. A fotodeteccção directa pode ser efectuada através de um fotodíodo.

Na figura 2.1 é apresentado um exemplo de um sistema RoF, utilizando modulação directa e na figura 2.2 é apresentado um exemplo utilizando modulação externa em intensidade. Nestes

casos, o sinal RF transmitido é modulado em *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

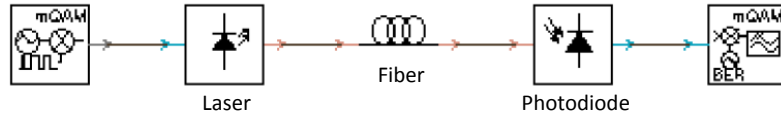


Figura 2.1: Componentes de uma ligação RoF utilizando modulação directa.

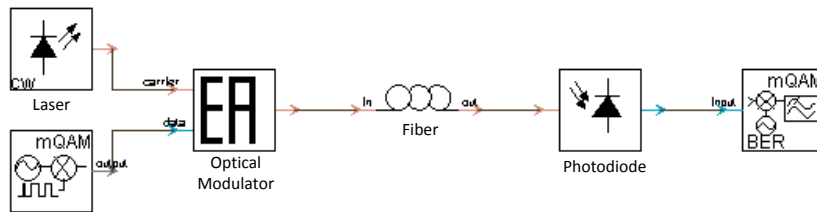


Figura 2.2: Componentes de uma ligação RoF utilizando modulação externa.

2.1.1 Fibra óptica

A fibra óptica é o principal meio de transmissão em sistemas de comunicação óptica e o componente chave de uma ligação RoF. As fibras ópticas são constituídas por um núcleo dieléctrico cilíndrico envolto numa bainha também dieléctrica, mas com índice de refração inferior ao do núcleo, para que seja possível o transporte da luz sem que esta se dissipe para o exterior. Pode ainda existir um revestimento exterior para protecção das duas camadas interiores, tal como apresentado na figura 2.3.

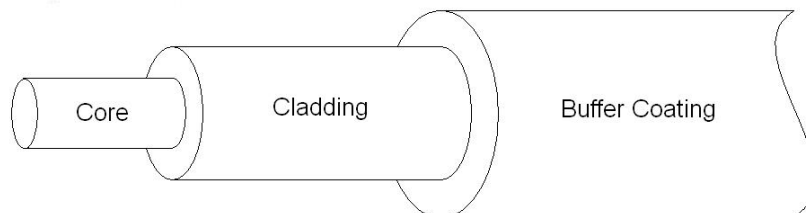


Figura 2.3: Constituição de uma fibra óptica.

As fibras ópticas além de SMFs podem ser fibras multimodo (*Multi-Mode Fibers*, MMFs) dependendo do número de modos transportados. As SMF apenas transportam a luz no modo

fundamental, pois o diâmetro do seu núcleo, cerca de 8 a $10\mu\text{m}$ [15], é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda transmitido, não permitindo assim a propagação dos restantes modos de transmissão. As MMFs tem um núcleo maior, na ordem dos 50 a $85\mu\text{m}$ [15], permitindo vários modos de transmissão, introduzindo assim o efeito de dispersão intermodal (*Inter-Modal Dispersion*, IMD). Este efeito deve-se ao facto dos vários modos de propagação percorrerem distâncias diferentes, o que faz com que cheguem ao receptor em diferentes instantes temporais. O índice de refração do núcleo nas MMFs pode variar em degrau ou gradualmente, fazendo com que os raios ópticos se propaguem descrevendo rectas ou curvas, respectivamente, influenciando assim a IMD, como será explicado posteriormente. Na figura 2.4 são apresentados os vários tipos de fibras ópticas existentes.

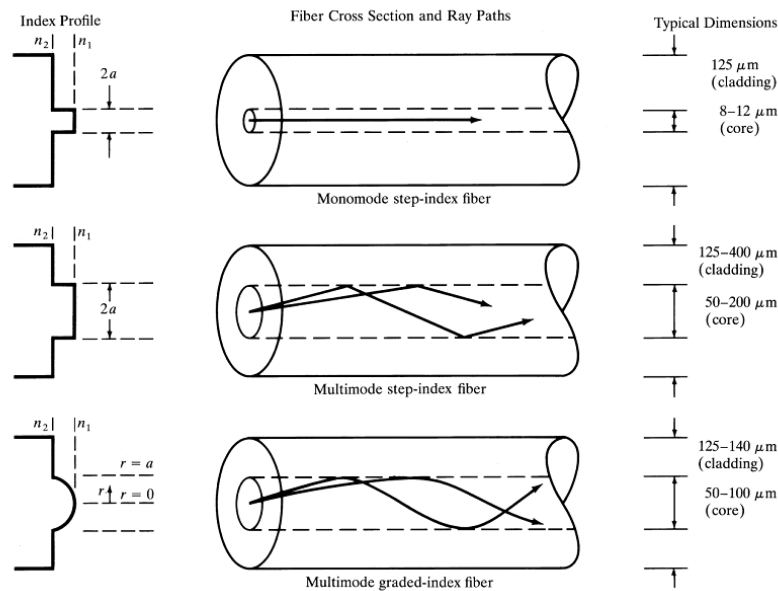


Figura 2.4: Tipos de fibras ópticas [1].

As comunicações ópticas são afectadas por vários efeitos lineares e não lineares existentes na fibra. Os efeitos lineares, como é o caso da atenuação e dispersão, não dependem da intensidade do sinal óptico e afectam comprimentos de onda específicos. Os efeitos não lineares dependem da potência do sinal óptico gerando interferências e intermodulações em diferentes comprimentos de onda, limitando assim as transmissões [1, 15]. Os principais tipos de dispersão existentes nas fibras ópticas são:

- IMD, existente apenas nas MMFs;
- Dispersão Cromática (*Chromatic Dispersion*, CD);
- Dispersão do modo de polarização (*Polarization Mode Dispersion*, PMD).

As principais não-linearidades presentes nas fibras ópticas são:

- Espalhamentos estimulados de *Raman* (*Simulated Raman Scattering*, SRS) e de *Brioullin* (*Simulated Brillouin Scattering*, SBS);
- Auto-modulação de fase (*Self Phase Modulation*, SPM);
- Modulação de fase cruzada (*Cross Phase Modulation*, CPM ou XPM);
- Mistura de quatro ondas (*Four Wave Mixing*, FWM).

Atenuação

Tal como referido anteriormente, a atenuação nas fibras ópticas é bastante reduzida nas janelas de transmissão existentes. No entanto, a atenuação existe e tem de ser considerada, pois é um factor limitativo nas comunicações ópticas, principalmente em distâncias elevadas, pois a potência óptica do sinal ao longo da fibra decai exponencialmente com a distância, tal como definido na equação 2.1:

$$P_{out} = P_{in}e^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

Onde, P_{out} é a potência do sinal à saída da fibra, P_{in} é a potência do sinal injectado na fibra, α é o coeficiente de atenuação e L é o comprimento da fibra.

A atenuação na fibra tem origem nas perdas por absorção, espalhamento e curvatura. As perdas por absorção material são baixas nas janelas de transmissão de interesse e são causadas por imperfeições existentes na estrutura atómica do vidro [1].

As perdas por espalhamento de *Rayleigh* são essencialmente devido a pequenas variações na densidade do material, originadas durante o fabrico da fibra. Existem pequenas flutuações da densidade da sílica que originam flutuações no índice de refração da fibra, sendo esta a principal causa da atenuação nas janelas de transmissão de interesse [1].

Por fim, as perdas por curvatura existem devido a micro curvaturas causadas por imperfeições na fibra ou simplesmente devido a curvas efectuadas na fibra óptica, aquando da sua instalação. Quanto menor for o raio da curva maiores são as perdas por curvatura [1].

Dispersão na fibra

Dispersão Intermodal: A IMD é a principal limitação das MMFs. Este tipo de dispersão ocorre devido aos vários modos se propagarem com diferentes velocidades. A consequência é um alargamento dos impulsos na recepção óptica, que leva a uma sobreposição dos símbolos

adjacentes. Esta sobreposição aumenta com a distância, o que leva a uma limitação na distância máxima para um determinado débito binário [15].

Existem dois tipos de MMFs, as fibras de índice gradual e as fibras de índice em degrau. Nas fibras de índice gradual o índice de refração da fibra decresce gradualmente, fazendo com que os modos que se propagam em caminhos mais curtos sejam mais lentos, diminuindo assim a diferença do tempo de propagação entre diferentes modos e reduzindo assim o espalhamento dos impulsos [15]. Na figura 2.5 é possível ver a relação entre a distância e o débito para os dois tipos diferentes de MMFs.

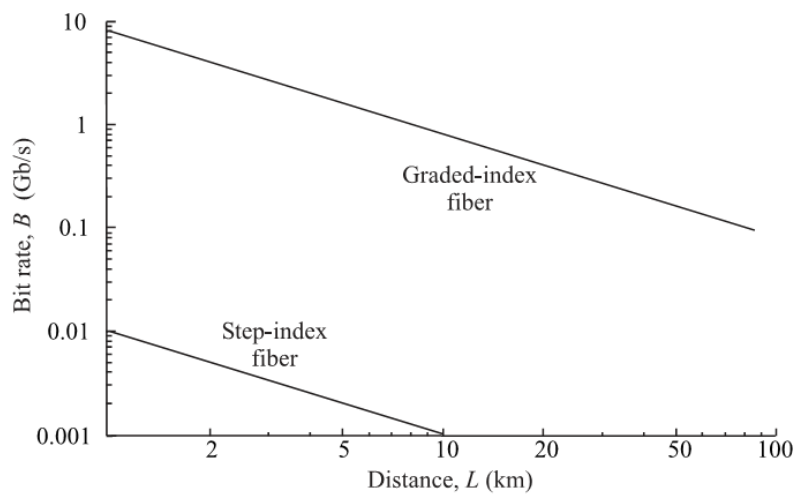


Figura 2.5: Relação entre débito e distância nas MMFs [15].

Dispersão Cromática: Um sistema SMF é normalmente limitado pela CD. Este tipo de dispersão acontece devido à várias componentes espectrais dos sinais terem diferentes velocidades de propagação.

A CD tem duas componentes, a dispersão material e a dispersão do guia de onda. A dispersão material acontece devido ao índice de refração da sílica depender do comprimento de onda [15]. No entanto, na segunda janela de transmissão a dispersão material é nula, designando-se por janela de dispersão zero.

A dispersão do guia de onda acontece devido à energia do sinal se propagar não só pelo núcleo mas também pela bainha. A distribuição de energia entre o núcleo e a bainha depende da frequência [15]. Este tipo de dispersão pode ser controlado durante o fabrico da fibra, possibilitando a produção de fibras de dispersão deslocada (*Dispersion Shifted Fibers*, DSFs), que são fibras onde a curva de dispersão têm valor zero na terceira janela de transmissão, onde a atenuação é menor. Na figura 2.6 é apresentada a contribuição de cada componente para a CD em função do comprimento do onda.

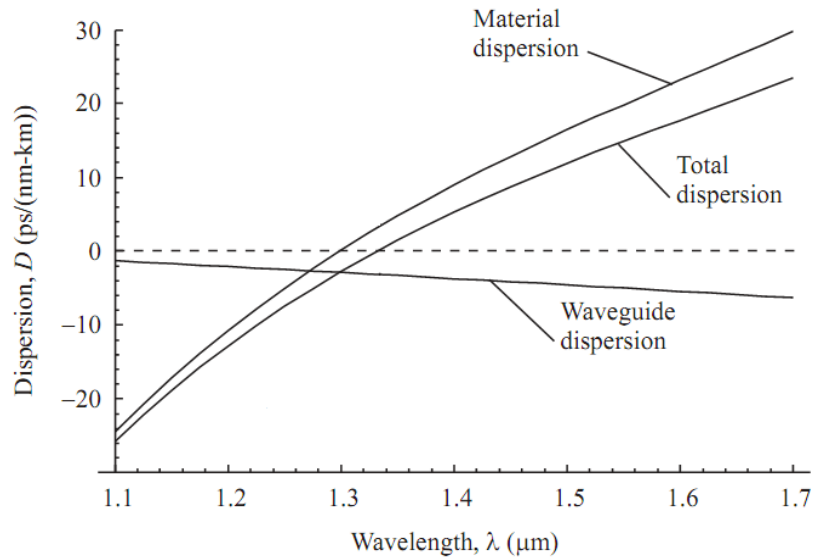


Figura 2.6: Dispersão cromática em função da frequência [15].

Dispersão do modo de polarização: Uma onda transversal electromagnética (TEM) tem duas componentes de polarização perpendiculares entre si e ambas perpendiculares à direcção de propagação [15].

Numa fibra óptica perfeitamente circular, as duas componentes de polarização têm a mesma velocidade de propagação. No entanto, as fibras ópticas não são totalmente simétricas, são birrefringentes e a sua forma varia ao longo da fibra. Assim, os dois modos de propagação propagam-se com velocidades diferentes dando origem a um alargamento dos pulsos. Este fenómeno de dispersão é ilustrado na figura 2.7, onde se pode verificar o alargamento do pulso devido ao modo de polarização vertical se propagar mais rápido que o modo de polarização horizontal.

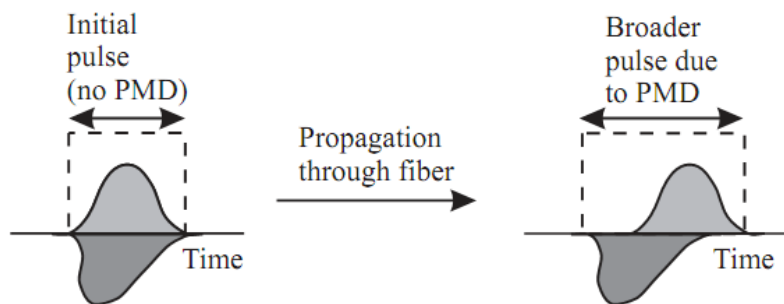


Figura 2.7: Dispersão de polarização [15].

Não linearidades da fibra

Espalhamentos estimulados de *Raman* e de *Brioullin*: O SRS e o SBS podem ser considerados como não-linearidades das fibras, tendo maiores efeitos para potências ópticas mais elevadas [21]. O SRS ocorre quando existe uma absorção de energia num determinado comprimento de onda sendo essa energia depois retransmitida num outro comprimento de onda, existindo assim um deslocamento da energia óptica na frequência. Este efeito pode dar origem a um ganho óptico, sendo assim de especial interesse na produção de amplificadores de *Raman* em fibra [15]. Quanto ao SBS, surge quando potências altas interagem com vibrações acústicas da sílica, criando assim uma zona de difracção que provoca a reflexão, de uma percentagem da potência transmitida, para o transmissor [15].

Auto-modulação de fase: A própria variação da potência óptica do sinal provoca uma variação no índice de refracção que induz um desvio de fase no sinal, proporcional à intensidade do pulso [15]. Este desvio de fase é designado pelo anglicismo *chirping*. A presença de *chirp* aumenta os efeitos do alargamento/compressão dos pulsos devido à CD, limitando ainda mais a transmissão. No entanto, se a dispersão for pequena o efeito da SPM é mínimo.

Modulação de fase cruzada: A XPM é uma não-linearidade causada pela propagação de vários sinais sobre a mesma fibra óptica, sendo importante por isso em sistemas WDM. O *chirp* induzido no sinal passa a depender da potência de todos os sinais transmitidos na fibra [15].

Este tipo de não-linearidade é uma das principais limitações de um sistema WDM, pois nestes sistemas a SPM de cada canal vai contribuir para a XPM de um único canal. Esta limitação pode ser minimizada através do aumento do espaçamento entre canais ou através da existência da CD que faz variar a velocidade de propagação dos diferentes canais [15].

Mistura de quatro ondas: A FWM é outra não-linearidade típica em sistemas WDM, pois a existência de vários sinais pode dar origem a outros sinais indesejados, afectando bastante os sistemas WDM. Assim, ao transmitir-se sinais nas frequências f_i , f_j e f_k , são originados sinais indesejados nas frequências f_{ijk} , onde:

$$f_{ijk} = f_i \pm f_j \pm f_k \quad (2.2)$$

A FWM é originada pela baixa linearidade da fibra para potências ópticas elevadas. Essa não linearidade designa-se por efeito de *Kerr*¹.

Ao contrário da SPM e da XPM, que são significativos para sistemas de débitos elevados, a FWM não depende do débito. No entanto, depende bastante do espaçamento entre canais e da

¹O efeito de *Kerr* é uma variação do índice de refracção de um material devido à presença de um campo eléctrico.

CD. Com a diminuição do espaçamento entre canais ou da CD, aumentam os efeitos da FWM [15], o que se torna particularmente problemático em sistemas WDM denso (*Dense WDM*, DWDM), onde o espaçamento entre canais é reduzido.

2.1.2 Moduladores electro-ópticos

Nos sistemas RoF, os moduladores electro-ópticos têm a função de modular uma portadora óptica gerada por um laser CW com o sinal RF que se pretende transmitir. O sinal RF que é colocado na entrada eléctrica do modulador altera as suas propriedades materiais, nomeadamente o índice de refacção, alterando assim as propriedades do guia de onda do modulador [21]. Como consequência disto, o sinal óptico à saída do modulador aparece modulado com o sinal RF de entrada. Os moduladores ópticos têm banda larga e baixa frequência de *chirp*, permitindo assim a transmissão de sinais RF com frequência de várias dezenas de GHz [21]. Por outro lado, a utilização de moduladores electro-ópticos em detrimento de modulação directa faz aumentar os custos, a dimensão dos circuitos e o consumo de energia.

Tal como existem vários tipos de modulações (IM, PM, FM e PolM) também existem vários tipos de moduladores. No âmbito desta dissertação apenas serão explicados os moduladores de intensidade e de fase, pois são os utilizados no estudo apresentado.

Moduladores de intensidade

Os principais tipos de moduladores electro-ópticos de intensidade são: moduladores *Mach-Zehnder* (*Mach-Zehnder Modulators*, MZM) de *lithium niobate* ($LiNbO_3$) ou de semicondutores III-V compostos, *ElectroAbsorption Modulators* (EAMs) e moduladores de polímeros [21, 42].

Moduladores de $LiNbO_3$: O $LiNbO_3$ é o material mais comum no fabrico de dispositivos electro-ópticos, nomeadamente moduladores de fase, moduladores de polarização e moduladores MZ de intensidade [42]. Este material tem um bom desempenho electro-óptico pois o seu índice de refacção varia linearmente com a tensão do sinal de entrada, levando a uma mudança de fase óptica que pode ser convertida em modulação de intensidade através de um interferómetro MZ (*Mach-Zehnder interferometer*, MZI). Esta variação do índice de refacção em cristais ópticos com um campo eléctrico, designa-se por efeito electro-óptico [42]. Na figura 2.8 está representada a arquitectura de um MZM.

Este tipo de moduladores apresenta um bom acoplamento com SMF. A desvantagem na utilização destes dispositivos em sistemas analógicos é a necessidade de uma tensão eléctrica elevada [43]. Este modulador permite frequências bastante altas mas o seu desempenho em banda larga está dependente da tensão eléctrica. Como será explicado na secção relativa às figuras de mérito de um sistema RoF, as elevadas tensões provocam elevado ruído, prejudicial em sistemas analógicos.

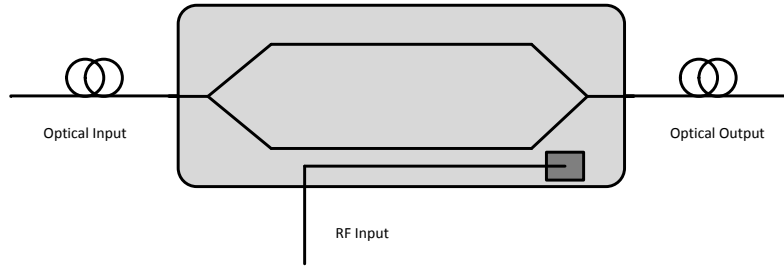


Figura 2.8: Modulador MZ.

Moduladores de semicondutores III-V: Outro material típico no fabrico de moduladores electro-ópticos são os semicondutores III-V compostos (e.g. InGaAs), que embora tenham um coeficiente electro-óptico aproximadamente 20 vezes menor do que os semicondutores $LiNbO_3$, permitem uma modulação eficiente [42] devido a técnicas de fabricação que fornecem uma grande flexibilidade no controle da geometria do guia de onda para que o modo guiado possa ser limitado a uma região muito pequena (2-3nm), permitindo assim obter um elevado campo eléctrico mesmo com uma pequena voltagem aplicada numa pequena abertura do dieléctrico [42]. Além disto, os moduladores de semicondutores III-V podem ser integrados com outros componentes do mesmo material, como por exemplo lasers, reduzindo assim os custos e o tamanho no fabrico [21, 42].

ElectroAbsorption Modulators: Outro tipo de moduladores ópticos de intensidade são os EAMs, sendo este o segundo tipo de moduladores mais comuns [43]. Estes moduladores geram modulação através de efeitos de *ElectroAbsorption*, que indicam uma mudança do coeficiente de absorção óptica nos materiais devido a um campo eléctrico, resultando directamente numa modulação de intensidade. O comprimento de onda da portadora óptica é seleccionado de modo a que o semiconductor seja transparente, quando não existe campo eléctrico. Assim, quando o campo eléctrico aumenta, a portadora óptica vai sofrendo uma atenuação progressiva, gerando a modulação óptica. Actualmente os materiais base para o fabrico de EAMs são os semicondutores III-V [42]. Como estes materiais são utilizados para o fabrico de muitos outros componentes eléctricos é possível integrar estes moduladores com outros componentes. Os EAMs são aproximadamente 200 vezes menores [21] que um MZM de $LiNbO_3$, com a mesma largura de banda e eficiência. Normalmente requerem uma menor tensão de condução para altas frequências e são menos sensíveis a polarização do que os MZMs de $LiNbO_3$. A desvantagem destes moduladores é a sua baixa potência de saturação e requisitos de controlo de temperatura [21].

Moduladores de polímeros: Também é possível fabricar moduladores electro-ópticos utilizando polímeros. Estes moduladores trazem grandes vantagens comparativamente aos ou-

tros moduladores apresentados, pois o índice de refração dos polímeros é aproximadamente o de uma fibra monomodo, obtendo-se assim uma boa correspondência entre o modo do guia de onda do polímero e o modo da fibra óptica [42]. Também a produção destes moduladores pode ter custos reduzidos pois os guias de onda de polímeros podem ser fabricados sobre camadas de substratos baratos [21, 42]. No entanto, esta tecnologia ainda está em desenvolvimento, sendo ainda muito imatura comparando com as outras tecnologias apresentadas.

Moduladores de fase

Os moduladores de fase são fabricados utilizando semicondutores de $LiNbO_3$, tal como referido anteriormente. A modulação de fase tem um princípio idêntico à modulação em amplitude, ou seja, consegue-se através do efeito electro-óptico. Ao ser aplicada uma determinada tensão na entrada RF do modulador ocorre uma alteração correspondente no índice de refração extraordinário², provocando uma variação de fase. No entanto, ao contrário dos moduladores de intensidade, esta variação de fase não é convertida em variação de amplitude. Com uma polarização linear na entrada óptica, o ângulo de polarização dessa entrada com o respectivo eixo óptico o cristal modulador determina como será afectada a saída. Assim, se a polarização de entrada estiver alinhada verticalmente, a saída sofrerá uma mudança de fase pura, sem qualquer alteração no estado de polarização. Se o alinhamento for horizontal não ocorre qualquer alteração electro-óptica. Se o alinhamento for de 45° , a polarização de saída passa de linear a elíptica [44].

2.1.3 Fontes ópticas

Tal como referido anteriormente, existem dois tipos de fontes ópticas utilizadas em sistemas de comunicações ópticas que são: os LEDs e os lasers.

LEDs: Os LEDs baseiam-se em díodos de junção PN que produzem luz de forma espontânea. As principais vantagens dos LEDs, comparativamente aos lasers, são o seu baixo custo e o seu elevado tempo de vida. Sendo as principais desvantagens as menores potências de emissão, a elevada largura espectral, a baixa eficiência e tempo de resposta de emissão baixo que limita os ritmos de transmissão e a largura de banda dos sinais modulantes. Normalmente, os LEDs são uma boa escolha como fonte óptica em sistemas de transmissão curtos, normalmente utilizando fibras multimodo e com ritmos de transmissão reduzidos, aproximadamente dos 100 aos 200Mbit/s [1].

²Índice de refração associado ao eixo óptico

Lasers: Os lasers utilizados em sistemas ópticos como fontes ópticas são quase exclusivamente díodos lasers de semicondutores. Ao contrário dos LEDs os lasers são fontes de emissão estimulada, o que faz com que a radiação emitida seja temporalmente e espacialmente coerente, reduzindo assim a largura espectral do feixe emitido. Esta redução de largura espectral permite uma alta eficiência de acoplamento com a fibra, podendo ainda produzir uma potência óptica elevada, comparativamente aos LEDs.

A constituição típica de um laser de semicondutor é: um núcleo semicondutor com capacidade de emitir radiação (*Lasing Medium*), uma fonte de energia externa (*Excitation Device*) capaz de estimular os átomos desse núcleo para a emissão de luz e uma cavidade ressonante limitada por dois espelhos, onde são reflectidos os fótons, um dos espelhos é totalmente reflector (*Reflective Mirror*) e o outro é semireflector (*Partially-Transmitting Mirror*) para que possa haver emissão de luz. Na figura 2.9 é apresentado a estrutura geral de um laser.

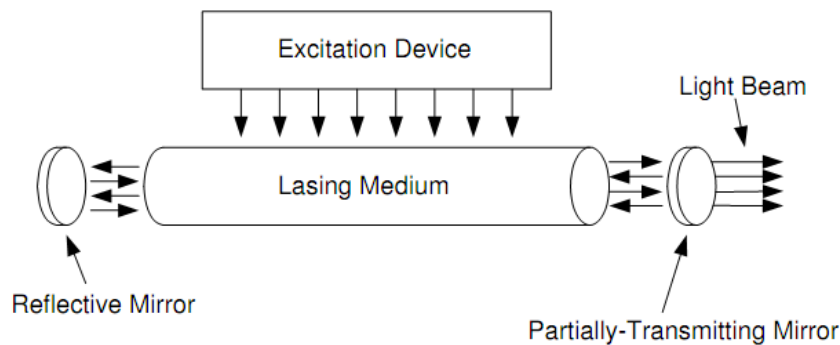


Figura 2.9: Estrutura geral de um laser [45].

As três principais características dos lasers que podem influenciar as transmissões ópticas são a largura de feixe, o *chirp* e o ruído de intensidade relativa (*Relative Intensity Noise*, RIN). A largura de feixe, também designada por largura espectral, indica os comprimentos de onda emitidos pelos lasers. Quanto menor, mais selectivo é o laser, tornando-o num laser monomodo. O *chirp* consiste em variações indesejáveis no comprimento de onda da luz emitida, levando a um aumento da largura de banda do sinal emitido. O *chirp* é mais reduzido quando se utiliza modulação externa pois é utilizado um laser CW, possibilitando uma maior taxa de transmissão. O RIN é apresentado como um ruído provocado pelas oscilações na intensidade do feixe emitido. Este ruído é normalmente originado por emissões espontâneas de fótons e têm maior importância em sistemas que utilizem IM.

Tal como referido anteriormente, num sistema RoF a fonte de luz pode ser modulada directamente ou externamente utilizando um dos moduladores ópticos, apresentados na subsecção anterior, e um laser CW que emite uma onda, com frequência óptica e amplitude constantes.

Caso seja utilizada modulação directa é necessário utilizar um laser que permita ser directamente modulado. Existem três lasers principais de modulação directa, utilizados em sistemas RoF: Lasers *Fabry-Perot* (FP), lasers de realimentação distribuída (*Distributed Feedback*, DFB) e lasers de emissão de superfície com cavidade vertical (*vertical-cavity surface emitting laser*, VCSEL) [21].

Lasers *Fabry-Perot*

Os lasers FP são os de design mais simples, pois têm uma estrutura idêntica à apresentada na figura 2.9, onde a cavidade ressonante se designa por cavidade FP. Os lasers FP emitem em múltiplos modos longitudinais (*Multiple-Longitudinal Mode*, MLM). Um laser MLM têm normalmente um espectro largo, cerca de 10nm [15], tal como apresentado na figura 2.10. Este tipo de laser é utilizado preferencialmente em sistemas de curta distância.

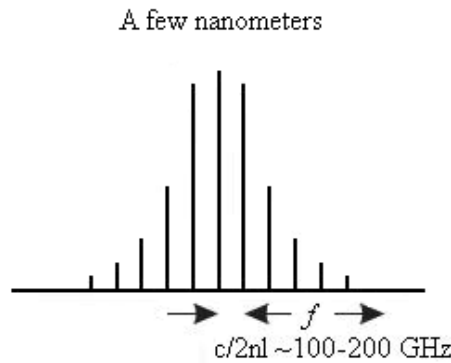


Figura 2.10: Espectro de um laser MLM [15].

Em sistemas de débitos binários elevados, a largura espectral deve ser a mínima possível, de modo a minimizar o efeito de dispersão cromática, devido aos vários comprimentos de onda terem diferentes velocidades de propagação. Assim, deve-se utilizar um laser de um único modo longitudinal (*Single-Longitudinal Mode*, SLM), com um espectro idêntico ao apresentado na figura 2.11, para sistemas onde os requisitos são mais exigentes. Para se obter apenas um modo longitudinal pode-se utilizar mecanismos de filtragem na estrutura do laser de modo a obter apenas o comprimento de onda desejado.

Lasers de realimentação distribuída

Ao contrário dos lasers FP, onde a luz é reflectida na extremidade da cavidade, nos lasers DFB o retorno da luz é efectuado de uma forma distribuída ao longo da cavidade, através de uma variação periódica na largura da cavidade, formando uma zona ondulada, na cavidade de

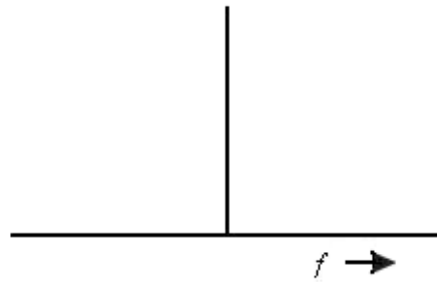


Figura 2.11: Espectro de um laser SLM [15].

ressonância. Nesta zona ondulada a onda irá sofrer uma série de reflexões que irão contribuir para a onda transmitida, originando vários comprimentos de onda. No entanto, o comprimento de onda cujo valor é o dobro do período da ondulação será fortemente amplificado, sobrepondo-se em amplitude aos restantes modos transmitidos [15]. Este laser é actualmente o laser SLM mais comum e mais robusto, apresentando uma elevada largura de banda [21] e sendo por isso bastante utilizado em sistemas de débitos binários elevados. Na figura 2.12 é apresentado a estrutura de um laser DFB, onde é possível ver a ondulação da cavidade.

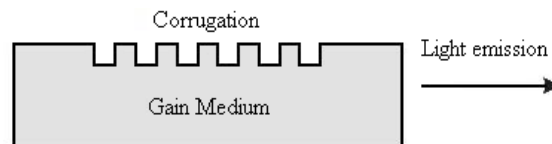


Figura 2.12: Estrutura de um laser DFB [15].

Lasers de emissão vertical

Ao contrario dos lasers descritos anteriormente, que emitem longitudinalmente, os VCSELs são laser que emitem verticalmente, tal como apresentado na figura 2.13.

Os VCSELs são SLM pois a sua cavidade é curta o suficiente para que apenas um modo esteja dentro da largura de banda do laser. Um dos problemas dos VCSELs é a elevada resistência à passagem da corrente injectada, levando a um elevado aquecimento e à necessidade de refrigeração térmica eficiente. Isto acontece porque os materiais semicondutores utilizados para fazer os reflectores têm uma baixa condutividade térmica. No entanto, têm sido efectuados estudos para melhorarem os materiais utilizados e as técnicas associadas [15]. A vantagem da utilização de VCSELs, relativamente aos outros lasers descritos, está em permitir um melhor e

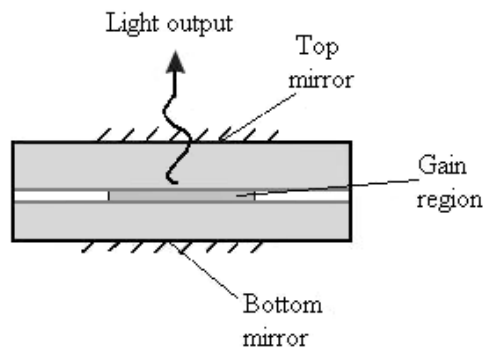


Figura 2.13: Estrutura de um laser VCSEL [15].

mais simples acoplamento com a fibra e na sua capacidade de serem integrados em *arrays* com múltiplos comprimentos de onda. Os VCSELs são utilizados em sistemas de baixo custo e em sistemas de curtas distâncias em fibras multimodo [15].

Lasers de onda continua

Os lasers CW são utilizados em sistemas de modulação externa. Os dois tipos de lasers CW mais utilizados em sistemas de comunicação com modulação externa são os lasers de semicondutores DFB e os lasers de fibra dopada [43], pois as suas potências de emissão e RIN são as adequadas para uma ligação deste tipo. Caso se pretenda uma elevada potência de emissão, pode-se ainda utilizar um oscilador de fibra dopada com érbio seguido de um amplificador de fibra dopada com érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*, EDFA) [43].

2.1.4 Fotodíodos

Em sistemas de comunicações ópticas é necessária a utilização de fotodetectores na recepção, para a conversão dos sinais ópticos em sinais eléctricos. Um fotodetector é constituído por material semiconductor. Os fótons incidentes num semiconductor são absorvidos pelos electrões na banda de valência, ficando com mais energia e passando para a banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência [15]. Estes pares electrão-lacuna geram uma corrente eléctrica quando é aplicada uma tensão externa ao semiconductor. Esta corrente gerada designa-se por fotocorrente.

Para melhorar a eficiência dos semicondutores na fotorecepção são criados os fotodíodos, que são semicondutores de junção PN, aumentando assim as transições de electrões devido ao aparecimento de uma zona de depleção. Existem dois tipos principais de fotodíodos, os fotodíodos PIN e os fotodíodos de avalanche (*Avalanche Photodiode*, APD).

Fotodíodos PIN

Um fotodíodo PIN é um fotodíodo de semiconductor PN, onde foi introduzido um semiconductor intrínseco (I) entre os semicondutores do tipo P e N, gerando uma zona de depleção maior. Esta região intrínseca é muito maior quando comparada com as regiões do tipo P e N, garantindo que grande parte da luz é absorvida nesta zona, aumentando assim a eficiência e a responsividade. Estes dois parâmetros são as principais características de um fotodetector, sendo que a eficiência é a razão entre o número de pares electrão-lacuna gerados e o número de fótons incidentes, e a responsividade é a razão entre a fotocorrente produzida e a potência óptica incidente. A estrutura de um fotodíodo PIN está representada na figura 2.14.

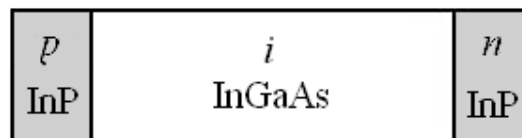


Figura 2.14: Estrutura de um fotodíodo PIN [15].

Em sistemas RoF os foto-díodos PIN são bastante utilizados, devido à sua largura de banda e linearidade, satisfatórias para muitas aplicações [21]. No entanto, a necessidade de banda larga e o facto da linearidade do fotodíodo poder ser afectada devido a saturação, trazem alguns problemas na construção dos fotodíodos. A largura de banda de um fotodíodo PIN depende do tempo de transição na zona de depleção. Ao reduzir a zona de depleção, diminui-se o tempo de transição, levando a um aumento da largura de banda. No entanto, a redução da zona de depleção reduz a eficiência e a responsividade do fotodíodo, portanto terá de existir um compromisso entre a largura de banda e a eficiência. A quantidade de luz incidente pode também saturar o fotodíodo, provocando distorções não lineares no sinal de saída. Assim, é necessário haver um compromisso entre a potência da luz recebida pelo fotodíodo e a sua linearidade [21].

Fotodíodos de avalanche

A diferença entre um fotodíodo PIN e um APD está no número de electrões gerados pela incidência de um único fóton. Enquanto que no fotodíodo PIN, um único fóton gera a libertação de um electrão, num APD podem ser libertados vários electrões. Isto acontece pois existe uma região de campo eléctrico elevado, levando a que o electrão libertado tenha energia suficiente para libertar outros electrões, provocando um efeito de avalanche. O número médio de electrões libertados pela incidência de um fóton é designado por ganho multiplicativo. Este ganho multiplicativo aumenta bastante a responsividade e eficiência do receptor [15]. No entanto, tal

como no caso do fotodíodo PIN, a largura de banda diminui com o tempo de transição, sendo que no caso dos APDs o tempo de transição é o tempo desde que o primeiro electrão é libertado até ao último electrão libertado, aumentando bastante o tempo de transição relativamente aos fotodíodos PIN. A estrutura de um fotodíodo APD está representada na figura 2.15.

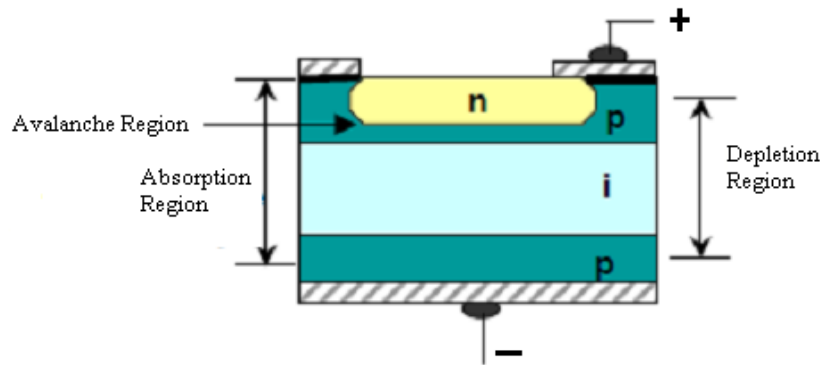


Figura 2.15: Estrutura de um fotodíodo APD.

2.2 Figuras de mérito de um sistema Rádio sobre Fibra

Nesta secção serão abordadas as figuras de mérito utilizadas para avaliar o desempenho de um sistema RoF. Sendo o sistema RoF um sistema de transmissão de sinais RF, as figuras de mérito utilizadas terão de ser adequadas à avaliação de sinais RF. Neste caso, como serão transmitidos sinais eléctricos modulados em QAM, serão também utilizadas medidas adequadas para a avaliação deste tipo de sinais.

2.2.1 Ganho e relação sinal-ruído

Um sistema RoF, tal como outros sistemas de comunicação de dados, duas das principais figuras de mérito são o ganho do sistema e a SNR à entrada do receptor.

O ganho de um sistema RoF é dado pela razão entre a potência do sinal à saída do sistema (P_{out}) e a potência do sinal à saída da fonte (P_{in}). Este ganho indica o quanto o sinal é atenuado ou amplificado durante a sua transmissão pelo sistema. O ganho deve ser assumido como sendo intrínseco, ou seja, sem amplificação externa. Assim, o ganho de um sistema RoF é dado por:

$$g = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.3)$$

Os limites do ganho do sistema estão fundamentalmente relacionados com a fotodeteccção directa, pois o sinal que chega ao receptor não pode ser inferior à sensibilidade do receptor nem maior que a sua tensão de saturação.

A SNR define a qualidade dos sinais digitais e é dada pela razão entre a potência do sinal (P_{out}) e a potência do ruído (N_{out}) à saída do sistema. Normalmente os sistemas têm de manter uma SNR mínima para que a recepção possa ser efectuada respeitando uma qualidade mínima. A SNR é dada por:

$$SNR = \frac{P_{out}}{N_{out}} \quad (2.4)$$

O ruído num sistema RoF pode ter origem em várias fontes. As principais fontes que contribuem para o aumento do ruído num sistema RoF são: o ruído térmico, o RIN dos emissores ópticos, o ruído gerado pelo modulador óptico e o ruído gerado pelos receptores ópticos. Nos receptores ópticos, além do ruído térmico existe sempre um outro ruído gerado por uma corrente escura, conhecida pelo anglicismo *Dark Current*. Esta corrente deve-se à agitação térmica na estrutura dos semicondutores, levando electrões para a banda de condução mesmo que não exista recepção de fotões.

2.2.2 Linearidade

A linearidade de um sistema RoF é bastante importante pois é uma das principais causas da limitação dos sistemas. A gama dinâmica (*Dynamic Range*, DR), uma das principais características de avaliação do desempenho de um sistema RoF, é muitas vezes afectada pela não-linearidade dos transmissores ópticos [46]. A DR é um indicador importante nestes sistemas pois os sinais RF têm elevadas gamas de potências devido aos efeitos de desvanecimento, quando transmitidos em espaço livre.

Em sistemas que utilizam modulação externa, a não-linearidade tem origem na função de transferência não-linear dos moduladores ópticos [21, 46]. Se a este problema forem adicionadas não-linearidades da fibra óptica e dos componentes electrónicos, temos um sistema total muito limitado pela não-linearidade. A linearidade de uma ligação RoF é quantificada através do ponto de intersecção de terceira ordem (*third-order Intercept Point*, IP3) e da gama dinâmica livre de espúrias (*Spurious-Free Dynamic Range*, SFDR).

O IP3 representa o ponto de intersecção do prolongamento das rectas que representam a potência de saída da frequência fundamental e da terceira harmónica, em função da potência de entrada. Como se pode verificar na figura 2.16, na zona de sinal fraco a primeira, segunda e terceira harmónicas, variam 1dB, 2dB e 3dB, respectivamente, para cada dB de entrada. Para potências maiores as harmónicas sofrem compressão. Para a caracterização do sistema apenas se considera a terceira harmónica, pois a segunda ordem não causa dependência na frequência fundamental, por se encontrar por norma fora da largura de banda num sistema com largura de banda inferior a uma oitava [47]. Existem ligações que utilizam larguras de banda superiores a uma oitava, mas são operadas de forma a que apenas seja importante a intersecção de terceira ordem [43].

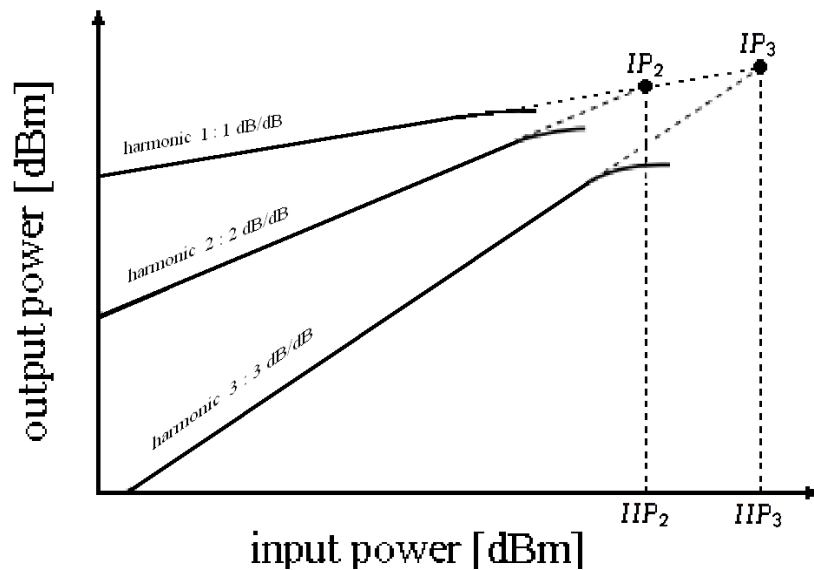


Figura 2.16: Variação da potência de saída das primeiras três harmônicas em função da potência de entrada [47].

A SFDR representa a gama potências de entrada, onde a potência de saída da frequência fundamental é superior ao patamar de ruído na saída e a potência de saída da terceira harmônica está abaixo desse mesmo patamar de ruído. Esta medida caracteriza, assim, não só a linearidade mas também o ruído.

2.2.3 Diagrama de constelação e vector de erro

Nas modulações M-QAM os símbolos resultantes da modulação têm informação de fase e amplitude. Estes símbolos são assim mapeados num diagrama de constelação, onde num eixo é representada o valor da componente em fase (*In-phase*, I) e no outro o valor da componente em quadratura (*Quadrature*, Q). Na figura 2.17 é apresentada uma constelação 16-QAM, onde existem 16 símbolos diferentes com 4 bits cada um.

A constelação de um sinal M-QAM é afectada devido aos vários factores limitativos do sistema, sendo os principais a existência de ruído e a não-linearidade. Estes dois factores fazem com que na recepção os símbolos apareçam deslocados da sua posição de referência, podendo facilmente ser confundidos com um símbolo vizinho, originando um erro na desmodulação do sinal. Quanto maior for a constelação, menor é o espaçamento entre símbolos vizinhos permitindo uma menor margem de erro. A presença de ruído e respectiva redução da SNR provoca um desvio dos símbolos, dentro de uma zona na vizinhança do ponto de referência. A não-linearidade e respectiva compressão do ganho em potências mais elevadas afecta os símbolos mais perto da extremidade da constelação pois são os que têm maior potência. Estes símbolos

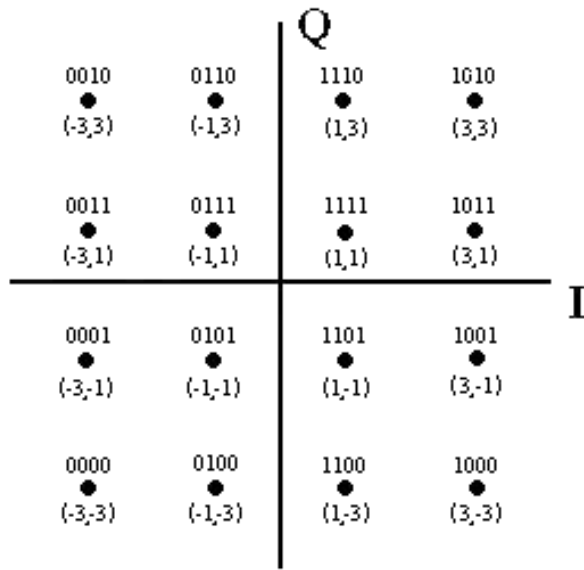


Figura 2.17: Constelação 16-QAM [47].

tendem a afastar-se do ponto de referência em direcção à origem da constelação. Existe ainda outro tipo de distorção que afecta a recepção dos símbolos, designado por desvio de fase. O desvio de fase provoca um desvio dos símbolos sobre a sua componente de fase, ou seja, os símbolos tendem a se afastar do seu ponto de referência, aproximando-se de outros símbolos com mesma amplitude mas fase diferentes. Este efeito provoca uma rotação na constelação recebida. Na figura 2.18 podemos verificar os vários desvios que os símbolos podem sofrer.

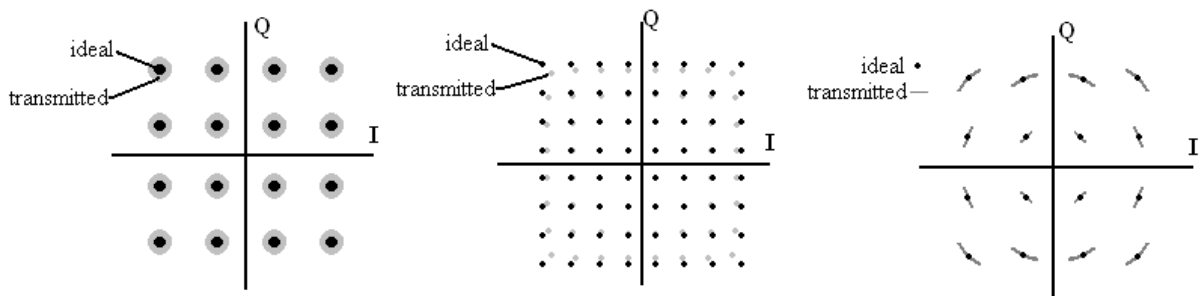


Figura 2.18: Constelações distorcidas devido às várias limitações do sistema [47].

O desvio de fase e o desvio de amplitude sofrido pelos símbolos na recepção podem ser contabilizadas através de um vector de erro (*Error Vector Magnitude*, EVM). Esta medida quantifica a distância entre o valor do símbolo recebido e o seu valor de referência, tanto em fase como em amplitude. A definição de EVM é apresentada na figura 2.19.

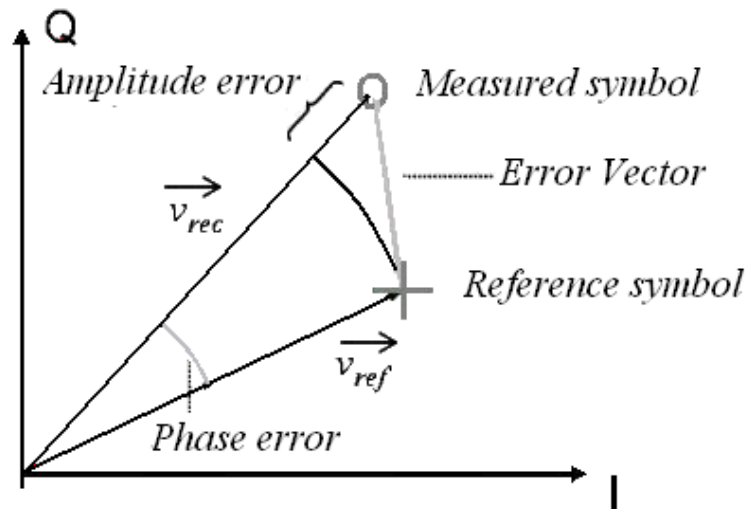


Figura 2.19: Ilustração da definição de EVM [21].

O EVM máximo permitido depende do sistema e da constelação utilizada. Normalmente estes valores são definidos nas recomendações de cada sistema.

Capítulo 3

Multiplexagem e modulações ópticas

Neste capítulo serão abordados os modos de multiplexagem SCM e WDM, embora no âmbito desta dissertação apenas seja utilizado o modo SCM. No que refere às modulações ópticas serão descritas as modulações IM e PM, as únicas utilizadas no âmbito desta dissertação.

3.1 Multiplexagem de sub-portadora

A multiplexagem SCM pode ser considerada uma técnica não só de multiplexagem mas também de modulação, dependendo se são transmitidos vários ou apenas um sinal RF sobre uma única portadora óptica.

Relativamente à SCM como técnica de multiplexagem, esta permite modular vários sinais eléctricos em portadoras RF com frequências diferentes, designadas por sub-portadoras, antes de modularem a portadora óptica. Os vários sinais modulados em diferentes sub-portadoras podem ser designados por canais RF. Estes canais são somados, obtendo-se assim um sinal composto por vários canais RF multiplexados em frequência (FDM). Este sinal é então modulado na portadora óptica e transmitido na fibra óptica. Na recepção, o sinal é recebido por um fotodetector, desmodulado e filtrado de modo a obter a informação de cada canal. Na figura 3.1 é exemplificado um sistema de multiplexagem de sub-portadora.

A SCM pode também ser utilizada como técnica de modulação, pois pode-se enviar apenas um sinal modulado em RF, passando a estar numa frequência adequada à transmissão por uma antena. Este é o princípio básico dos sistemas RoF, o que torna esta técnica de modulação/multiplexagem a base dos sistemas RoF. Na figura 3.2 está representada o esquema de modulação SCM.

O espectro óptico resultante da modulação de um sinal RF sobre uma portadora óptica, consiste em três frequências principais. A frequência da portadora óptica (f_o), onde está centrado o espectro óptico, e duas frequências laterais ($f_o + f_R$) e ($f_o - f_R$), onde f_R é a frequência da portadora RF.

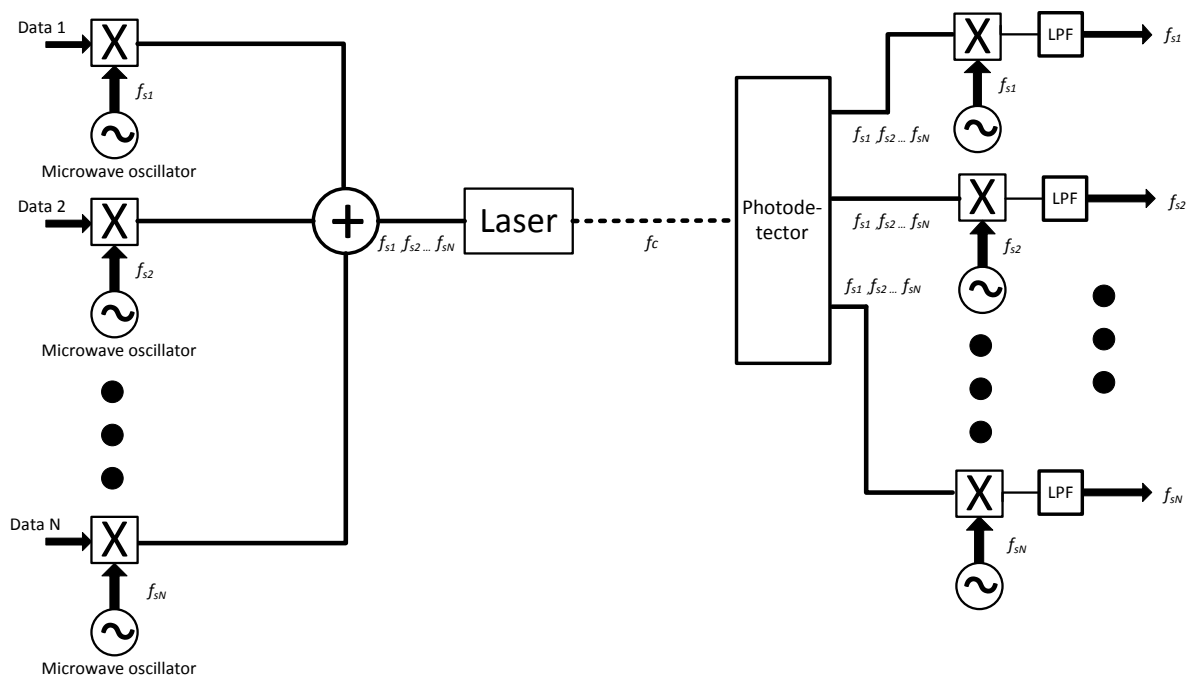


Figura 3.1: Multiplexagem de sub-portadora.

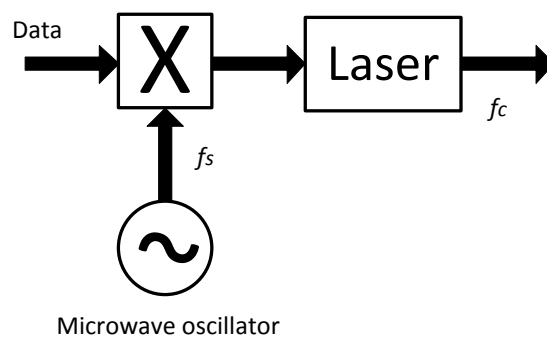


Figura 3.2: Modulação de sub-portadora.

De seguida é apresentado um exemplo de uma ligação RoF utilizando SCM, onde é transmitido um sinal RF com uma frequência de 10GHz sobre uma portadora óptica de 193.1THz. Na figura 3.3 está o esquema de ligação e na figura 3.4 está representado o espectro óptico relativo à transmissão, onde são visíveis as três frequências ópticas resultantes.

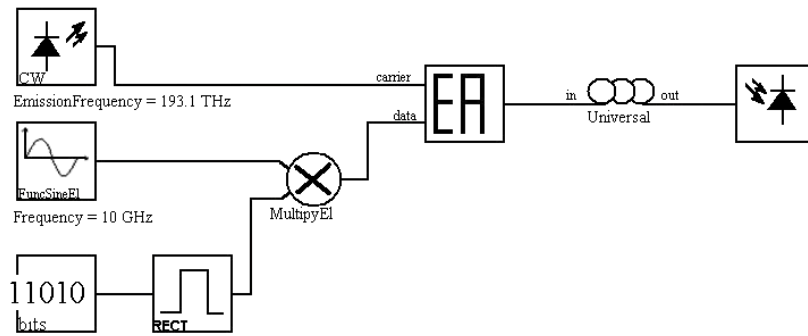


Figura 3.3: Esquema de uma ligação RoF utilizando SCM e modulação externa.

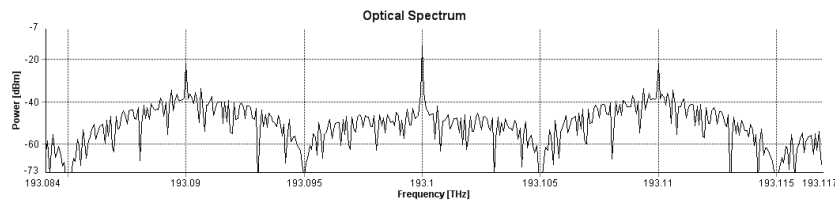


Figura 3.4: Espectro óptico de um sinal RF modulado sobre uma portadora óptica.

A utilização de SCM começou por ser bastante comum em sistemas de TV por cabo (*Cable Television* ou *Community Antenna Television*, CATV) [21, 48, 49]. A associação de SCM à técnica de WDM, deu origem aos sistemas híbridos SCM-WDM e permitiu assim um aumento significativo de capacidade e largura de banda [50].

3.1.1 Vantagens de SCM

A grande vantagem da utilização de SCM como modulação em sistemas RoF é tornar possível o conceito de RoF de uma forma bastante simples. Basicamente, tal como referido anteriormente, o conceito de RoF é implementado com a utilização de SCM, onde qualquer sinal eléctrico pode ser modulado com uma portadora RF e seguidamente modulado numa portadora óptica.

Como multiplexagem óptica a grande vantagem de SCM é a possibilidade de transmitir vários sinais, sobre uma única portadora óptica, de uma forma transparente. Isto é, numa única portadora óptica podem-se multiplexar sinais analógicos, digitais ou mesmo sinais com

diferentes modulações. Como a multiplexagem e demultiplexagem do sinal RF é efectuada no domínio eléctrico, traz a vantagem de utilizar uma tecnologia mais desenvolvida e com menores custos.

3.1.2 Desvantagens e limitações de SCM

A grande desvantagem da utilização de SCM é o não aproveitamento das capacidades totais da fibra óptica, nomeadamente a largura de banda. No entanto, tal como referido anteriormente, esta desvantagem é ultrapassada recorrendo aos sistemas SCM-WDM.

Quanto às limitações da utilização de SCM, são a não-linearidade e o efeito de *clipping*. Num sistema SCM, a fidelidade do sinal depende da linearidade da relação entre a potência óptica e a corrente eléctrica [15]. Existe uma corrente eléctrica de condução média que define a potência óptica média. Assim, para manter uma potência óptica baixa, a corrente eléctrica também deve ser baixa. Tal compromisso pode ser visualizado na figura 3.5.

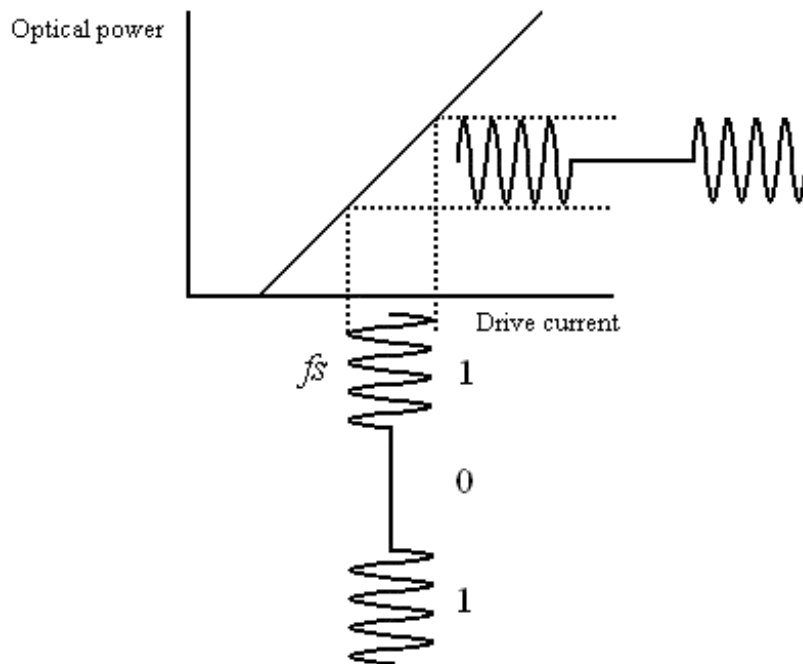


Figura 3.5: Linearidade entre a potência óptica e a corrente eléctrica [15].

A existência de produtos de intermodulação é uma limitação da técnica SCM. Tal como no efeito FWM, se forem utilizadas três frequências (f_i , f_j e f_k), serão gerados sinais nas frequências $f_i \pm f_j \pm f_k$, causando o efeito de *crosstalk* [15]. O aumento da potência óptica permite manter os produtos de intermodulação baixos. Assim, os sistemas SCM necessitam de utilizar lasers particularmente lineares.

O *clipping* é outra limitação de SCM, que provoca distorção nos sinais. O efeito de *clipping* está representado na figura 3.6. Como se pode verificar existe um corte do sinal quando a corrente eléctrica desce abaixo de um determinado limiar. Nesse caso a potência óptica fica com valor zero.

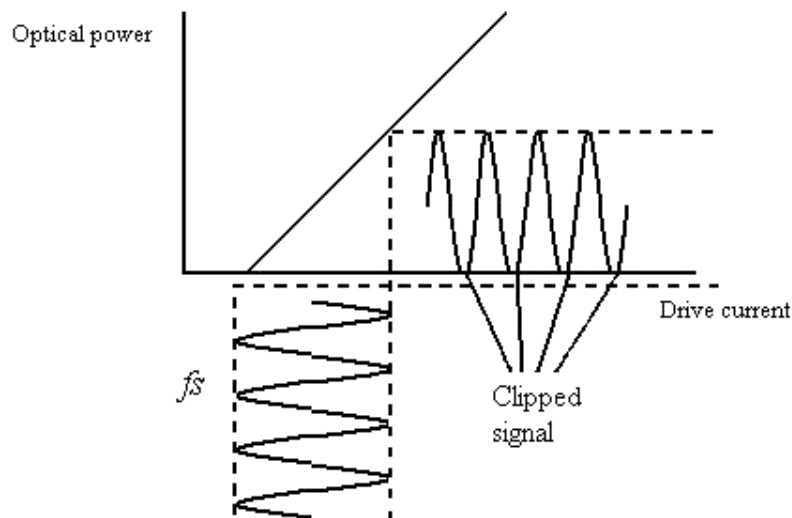


Figura 3.6: Efeito de *clipping* [15].

Isto acontece quando são multiplexados vários sinais e estes se encontram em fase, aumentando assim a amplitude total e conseqüente potência óptica. No entanto, para um número elevado de sinais multiplexados a probabilidade de estarem todos em fase é muito pequena. Alguns sistemas são projectados para permitirem uma probabilidade de corte pequena, reduzindo os requisitos de potência óptica à custa da introdução de uma pequena distorção no sinal [15].

3.2 Multiplexagem por divisão de comprimento de onda

A multiplexagem WDM é outra técnica de multiplexagem, onde cada sinal eléctrico é enviado sobre uma portadora óptica num determinado comprimento de onda. Esta técnica é equivalente ao FDM no domínio eléctrico. A diferença entre o WDM e o SCM está na divisão de frequências, onde no SCM a divisão é efectuada ao nível eléctrico e enviado sobre uma única portadora óptica, enquanto que no WDM a divisão é efectuada ao nível óptico, sendo utilizadas várias portadoras ópticas.

3.2.1 Vantagens de WDM

A utilização de WDM em simultâneo com RoF (WDM-RoF) tem vindo a aumentar de interesse com a crescente necessidade de capacidade e largura de banda das redes ópticas [51], pois

a utilização de WDM permite explorar a elevada capacidade e largura de banda disponível nas fibras ópticas, principalmente se associada à técnica SCM (SCM-WDM). As redes WDM-RoF permitem ainda atribuir um determinado comprimento de onda a cada estação remota, facilitando a gestão da rede e permitindo a incorporação de novas estações remotas sem efectuar grandes alterações na rede [45]. Esta vantagem torna a utilização de WDM indispensável em ligações entre uma estação central e um elevado número de estações base [52]. Na figura 3.7 é apresentado um exemplo de uma arquitectura RoF utilizando WDM, para o DL.

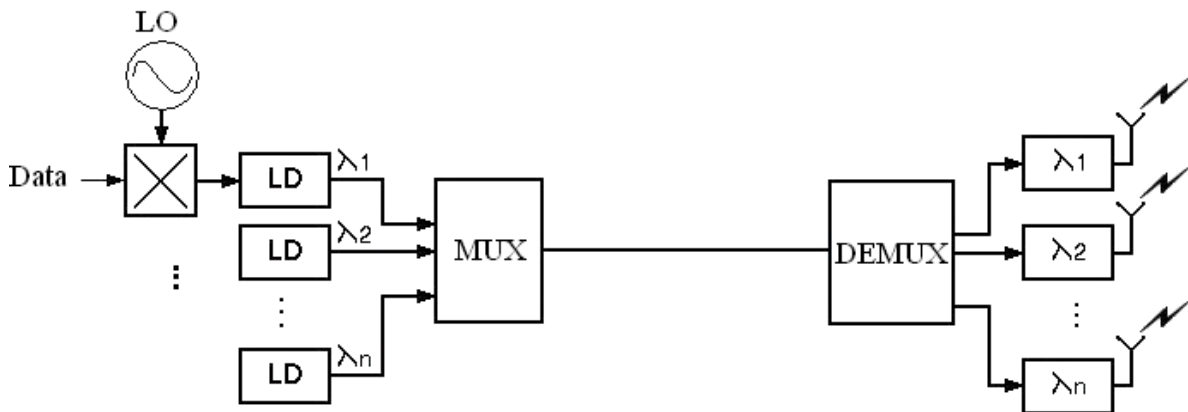


Figura 3.7: Exemplo de uma arquitectura WDM-RoF [45].

3.2.2 Desvantagens de WDM

A utilização de WDM acarreta alguns custos adicionais, pois como a multiplexagem é efectuada ao nível óptico é necessária a introdução de multiplexers e demultiplexers ópticos. No entanto, os principais custos adicionais são introduzidos pela geração das portadoras ópticas. Uma das formas de geração das portadoras ópticas mais simples é a apresentada na figura 3.7, onde são utilizados vários lasers, um para cada comprimento de onda, o que torna o sistema dispendioso quando se necessita de muitos comprimentos de onda [52]. Por este motivo, desde que se utiliza WDM, têm sido efectuados estudos para o desenvolvimento de soluções alternativas para a geração de múltiplos comprimentos de onda, existindo várias soluções actualmente implementadas [52], como por exemplo a utilização de lasers geradores de múltiplos comprimentos de onda.

Outro aspecto a ter em atenção em sistemas WDM-RoF, principalmente quando se associa SCM a WDM ou se utiliza DWDM, é o espaçamento entre portadoras ópticas. Tal como referido anteriormente, ao modular um sinal RF sobre uma portadora óptica são geradas frequências laterais à frequência da portadora óptica. Assim, com a utilização de várias portadoras ópticas o espaçamento entre elas tem de ser garantido para que não haja interferência entre os sinais enviados. Na figura 3.8(a) é apresentado um exemplo de uma portadora RF de 60GHz, o que

torna necessário um espaçamento maior que 120GHz. No entanto, na prática e segundo [45], de modo a utilizar comprimentos de onda para os quais existem componentes comerciais, o espaçamento mínimo passa a ser de 200GHz. Caso se opte por utilizar apenas uma banda lateral (*Single Side Band*, SSB), o espaçamento mínimo necessário passa a ser 100GHz, tal como apresentado na figura 3.8(b).

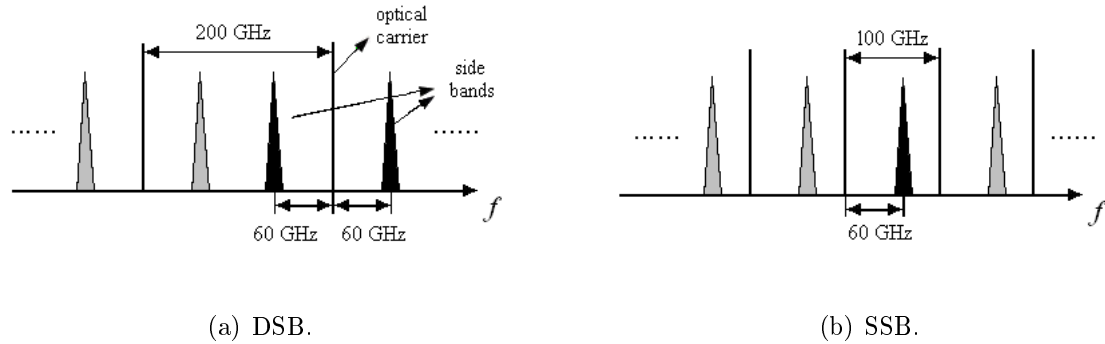


Figura 3.8: Espectro óptico DWDM-RoF [45].

3.3 Modulação em intensidade

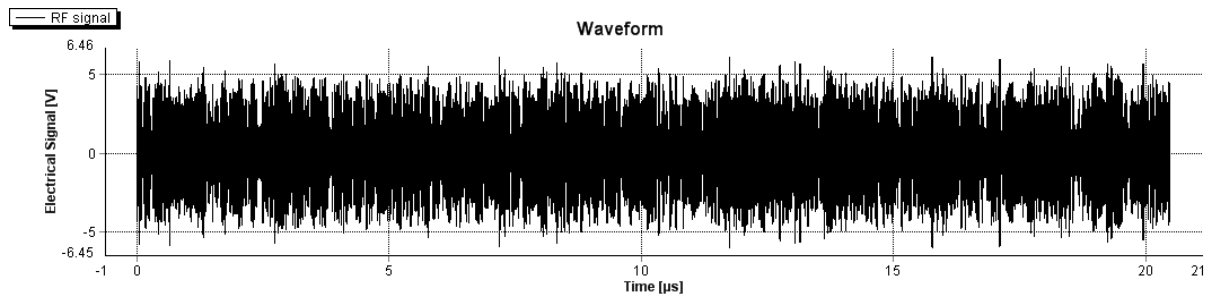
IM é a modulação utilizada em sistemas IM-DD que são os sistemas mais comuns nas arquitecturas RoF. Esta modulação torna os sistemas bastante simples, tanto na geração como na recepção óptica, permitindo tanto modulação directa dos lasers como modulação externa da portadora óptica.

A portadora óptica ao ser modulada em intensidade fica com uma envolvente igual à do sinal modulante, sendo facilmente desmodulado pelo foto-díodo, utilizando detecção directa. Na figura 3.9 é apresentado um exemplo de um sinal RF, no domínio do tempo, e a conseqüente portadora óptica modulada com esse mesmo sinal.

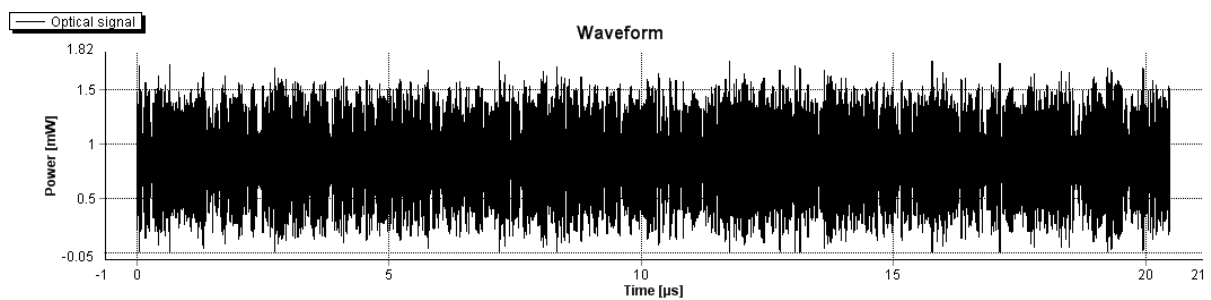
Apesar da simplicidade da utilização de IM e dos sistemas IM-DD, a limitação destes sistemas devido à não-linearidade e à limitação da SFDR fez com que se começassem a estudar alternativas para a transmissão de sinais nos sistemas RoF. Como será apresentado na secção seguinte, uma das alternativas é a modulação de fase (PM) em sistemas RoF.

3.4 Modulação de fase

A modulação de fase pode ser utilizada em sistemas RoF como alternativa aos sistemas típicos de modulação de intensidade. Para gerar uma modulação de fase é necessário um modulador externo capaz de alterar a fase da portadora consoante a tensão aplicada. Assim, ao contrário da modulação de intensidade, o sinal óptico modulado não irá variar em amplitude mas sim em



(a) Sinal RF.



(b) Portadora óptica modulada em IM.

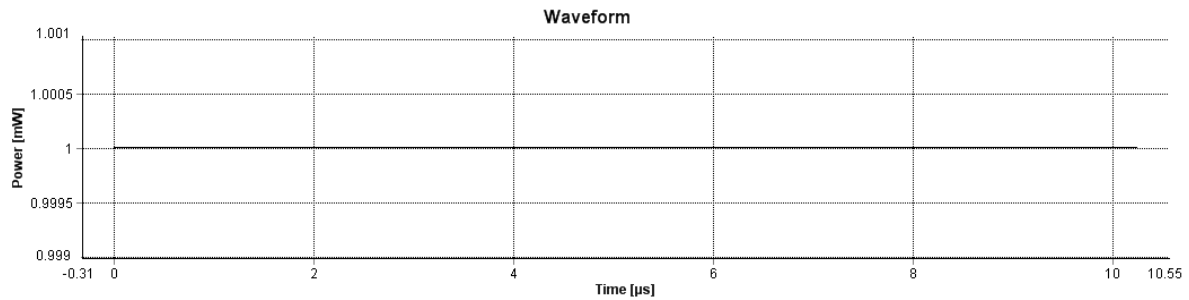
Figura 3.9: Modulação IM no domínio do tempo.

fase, apresentando uma amplitude constante. Na figura 3.10 é apresentado um sinal centrado em 5,9GHz modulado numa portadora óptica com modulação em fase com amplitude constante de 1mW.

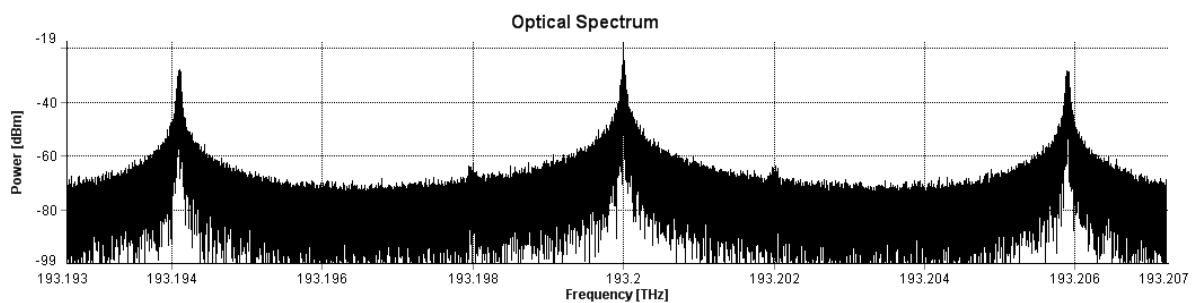
3.4.1 Vantagens na utilização de PM

O estudo de sistemas RoF utilizando modulação de fase tem-se tornado bastante interessante nos últimos anos, pois permite dissipar algumas limitações existentes nos sistemas IM [53, 54, 55]. As principais vantagens da utilização de PM face à utilização de IM, em sistemas RoF, são:

- Alta robustez às não-linearidades da fibra;
- Permite remodulação sem restrição no índice de modulação;
- Alto ganho e baixo ruído;
- Simplicidade ao nível da transmissão;
- Linearidade elevada no transmissor.



(a) Domínio do tempo.



(b) Domínio da frequência.

Figura 3.10: Portadora óptica com modulação de fase.

Robustez às não-linearidades: A alta robustez da modulação PM às não-linearidades da fibra deve-se à tensão constante do sinal óptico à saída do transmissor. Em [55] e [56] concluiu-se que a interferência intercanal num sistema WDM, utilizando PM, era aproximadamente 15dB inferior de um sistema utilizando IM.

Baixa limitação no índice de modulação: A tensão constante à saída do transmissor óptico traz outra grande vantagem aos sistemas PM, que é a possibilidade de remodular a portadora óptica em intensidade. Isto permite que num sistema bidireccional apenas exista uma fonte óptica, utilizando o sinal de DL para remodular o sinal de UL, reduzindo o custo dos sistemas [54, 55]. Este tipo de sistemas começou por ser estudado utilizando IM nos dois sentidos [54, 55]. No entanto, o índice de modulação do sinal de DL teria de ser limitado de modo a garantir uma performance mínima no sinal de UL [54, 55]. Além disso, poderiam ser necessários filtros e amplificadores ópticos na RU para retirar o canal de DL e aumentar a potência de UL. Com a utilização de PM no DL esta restrição é resolvida, pois o índice de modulação deixa de ter as limitações das soluções IM, aumentando assim o nível de potência e dispensando a utilização de amplificadores na RU.

Alto ganho e baixo ruído: O elevado ganho é outra vantagem dos sistemas PM face aos sistemas IM. No entanto, este ganho é obtido à custa da limitação da largura de banda [55]. Como a largura de banda em sistemas SCM é limitada a certas bandas de frequência, pode-se admitir que o ganho é uma vantagem dos sistemas PM. Sistemas PM conseguem um ganho no sinal RF superior em 6dB, para a mesma potência óptica do laser e mesma ligação de fibra [53].

Simplicidade do transmissor: O transmissor PM apresenta uma maior simplicidade que o transmissor IM, devido à maior simplicidade dos moduladores de fase, face aos moduladores de intensidade. Esta diferença foi descrita no capítulo 2, onde são apresentados os moduladores ópticos.

Linearidade elevada no transmissor: Os sistemas PM conseguem obter uma maior linearidade que os sistemas IM, pois não existe uma limitação fundamental na DR imposta pelo processo de modulação/desmodulação IM [53]. Estudos efectuados permitiram um aumento na SFDR, em sistemas PM, utilizando processos de desmodulação coerente [57, 58].

3.4.2 Desvantagens na utilização de PM

A principal desvantagem está na desmodulação do sinal PM. Para a desmodulação de sinais PM é necessário converter a variação de fase em variação de intensidade (*Phase Modulation to Intensity Modulation*, PM-to-IM), sendo muitas vezes necessária a utilização de desmodulação coerente, aumentando assim a complexidade dos sistemas. Este é o principal factor a ter em conta na escolha da modulação a utilizar, pois nem sempre as vantagens na utilização de PM compensam esta desvantagem. Além disto, existe ainda uma limitação derivada ao aparecimento de uma conversão PM-to-IM na fibra óptica, provocada pela CD [54, 56]. Isto acontece porque as várias componentes de frequência da onda PM irão sofrer diferentes atrasos durante a sua propagação, sendo recebidas em diferentes instantes temporais, gerando uma modulação de amplitude [59].

3.4.3 Desmodulação PM

Embora existam vários estudos realizados para o melhoramento da recepção PM utilizando desmodulação coerente [60, 61], também é possível desmodular sinais PM recorrendo à detecção directa, simplificando a recepção de sistemas PM-DD. Nesta dissertação será utilizado um desmodulador PM baseado num interferómetro com linha de atraso (*Delay Line Interferometer*, DLI), também designando por MZI assimétrico, tal como apresentado em [54]. Este tipo de desmoduladores é utilizado geralmente para desmodulação de sinais *Differential Phase Shift Keying* (DPSK), podendo desmodular sinais PM, visto serem gerados como sinais PSK [62]. O MZI assimétrico é composto por dois acopladores ópticos e uma linha de atraso. O primeiro

acoplador divide o sinal de entrada em dois ramos, com uma diferença de fase de 90° entre cada ramo. Num dos ramos o sinal sofre um atraso imposto por uma linha de atraso, sendo novamente acoplado com o sinal, não atrasado, do outro ramo. O atraso imposto no sinal óptico deve corresponder ao tempo de símbolo. Na saída do DLI está um receptor balanceado, de modo a aumentar a eficiência da recepção face à utilização de um receptor simples [62]. Na figura 3.11 está representado o esquema de um DLI seguido do receptor balanceado.

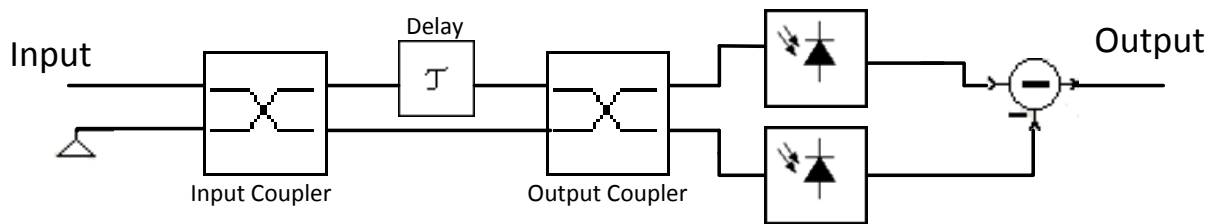


Figura 3.11: Esquema de um receptor PM utilizando um DLI e um receptor balanceado.

A parametrização de cada componente e a sua influência na recepção de sinais PM será abordada no capítulo 4, na secção correspondente à simulação de um sistema com utilização PM.

3.5 Índice de modulação óptico

O índice de modulação óptico (*Optical Modulation Index*, OMI) é um parâmetro importante nos sistemas RoF. Este parâmetro relaciona o sinal RF com a portadora óptica e tem uma elevada influência na qualidade de desmodulação do sinal.

O OMI mede a influência que o sinal modulante tem sobre a portadora óptica, também designado por profundidade de modulação. Isto é, para um índice de modulação reduzido, a portadora óptica tem muito mais influência no sinal óptico resultante do que o sinal RF, ou seja, grandes variações no sinal RF provocam pequenas variações na portadora óptica. O sinal RF tem uma potência baixa e o sinal resultante terá uma potência média aproximadamente igual à potência da portadora óptica. Caso o índice de modulação seja elevado acontece precisamente o contrário, ou seja, a potência do sinal RF terá muito mais influência no sinal óptico resultante do que a portadora óptica. Neste caso, a potência do sinal óptico resultante será mais elevada, aumentando assim a SNR no emissor. No entanto, existe um compromisso entre o índice de modulação e as distorções causadas pelas não-linearidades [63]. Assim, deve-se utilizar um índice de modulação que mantenha os níveis de sinal na zona linear do transmissor.

De seguida é apresentado um exemplo prático de demonstração da influência do OMI numa transmissão RoF. Na figura 3.12 é apresentado uma pequena amostra ($1\mu s$) de um sinal QAM.

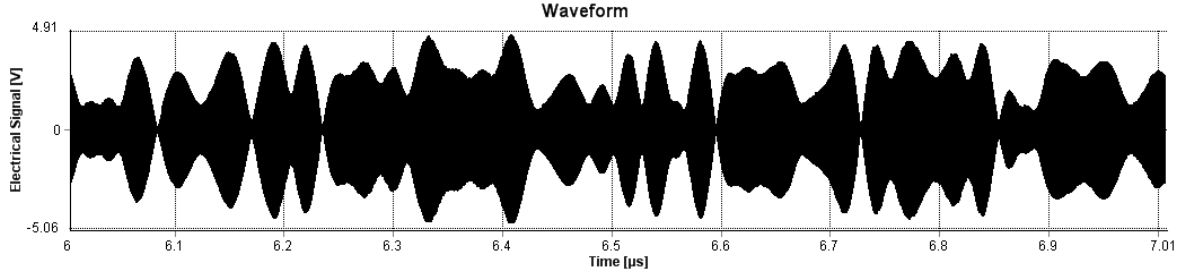


Figura 3.12: Sinal utilizado na desmostração do OMI.

Utilizando o modulador EAM disponível no simulador utilizado nesta dissertação, temos que o valor da potência óptica à saída do EAM [64] é dada por:

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \cdot ((1 - m) + m \cdot data(t)) \quad (3.1)$$

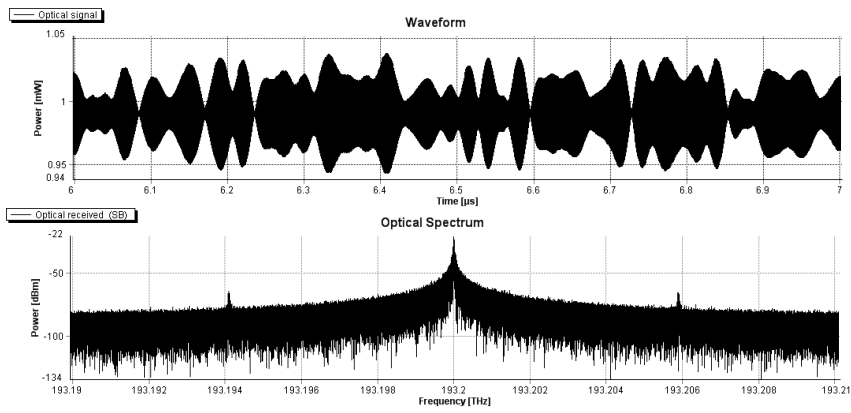
onde, $P_{in}(t)$ é a potência óptica na entrada do modulador, m é o índice de modulação e $data(t)$ é o sinal eléctrico modulado.

Fazendo a simulação para os índices de modulação de 1%, 30% e 90%, temos os seguintes resultados apresentados na figura 3.13, onde se pode verificar a influência do OMI, tanto a nível espectral como a nível temporal. No espectro óptico verifica-se que com o aumento do OMI a potência relativa ao sinal RF vai aumentando, fazendo o sinal sofrer *clipping* e aparecendo algumas frequências derivadas da não-linearidade. No domínio temporal, verifica-se um aumento da tensão óptica do sinal à saída do modulador óptico, com o aumento do OMI. Como se poderá verificar no capítulo seguinte, o OMI ideal será aquele que permitirá uma potência óptica mais elevada sem que seja influenciado por não-linearidades.

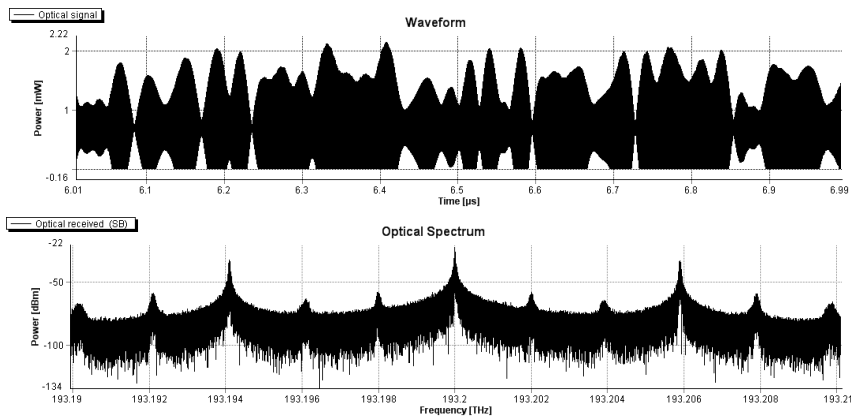
Utilizando modulação de fase, a influência do OMI é idêntica. No entanto, o OMI pode ser definido como sendo o desvio de fase máximo. Isto é, a fase do sinal óptico à saída do modulador varia entre zero e um determinado valor máximo de fase, proporcionalmente com a tensão do sinal RF. O sinal óptico à saída do modulador de fase é definido em [64] por:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \exp[j\Delta\phi data(t)] \quad (3.2)$$

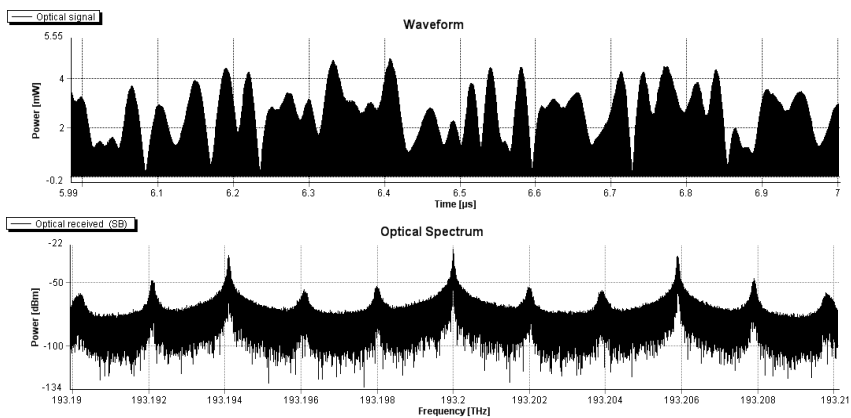
onde, $E_{in}(t)$ corresponde ao sinal óptico na entrada do modulador, $\Delta\phi$ é o desvio de fase e $data(t)$ é o sinal eléctrico modulado. Analisando a equação, verifica-se que a potência óptica mantém-se inalterada, variando apenas a fase.



(a) OMI de 1%.



(b) OMI de 30%.



(c) OMI de 99%.

Figura 3.13: Influência do OMI na modulação óptica em intensidade.

Capítulo 4

Simulação de sistemas rádio sobre fibra

Neste capítulo serão apresentadas e discutidas as soluções RoF simuladas no decorrer desta dissertação. Inicialmente será apresentada uma solução bidireccional convencional, onde serão utilizadas duas ligações totalmente independentes, uma para o DL e outra para o UL, utilizando duas fontes ópticas independentes. Seguidamente, serão discutidas várias soluções de baixo custo, utilizando apenas uma fonte óptica e recorrendo à remodulação da portadora óptica.

Todos os sistemas serão avaliados recorrendo às figuras de mérito apresentadas no capítulo 2, nomeadamente o EVM, SNR e qualidade das constelações recebidas. Os sinais transmitidos pelos sistemas serão sinais QAM, podendo variar apenas o número de bits transportados em cada símbolo.

4.1 Sistema RoF convencional

O primeiro sistema RoF simulado é um sistema bidireccional convencional. Neste sistema são utilizados dois lasers CW, dois moduladores EAM, duas fibras ópticas e dois fotodíodos para cada ligação. A arquitectura do sistema convencional é apresentada na figura 4.1.

No DL é transmitido um sinal 16-QAM, com um débito de 200Mb/s, centrado na frequência de 5,9GHz, e no UL é transmitido um sinal QPSK, centrado na frequência de 6GHz a 100Mb/s. Estes sinais são semelhantes aos utilizados na tecnologia WiMAX, pois estão dentro da sua banda de frequências e utilizam a mesma modulação, porém os sinais WiMAX apresentam débitos inferiores [65]. A largura de banda dos dois sinais é igual pois têm a mesma taxa de símbolos (50Ms/s). Tal como é visível na figura 4.2 a largura de banda dos sinais transmitidos é de 60MHz. Estes dois sinais serão utilizados durante todas as simulações apresentadas.

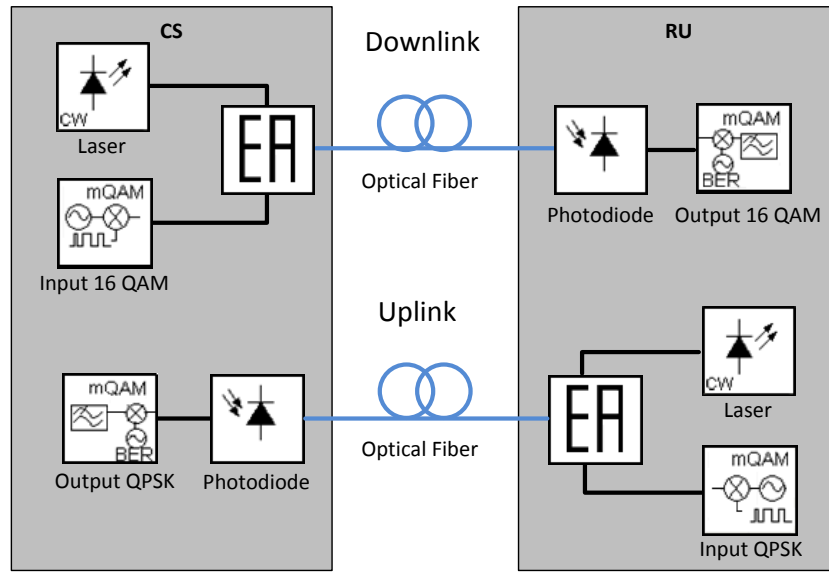
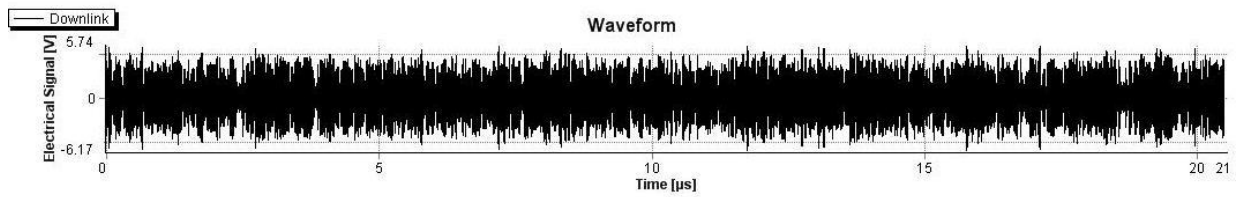
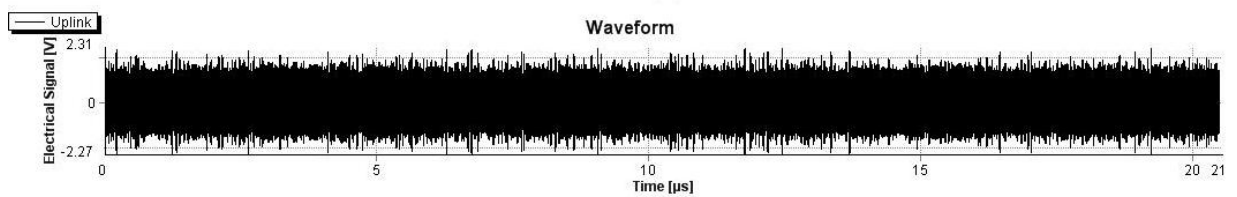


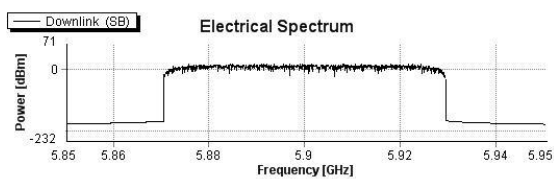
Figura 4.1: Arquitectura de um sistema RoF convencional.



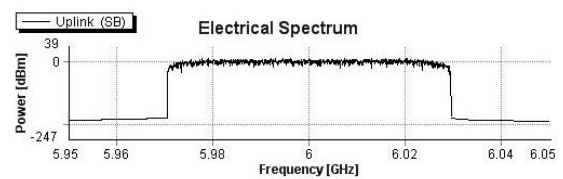
(a) Sinal DL no tempo.



(b) Sinal UL no tempo.



(c) Sinal DL na frequência.



(d) Sinal UL na frequência.

Figura 4.2: Sinais enviados no sistema RoF convencional.

Para a simulação de um sistema RoF é necessário escolher e parametrizar os principais componentes. Na tabela 4.1 são apresentados os principais parâmetros do laser, da fibra óptica e do fotodíodo.

Parametrização		
Laser	Potência de emissão	$1mW$
	Frequência de emissão	$192,3THz(\approx 1553nm)$
	Largura de linha	$10MHz$
Fibra	Tipo	SMF-DSF
	Frequência de referência	$192,3THz(\approx 1553nm)$
	Atenuação	$0,2dB/km$
	Dispersão	$0,787ps/(nm.km)$
	Comprimento	$25km$
Fotodíodo	Tipo	PIN
	Responsividade	$1A/W$
	Corrente escura	$0A$
	Ruído térmico	$10pA/Hz^{1/2}$

Tabela 4.1: Parametrização dos componentes para o sistema convencional.

Para medir a qualidade dos sinais recebidos é utilizado o EVM. No entanto, como o índice de modulação influencia o EVM e conseqüentemente a qualidade do sinal, torna-se necessária a sua otimização. Na figura 4.3, estão representados os gráficos do EVM para o DL e UL, em função do índice de modulação, que é representado em escala logarítmica .

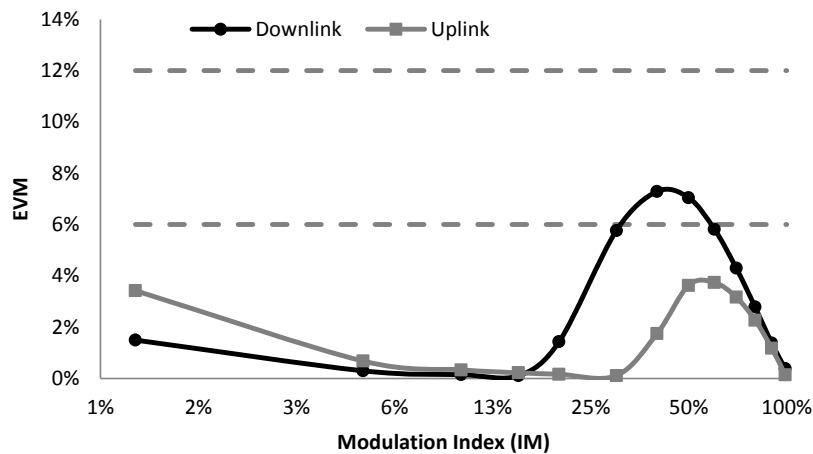


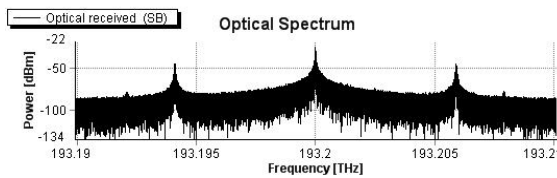
Figura 4.3: EVM em função do OMI para a arquitetura convencional.

Tal como se pode visualizar através da análise dos gráficos, os valores de OMI com que

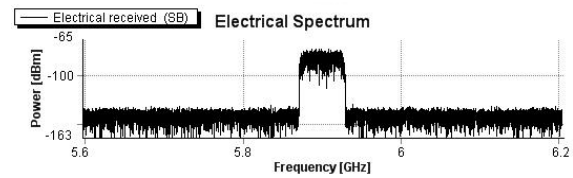
se obtêm melhores valores de EVM situam-se entre os 5% e os 20%, para o DL, e entre os 5% e os 30%, para o UL. De realçar que para o valor de 99%, o valor de EVM também é bastante reduzido devido à elevada potência do sinal óptico. No entanto, tal como apresentado anteriormente (Capítulo 3, figura 3.13), para um valor de 99% de OMI existe uma elevada não-linearidade. Assim, o OMI ideal, ou seja, aquele com que se obtém um menor EVM é de 15% para o DL e 30% para o UL, obtendo-se um EVM de 0,1% para ambos os casos.

Pode-se ainda concluir que para o UL existe uma maior gama de valores de OMI que permitem um EVM mais reduzido, devido essencialmente à modulação ser QPSK e, portanto, ter uma constelação mais reduzida e menos propícia a erros de desmodulação. Tendo como exemplo as recomendações da tecnologia WiMAX [65], o EVM mínimo para a modulação 16-QAM é de 6%, sendo de 12% para a modulação QPSK. Assim, conclui-se que nesta situação apenas um OMI entre 30% e 60% para o DL gera valores de EVM acima do máximo exigido.

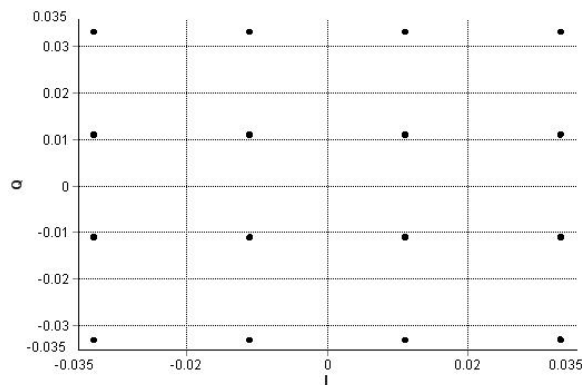
Os sinais recebidos no DL e no UL, para o melhor valor de EVM, estão representados nas figuras 4.4 e 4.5, respectivamente. Nestas figuras é possível visualizar o sinal óptico recebido pelo fotodíodo, o sinal eléctrico gerado pelo mesmo e a constelação do sinal obtida na recepção. Analisando as figuras confirma-se a boa qualidade de recepção, validando assim o baixo valor de EVM para o OMI escolhido. Os sinais, nesta arquitectura, são maioritariamente afectados pela baixa atenuação da fibra e, como as ligações são independentes, não interferem entre elas.



(a) Sinal recebido pelo fotodíodo.

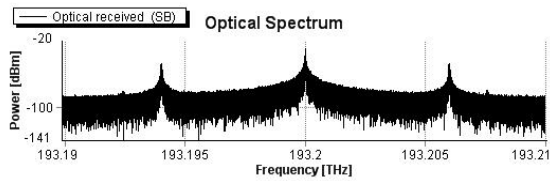


(b) Sinal recebido pelo receptor QAM.

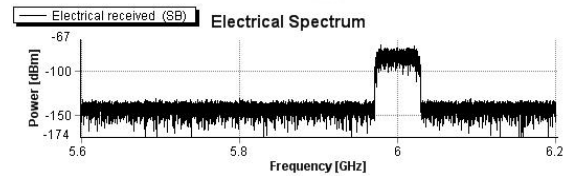


(c) Constelação 16QAM no receptor

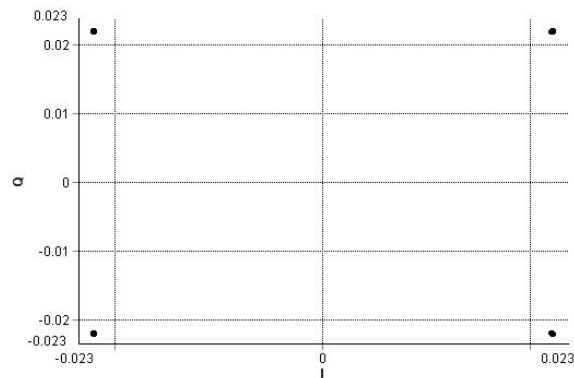
Figura 4.4: Sinais recebidos no DL.



(a) Sinal recebido pelo fotodíodo.



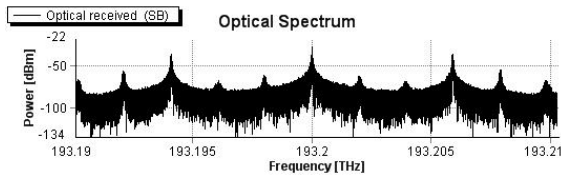
(b) Sinal recebido pelo receptor QAM.



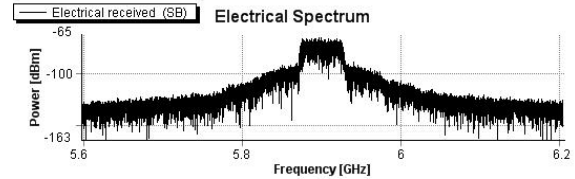
(c) Constelação QPSK no receptor

Figura 4.5: Sinais recebidos no UL.

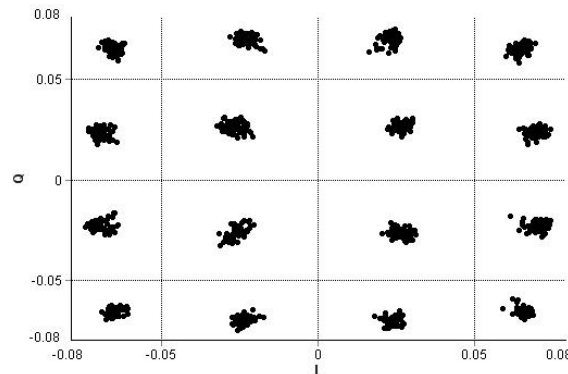
Tal como visto no gráfico do EVM em função do OMI, existe uma gama de valores onde o OMI afecta bastante a transmissão de DL, gerando um EVM acima do recomendado para o WiMAX. Assim, na figura 4.6 é apresentado o sinal recebido no DL para o pior caso, ou seja, um OMI de 40% gerando um EVM de 7,3%. Analisando a figura verifica-se que o sistema passa a ser afectado por não-linearidades, aparecendo frequências indesejadas no espectro e diminuindo a SNR. A constelação recebida passa a conter símbolos que são recebidos fora do seu ponto ideal, criando uma zona de probabilidade de ocorrência que se torna mais problemática com o aumento do número de símbolos.



(a) Sinal recebido pelo fotodíodo.



(b) Sinal recebido pelo receptor QAM.



(c) Constelação 16QAM no receptor

Figura 4.6: Sinais recebidos no DL para o pior caso.

4.1.1 Variação do comprimento da fibra no sistema convencional

Nesta secção será testado o impacto da variação do comprimento da fibra, utilizando uma fibra DSF e uma fibra não-DSF (NDSF). Como as duas ligações são independentes apenas será simulada a ligação de DL. Para todos os testes efectuados, os parâmetros que não forem referidos mantêm o valor da simulação inicial e o valor do OMI será o que permite obter EVM melhor.

Assim, foi efectuado um teste utilizando a fibra DSF, da simulação inicial, e outro teste utilizando uma fibra NDSF com dispersão igual a $16ps/(nm.km)$. Na figura 4.7 é apresentado o gráfico da variação do EVM com o aumento da distância de ligação, para as duas fibras.

Analisando os resultados, conclui-se que, se utilizarmos fibra DSF, esta ligação é limitada a cerca de 120km, para um EVM máximo de 6%. Esta limitação deve-se essencialmente à atenuação da fibra, que para esta distância tem o valor de $24dB$ ($0,2dB/km * 120km$). Se utilizarmos fibra NDSF, verifica-se que a distância máxima permitida diminui para cerca de 90km. Isto acontece pois, além da atenuação, existe também um aumento da dispersão do sinal com a distância percorrida.

Na figura 4.8 está representado o espectro do sinal recebido e respectiva constelação, utilizando uma fibra DSF com 120km. Pode-se verificar um baixo nível de sinal e consequentemente uma baixa SNR. A mesma situação, mas para uma fibra NDSF com 90km, está representada na figura 4.9, onde se pode verificar que existe uma degradação da constelação do sinal. No

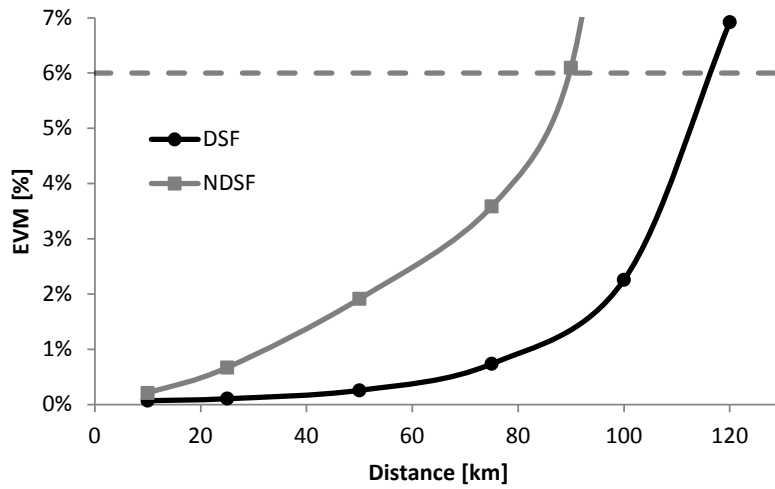
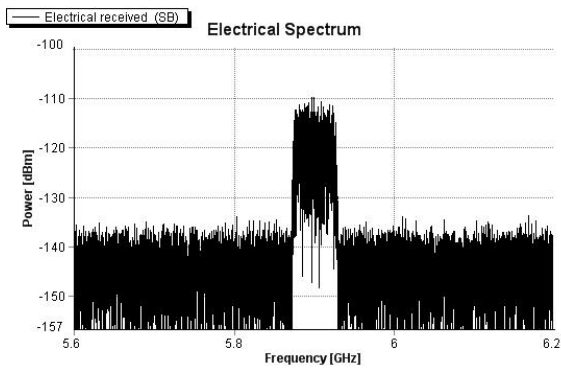
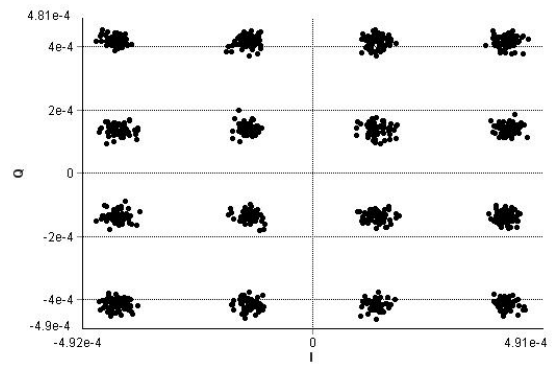


Figura 4.7: Variação do EVM com a distância de ligação.

entanto, a dispersão não é o factor dominante na degradação do sinal, pois esta é influenciada não só pela dispersão mas também pela atenuação.

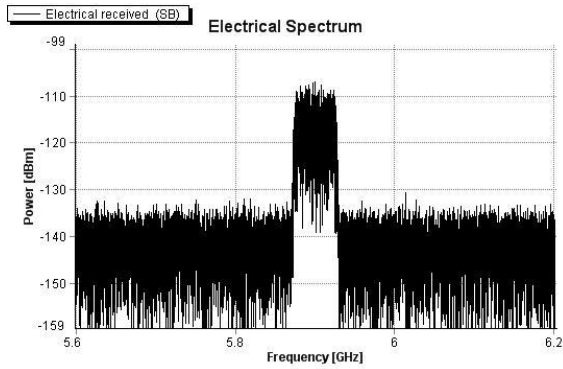


(a) Espectro do sinal recebido.

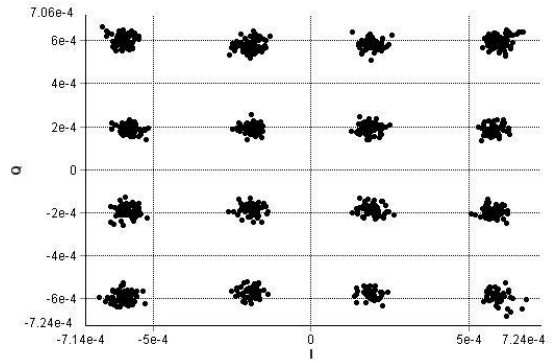


(b) Constelação do sinal recebido.

Figura 4.8: Sinal recebido para uma distância de 120km utilizando uma fibra DSF.



(a) Espectro do sinal recebido.



(b) Constelação do sinal recebido.

Figura 4.9: Sinal recebido para uma distância de 90km utilizando uma fibra NDSF.

4.2 Sistema RoF de baixo custo utilizando IM nos dois sentidos

O segundo sistema RoF simulado é um sistema bidireccional utilizando apenas uma fonte óptica na CS, sendo a portadora óptica remodulada com o sinal de UL na RU. Este tipo de arquiteturas permitem reduzir os custos do sistema. Tal como referido no capítulo 3, estes sistemas são mais eficientes quando se utiliza modulação PM no DL. No entanto, nesta secção é apresentada uma abordagem com modulação IM nos dois sentidos (IM-IM), de modo a permitir a comparação entre arquiteturas. Na figura 4.10 está representada a arquitectura utilizada. A diferença entre esta arquitectura e a do sistema convencional é que o sinal óptico de DL é dividido, utilizando um divisor óptico, onde metade da potência vai para o receptor óptico de DL e a outra metade vai ser reutilizada para transmitir o sinal de UL.

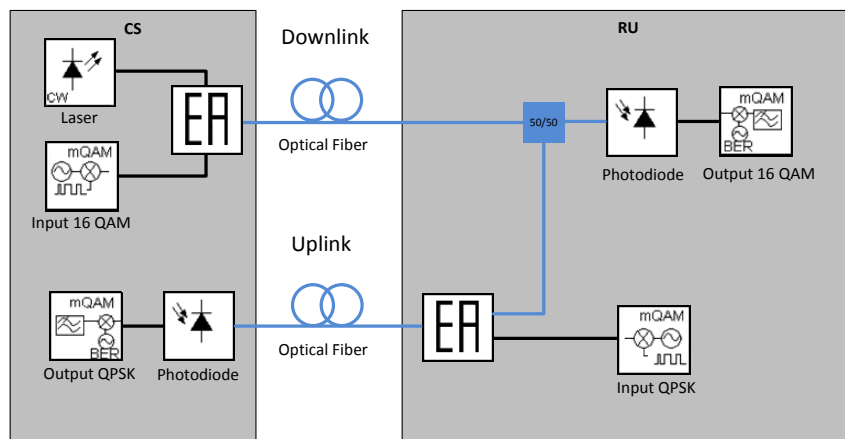


Figura 4.10: Arquitectura de um sistema RoF de baixo custo utilizando IM-IM.

A parametrização dos principais componentes é igual ao do sistema anterior, pois são utilizados os mesmos sinais RF, a mesma fibra e a mesma modulação óptica. Como a ligação de DL não é afectada pela ligação de UL, os resultados para esta ligação são idênticos aos da arquitectura convencional, sendo que a única diferença está na redução da potência devido ao divisor óptico, que retira 3dB ao sinal óptico que chega ao receptor, diminuindo um pouco a distância máxima permitida. Com isto, apenas é apresentado o estudo relativamente à ligação de UL e à influência da remodulação nesta ligação.

Uma conclusão directa que se pode retirar com a utilização desta solução é o sistema ser limitado pela atenuação e respectiva potência recebida em UL. Isto devido ao sinal de UL ser gerado na CS e posteriormente reutilizado na RU, sem a utilização de qualquer tipo de amplificador o sinal percorre o dobro da distância, sofrendo o dobro da atenuação. O sinal sofre ainda uma divisão óptica, fazendo com que este chegue claramente mais fraco que na solução convencional. Para que seja possível estudar o desempenho da ligação de UL independentemente do sinal de DL, esta simulação é efectuada sem que seja enviado qualquer sinal em DL.

Na figura 4.11 é apresentado o gráfico do EVM no UL, utilizando o OMI ideal de 30% obtido na secção anterior, em função da distância entre a CS e a RU. Neste gráfico verifica-se que o sistema é limitado para uma distância de aproximadamente 60km, para um sinal de UL modulado em QPSK, permitindo assim um maior EVM. No entanto, se o sinal fosse 16-QAM como no DL o sistema era limitado aos 50km, menos de metade da distância possível no sistema convencional (i.e. 120km). Apesar desta diminuição da distância, estes valores são bastante aceitáveis pois os sistemas RoF, na sua maioria, utilizam distâncias curtas.

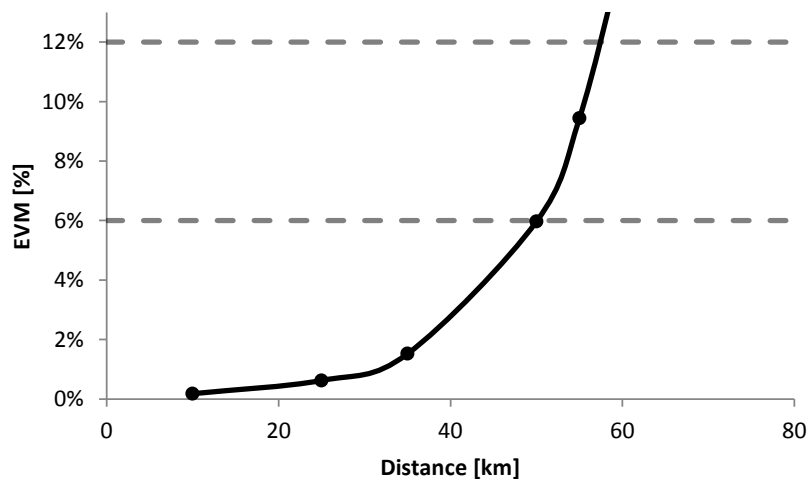


Figura 4.11: EVM em função da distância no UL.

Na figura 4.12 é possível visualizar a potência do sinal no receptor, onde se verifica um valor de aproximadamente -85dBm, menos 10dB que no sistema convencional, para a mesma

distância de 25km.

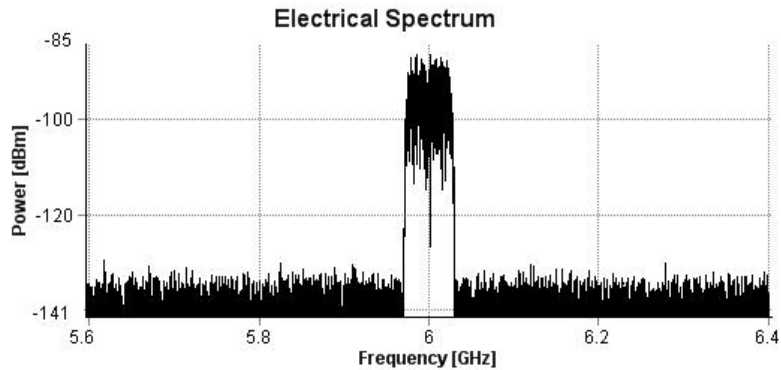


Figura 4.12: Potência de recepção no UL.

Analisando agora o sistema com a transmissão dos dois sinais, começa-se por avaliar a influência do sinal de DL na ligação de retorno. Para tal, escolhe-se um OMI fixo para o sinal de DL e faz-se variar o OMI no sinal de UL. O OMI escolhido para o DL é o que apresenta melhor EVM (i.e. 15%), otimizando assim o sistema. Na figura 4.13 é apresentado o gráfico do EVM em função do OMI, para o UL, com um OMI fixo de 15%, no DL.

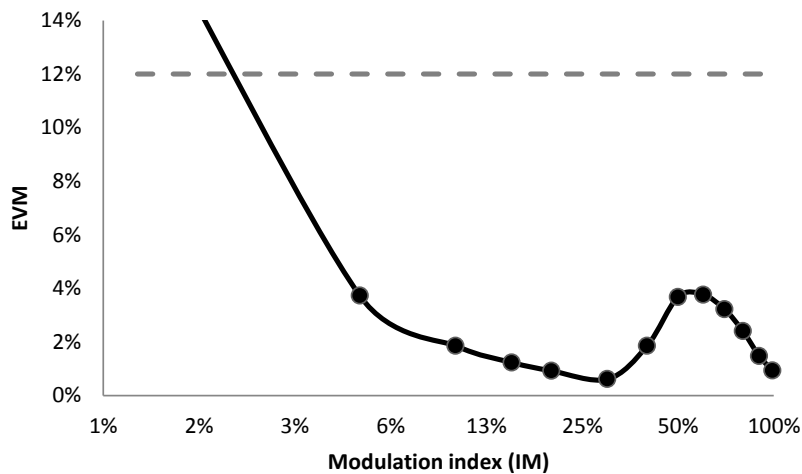


Figura 4.13: EVM em função do OMI no UL.

Analisando o gráfico, pode-se concluir que se for escolhido um OMI no DL que não provoque dispersão, o sinal de UL não sofre interferência do sinal de DL. Esta conclusão comprova-se analisando a figura 4.14, onde é apresentado o espectro do sinal de UL no receptor. Como se pode verificar, tanto na recepção óptica, como na recepção eléctrica, os dois sinais não interferem, pois além de não terem largura de banda suficiente para se sobreporem, não apresentam

distorção. Neste caso, o sistema funciona como se estivessem a ser enviados dois canais RF em frequências diferentes (SCM), onde na recepção apenas é desmodulado um dos canais.

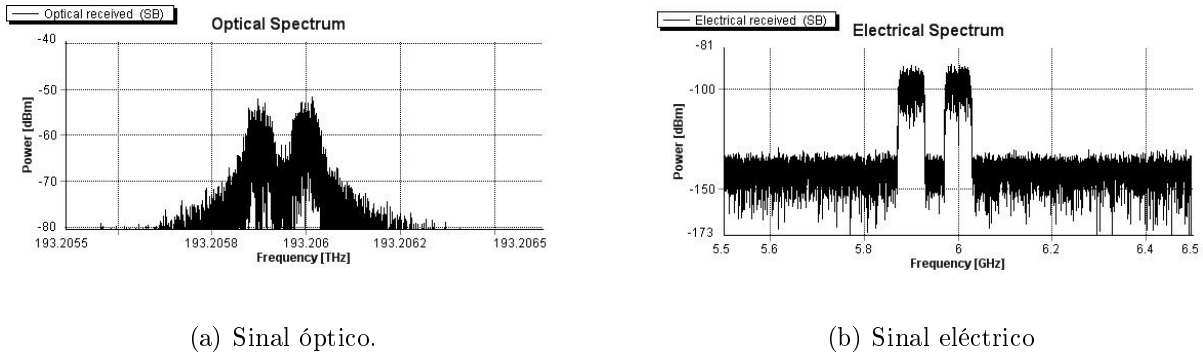


Figura 4.14: Sinais recebidos no UL no melhor caso.

O problema destes tipos de sistemas está na restrição de OMI's no DL, para que o sinal de UL não seja afectado. Como visto anteriormente, existem vários OMI's possíveis de serem utilizados no DL, sem que o EVM na recepção ultrapasse o patamar exigido. No entanto, esses OMI's fazem aumentar a potência do sinal e causam alguma não-linearidade, aparecendo frequências indesejadas. Essas frequências indesejadas passam a afectar o sinal de UL. No gráfico da figura 4.15 é apresentado o EVM no UL em função do OMI no DL, para um OMI fixo de 30% no UL.

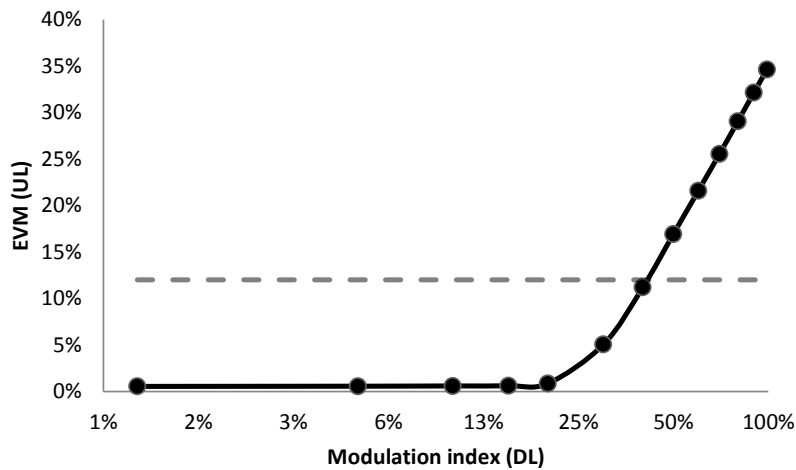
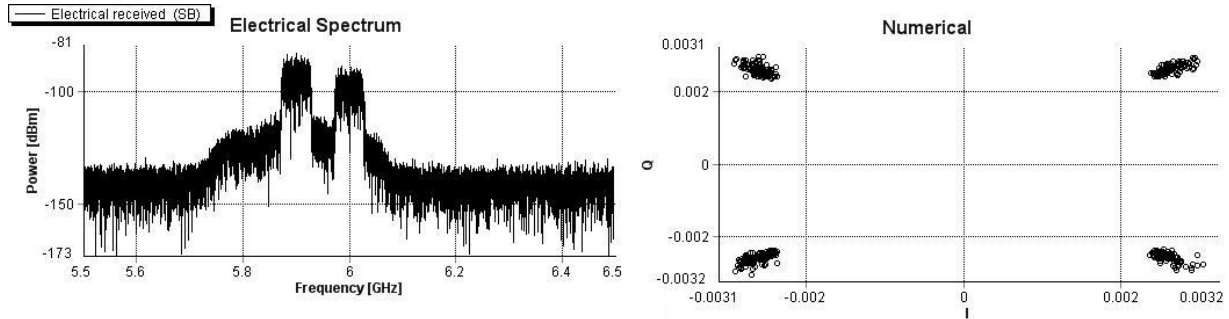


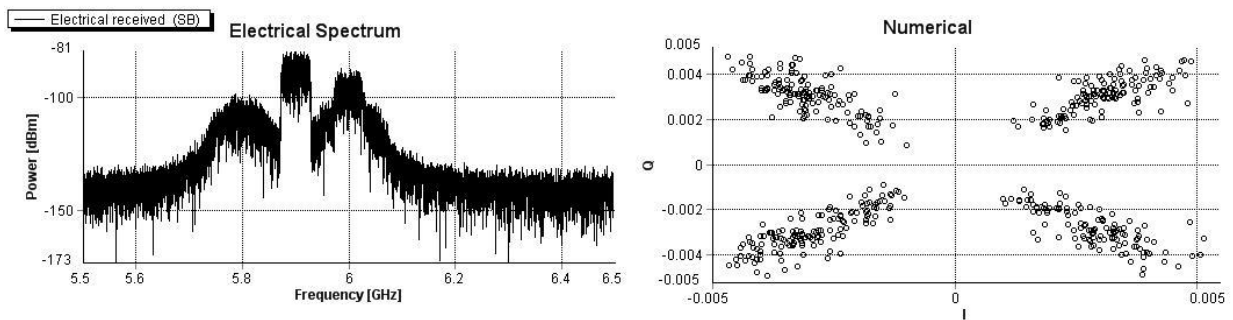
Figura 4.15: EVM no UL em função do OMI no DL

Como se pode verificar, o EVM no UL aumenta com o aumento do OMI no DL, limitando assim o OMI a aproximadamente 40%. Como no DL é necessário cumprir o requisito de 6% para o EVM, o OMI no DL fica assim limitado a aproximadamente 30%. Na figura 4.16 é apresentado o sinal de UL na recepção, para um OMI no DL de 30% e de 90%, verificando-se

assim, a interferência dos dois canais, sendo mais grave quanto maior for o OMI. Neste caso, o EVM obtido no UL é de 5% e 32%, para um OMI de 30% e 90% no DL, respectivamente.



(a) OMI 30%.



(b) OMI 90%

Figura 4.16: Sinais recebidos no UL para um OMI no DL não otimizado.

Uma solução para o problema da limitação do OMI, passa pela utilização de filtragem óptica na RU antes de remodular o sinal, retirando assim o sinal interferente. Esta solução torna os sistemas mais caros e mais complexos, tendo assim que haver um compromisso entre a eficiência e o custo do sistema.

4.3 Sistema RoF de baixo custo utilizando PM e IM

Nesta secção pretende-se apresentar um sistema bidireccional com apenas um laser na CS, utilizando PM no DL e IM no UL [54]. Os sinais a transmitir são os mesmos que nas simulações anteriores. A arquitectura do sistema está representada na figura 4.17.

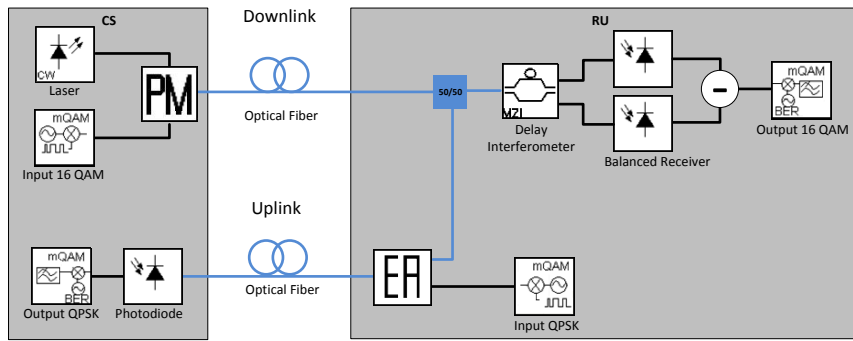


Figura 4.17: Arquitectura de um sistema RoF de baixo custo utilizando PM-IM.

Como se pode verificar a diferença desta arquitectura face à arquitectura anterior está apenas na utilização de PM no DL e consequente necessidade de utilização de um receptor capaz de transformar PM em IM. O UL é exactamente igual ao caso anterior. Assim, o estudo desta arquitectura será efectuado em duas fases, sendo primeiro estudado a ligação de DL independentemente da ligação de UL, verificando qual o impacto da utilização de PM nos sinais RF QAM. Numa segunda fase será então estudado qual o impacto no UL da utilização de PM no DL.

4.3.1 Ligação de *downlink*

Tal como referido anteriormente, a diferença entre a ligação de DL desta arquitectura e das anteriores, está na utilização de PM, o que leva a uma diferente forma de calcular o OMI e também a uma recepção diferente.

OMI em PM

No simulador utilizado, o OMI no modulador PM é dado em graus, sendo necessária a sua normalização e respectiva conversão para percentagem. A normalização do OMI depende do sinal QAM transmitido, pois o desvio de fase máximo provocado pelo modulador de fase não poderá ser maior que a diferença de fase mínima entre símbolos adjacentes do sinal QAM. Assim, para um sinal 16-QAM, tal como visível na figura 4.18 onde estão representados os fasores correspondentes a cada símbolo, existem 3 níveis de amplitude e 12 níveis de fase, sendo que entre símbolos adjacentes dentro do mesmo quadrante a diferença de fase é de $22,5^\circ$ e

entre símbolos adjacentes em quadrantes diferentes é de 45° . Ou seja, o ângulo mínimo entre símbolos é de $22,5^\circ$ para um sinal 16-QAM.

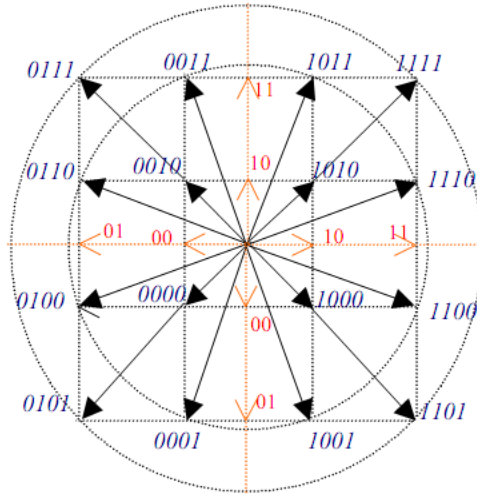


Figura 4.18: Fasores de uma constelação 16-QAM [66].

A normalização do OMI para um sinal 16-QAM é então dado por:

$$\beta = \frac{fase}{22,5} * 100[\%] \quad (4.1)$$

onde, *fase* é o desvio de fase introduzido pelo modulador PM.

Fazendo variar o OMI mantendo os restantes parâmetros de simulação invariáveis, obtém-se na figura 4.19 o gráfico do EVM em função do OMI.

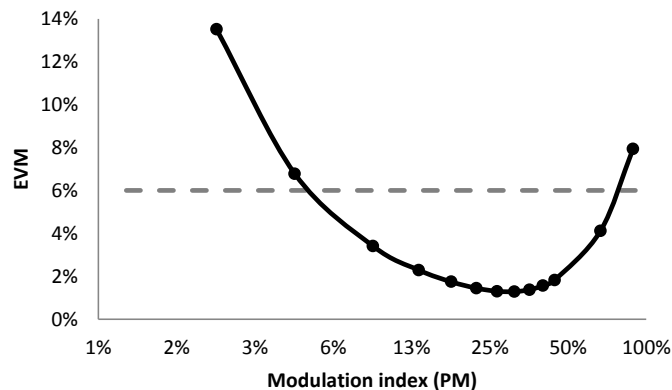


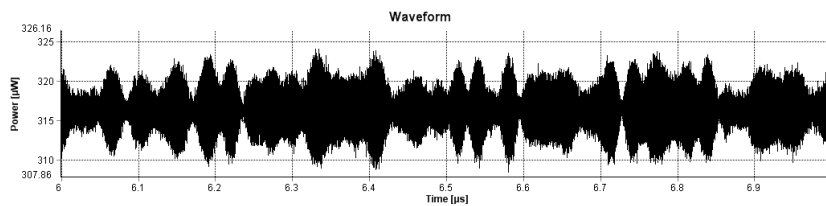
Figura 4.19: EVM em função do OMI para PM.

Analisando o gráfico conclui-se que para que seja possível obter um EVM abaixo do patamar de 6% é necessário limitar o OMI a valores aproximadamente entre 4,4% ($\beta = 1^\circ$) e 75%

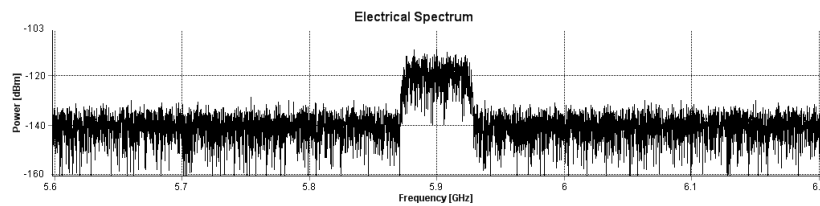
($\beta = 17^\circ$). O melhor EVM obtido tem o valor de 1,28%, originado por um OMI de 31,1% ($\beta = 7^\circ$).

Recepção PM

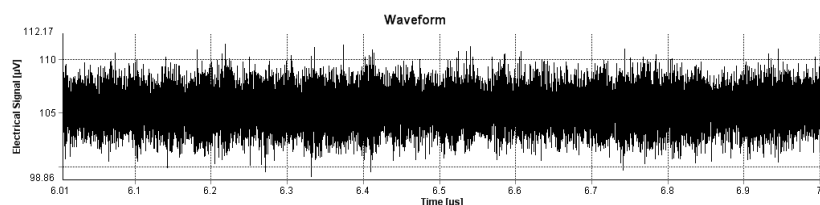
Para que seja possível utilizar DD num sistema PM, é necessário converter PM em IM, antes de o sinal ser recebido pelo fotodíodo. Tal como referido no capítulo 3, existe uma conversão PM-to-IM na fibra óptica devido à CD, no entanto esta conversão não é suficiente para que o fotodíodo possa detectar o sinal correctamente, pois os níveis de intensidade convertidos pela fibra são bastante reduzidos, estando assim ao nível do ruído. Na figura 4.20(a) é apresentado o sinal óptico depois de transmitido pela fibra, onde se pode verificar um nível de potência óptica a variar entre os -4,9dBm e os -5,1dBm. Na mesma figura é apresentado o sinal eléctrico gerado pelo fotodíodo, onde mais uma vez se verifica um nível de potência reduzido, obtendo-se uma SNR de 20dB (b) e uma potência eléctrica na ordem das centenas de μW (c). O EVM obtido nesta situação para o melhor OMI (31,1%) é de 8,9%, estando acima do patamar aceitável.



(a) Sinal óptico recebido pelo fotodíodo.



(b) Espectro do sinal eléctrico gerado pelo fotodíodo



(c) Sinal eléctrico gerado pelo fotodíodo

Figura 4.20: Efeito PM-to-IM gerado pela CD da fibra.

Assim, torna-se necessário utilizar um desmodulador PM que converta PM em IM. O

desmodulador utilizado, tal como referenciado anteriormente, é composto por um DLI seguido de um receptor balanceado.

O bloco DLI utilizado está especificado na documentação do simulador [64] e tem o esquema apresentado na figura 4.21.

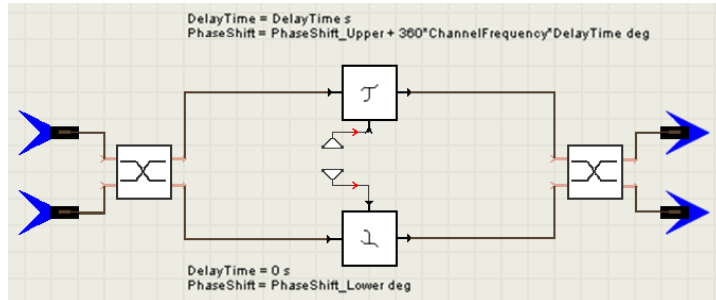


Figura 4.21: Esquema do bloco DLI utilizado.

Existem três parâmetros principais a ter em conta, são eles:

- Desvio de fase ($PhaseShift$);
- Tempo de atraso ($DelayTime$);
- Frequência do canal ($ChannelFrequency$).

O desvio de fase é um parâmetro interno ao bloco que é definido através do tempo de atraso e da frequência do canal, tendo a seguinte expressão, em graus:

$$PhaseShift = 360 * ChannelFrequency * DelayTime \quad (4.2)$$

Assim, este parâmetro adiciona um desvio de fase que está relacionado com a frequência e com o atraso do sinal. Esta relação funciona como um filtro na frequência definida [64]. Neste caso, de modo a filtrar a banda lateral superior de primeira ordem, a frequência do canal deve ser definida com 5,9GHz que é a frequência do sinal RF de DL. A filtragem de uma banda lateral de primeira ordem melhora a qualidade do sinal recebido, pois elimina os efeitos de batimento [54]. Na figura 4.22 é apresentado o espectro óptico, onde se verifica a filtragem da banda superior.

Além da frequência do canal também é necessário definir o tempo de atraso. Este parâmetro além de afectar o desvio de fase também afecta directamente o sinal, proporcionando um atraso entre os sinais presentes nos dois braços do MZM. Para saber qual o tempo de atraso ideal são apresentados os gráficos do EVM e da potência recebida em função do tempo de atraso do DLI, mantendo os restantes parâmetros iguais. Esses gráficos são apresentados na figura 4.23.

Analisando os gráficos conclui-se que o valor do atraso para o qual se obtém o melhor EVM é de 20ps que corresponde a um desvio de fase de 42,48°. O pior valor de atraso é de 85ps

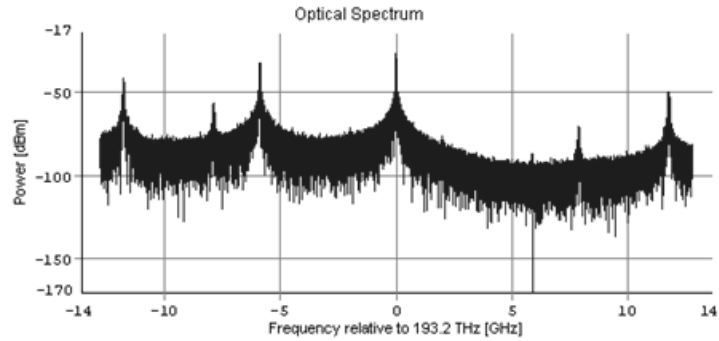
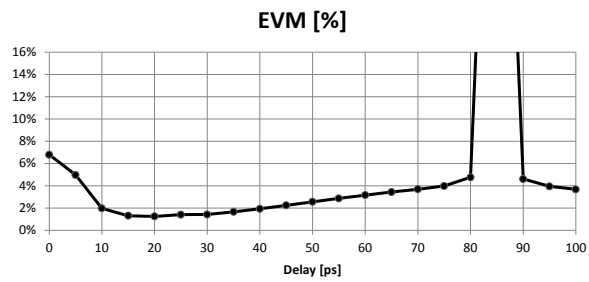
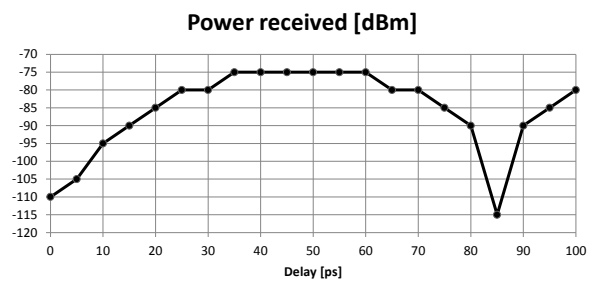


Figura 4.22: Supressão da banda lateral superior por parte do DLI.



(a) EVM em função do atraso.

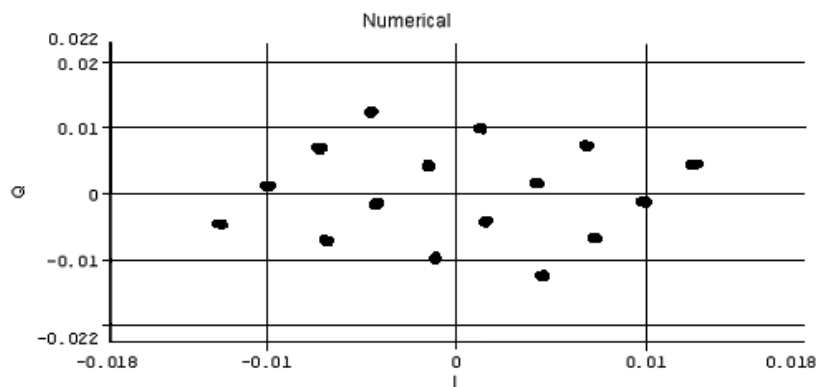


(b) Potência recebida em função do atraso.

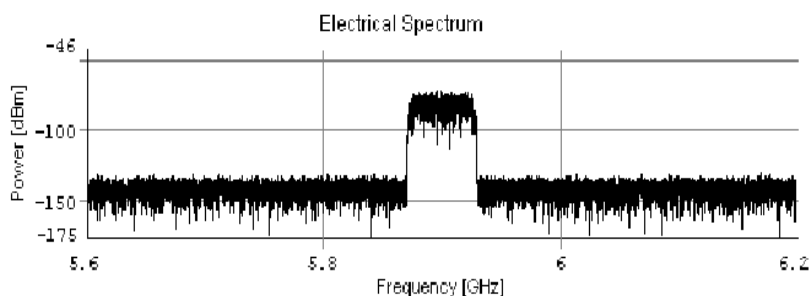
Figura 4.23: EVM e potência recebida em função do atraso no DLI.

que corresponde precisamente a um desvio de fase de 180° , ou seja, os sinais do MZM estão em oposição de fase. Quanto à potência recebida, os piores valores de potência não correspondem sempre ao pior valor de EVM, isto acontece devido ao desvio de fase imposto pelo DLI afectar também a recepção dos sinais. Este desvio de fase provoca uma rotação na constelação recebida que é devidamente compensada, tanto em fase como em amplitude, pelo próprio receptor QAM utilizado na simulação. Assim, tendo em consideração a potência recebida, conclui-se que um atraso até 35ps melhora a potência recebida em 10dB sem degradar significativamente o EVM.

Embora o melhor valor de atraso obtido em relação ao EVM seja de 20ps, nas simulações efectuadas foi utilizado sempre 25ps, pois foi o valor inicialmente proposto em [54]. Na figura 4.24 é apresentada a constelação e o sinal recebido para um valor de 25ps de atraso, onde se verifica a boa qualidade da constelação recebida embora esta apresente uma rotação de fase.



(a) Constelação do sinal recebido.



(b) Espectro do sinal recebido.

Figura 4.24: Sinal recebido utilizando um atraso de 25ps.

Depois do DLI é utilizado um receptor balanceado. Esta opção permite aumentar a potência de recepção [54] face a utilização de um único fotodiodo.

Variação do comprimento da fibra utilizando PM

Mantendo o OMI em 31,1% ($\beta = 7^\circ$) e a parametrização inicial, faz-se agora variar o comprimento da fibra de modo a perceber qual o impacto da distância na modulação PM. Na figura 4.25 é apresentado o gráfico do EVM em função da distância, onde se verifica que o DL utilizando PM é limitado a uma distância de aproximadamente 90km, ou seja menor que os 120km permitidos no sistema convencional utilizando IM.

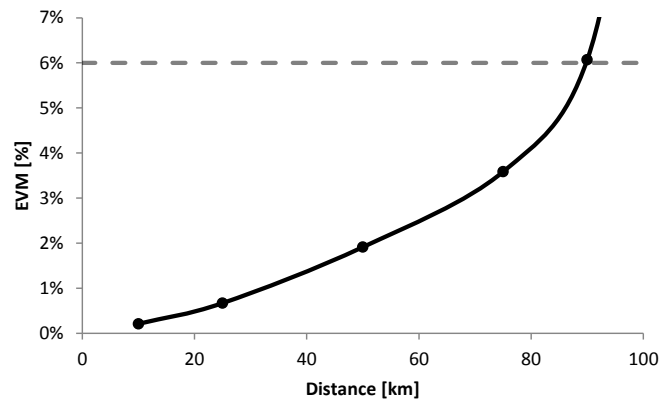


Figura 4.25: EVM em função da distância no DL.

4.3.2 Ligação de *uplink*

A ligação de UL deste sistema utiliza remodulação de intensidade da portadora óptica, o que torna esta ligação idêntica à do sistema apresentado na secção anterior. Assim, apenas será apresentado um estudo sobre o impacto no UL da utilização de PM no DL. Tal como na situação anterior mantém-se o OMI do UL fixo, com o melhor valor (i.e. 30%), e faz-se variar o OMI do DL. A figura 4.26 representa o gráfico da variação do EVM no UL com o OMI no DL.

Como se pode verificar o OMI do DL não influencia o UL devido à potência óptica constante no DL. Esta é a grande vantagem face ao sistema IM-IM, pois pode-se utilizar o OMI que melhor satisfaz as necessidades do DL sem comprometer o UL. Assim, apenas é necessário ter em conta dois factores. O primeiro, tal como no caso anterior, é necessário ter em conta o facto da distância percorrida pelo sinal de UL ser o dobro da distância percorrida no sistema convencional. O segundo factor a ter em conta deve-se ao ruído PM-to-IM causado pela CD da fibra. Como existe uma conversão PM-to-IM, o sinal de DL vai interferir em intensidade com o sinal de UL. No entanto, devido ao baixo valor de potência desta conversão, esta interferência é reduzida. Tal como se pode verificar na figura 4.27, o sinal de DL chega ao receptor de UL com uma potência de aproximadamente 20dB inferior ao sinal de UL.

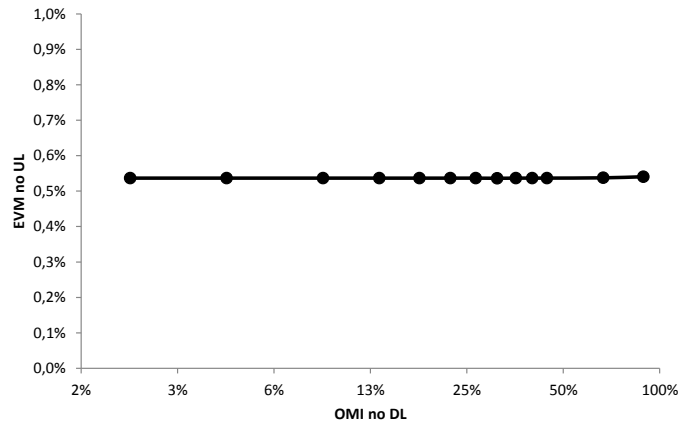


Figura 4.26: EVM no UL em função do OMI do DL.

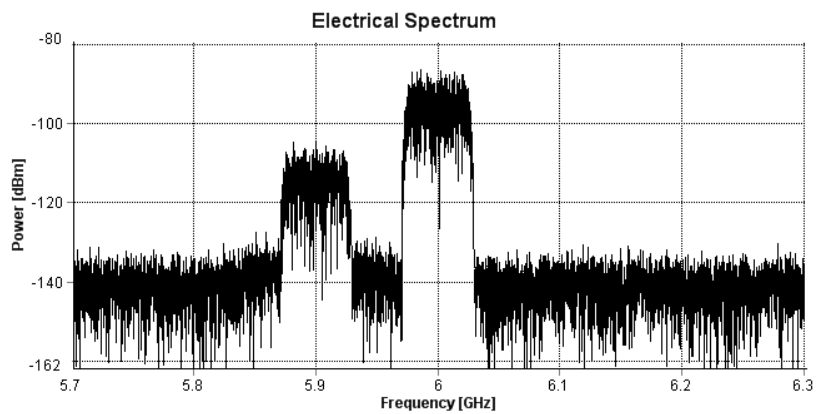


Figura 4.27: Ruído PM-to-IM no receptor de UL.

4.4 Sistema RoF de baixo custo utilizando PM nos dois sentidos

Nesta secção é apresentada uma solução de um sistema RoF de baixo custo utilizando modulação PM nos dois sentidos (PM-PM). Durante a realização desta dissertação não foram encontradas referências para sistemas deste tipo, tendo sido apenas encontrados estudos de soluções para as arquitecturas IM-IM e PM-IM, apresentadas anteriormente. Isto tornou ainda mais interessante o estudo destes sistemas, mesmo que teoricamente tenha as mesmas limitações que os sistemas IM-IM, devido aos sinais nos dois sentidos serem ambos desmodulados na recepção de UL, causando assim interferência entre eles.

A arquitectura deste sistema é idêntica às apresentadas anteriormente, tal como apresentado na figura 4.28. O sinal RF de DL é modulado sobre uma portadora óptica utilizando PM. Na RU o sinal óptico é dividido, sendo metade da potência recebida pelo receptor PM do DL e a outra metade remodulada em PM com o sinal RF do UL. Esta dupla modulação em fase é a causa dos dois sinais aparecerem no UL com potências equivalentes.

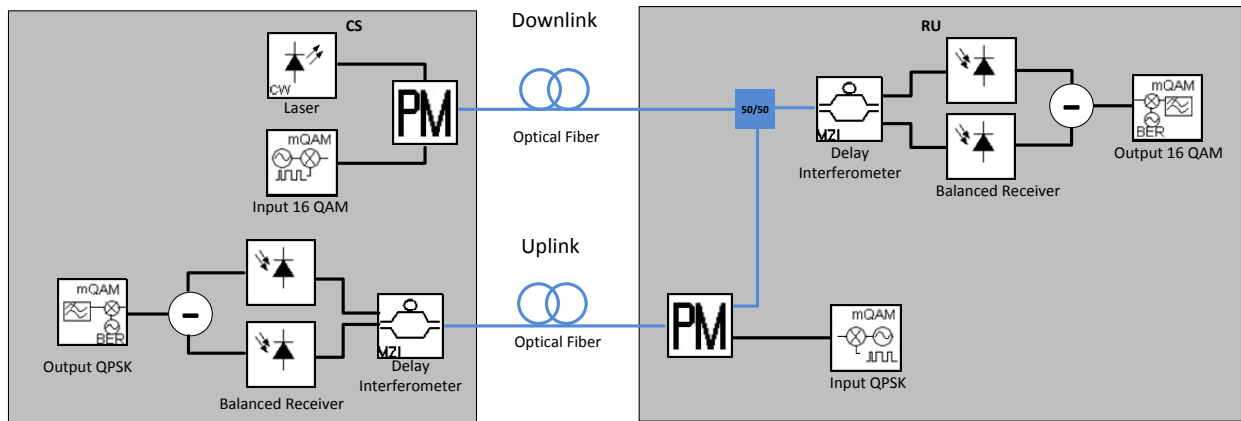


Figura 4.28: Arquitectura de um sistema RoF de baixo custo utilizando PM-PM.

Como o DL é idêntico ao do sistema PM-IM, apenas será estudada a parte relativa ao UL e qual o impacto que o DL tem no sinal de UL. A normalização do OMI para sinais 16-QAM foi apresentada anteriormente. No entanto, no UL é utilizado um sinal QPSK, o que leva a que a normalização seja efectuada com diferentes valores (i.e. 90°). Assim, a normalização do OMI para um sinal QPSK é dada por:

$$\beta = \frac{fase}{90} * 100[\%] \quad (4.3)$$

Onde, *fase* é o desvio de fase introduzido pelo modulador PM.

Tal como realizado anteriormente, para calcular o OMI do UL que gera o melhor valor de EVM, é transmitido um sinal de UL sem que seja transmitido qualquer sinal no DL. O gráfico da figura 4.29 apresenta os valores de EVM em função dos valores de OMI no UL. Analisando

o gráfico conclui-se que o melhor EVM, com um valor de 1,43%, obtem-se com um OMI de 44,4% ($\beta = 20^\circ$). Conclui-se também que não existe grande restrição no OMI utilizado no UL, pois é utilizado um sinal QPSK que permite um EVM de 12%, valor elevado comparado com o sinal 16-QAM utilizado no DL. Neste caso o OMI máximo para um EVM inferior a 12% é de 72,2% ($\beta = 65^\circ$), sendo o minimo de cerca de 2,2% ($\beta = 2^\circ$). Esta gama é superior à permitida por sinais 16-QAM, que como foi dito anteriormente está entre os 4,4% ($\beta = 1^\circ$) e os 75% ($\beta = 17^\circ$).

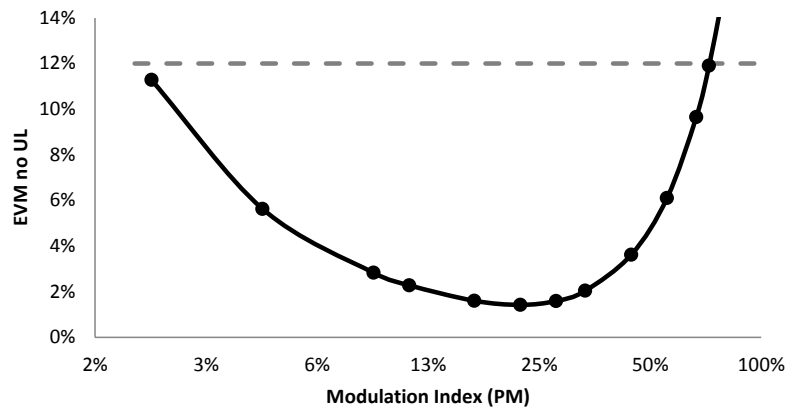


Figura 4.29: EVM em função do OMI no UL.

De seguida, é apresentado o estudo sobre a influência do sinal de DL na recepção de UL. Para tal, mantém-se o OMI do UL com o melhor valor, que é de 44,4%, e faz-se variar o valor do OMI no sinal de DL. No grafico da figura 4.30 é apresentado o EVM no UL em função do OMI do DL.

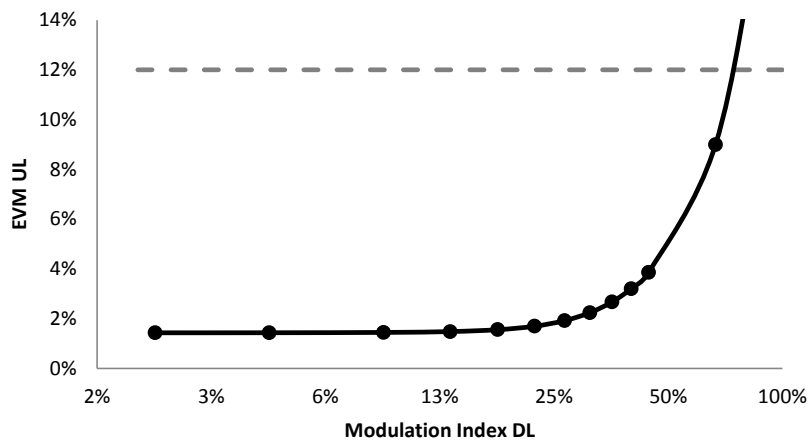


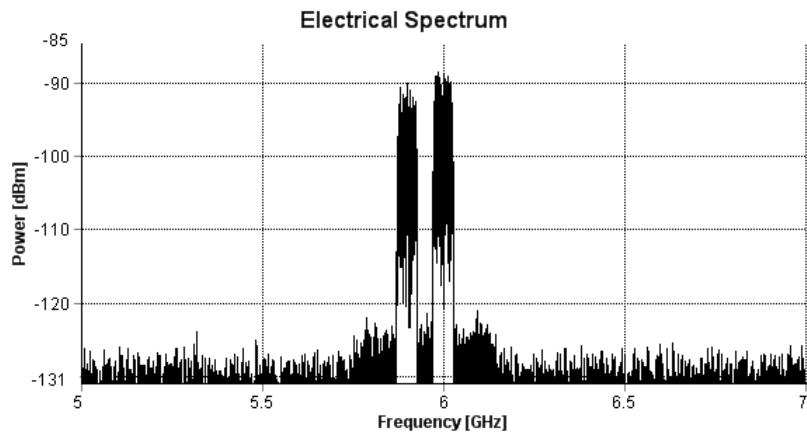
Figura 4.30: EVM do UL em função do OMI no UL.

Analisando o gráfico conclui-se que o sinal de DL influencia a recepção de UL, pois quanto maior for o OMI do DL pior é o EVM no UL. O melhor EVM no UL obtido anteriormente (1,43%) mantém-se até um OMI no DL de cerca de 13,3% ($\beta = 3^\circ$), sendo que a partir de um OMI de 17,8% ($\beta = 4^\circ$) o EVM no UL começa a aumentar exponencialmente, atingindo um nível acima do limite máximo para um valor de OMI perto dos 70%. Ou seja, para o valor de OMI no DL que apresenta melhor EVM (31,1%) o valor de EVM no UL é de 2,24%, estando assim bastante abaixo do limite máximo e permitindo a comunicação bidireccional com uma boa recepção.

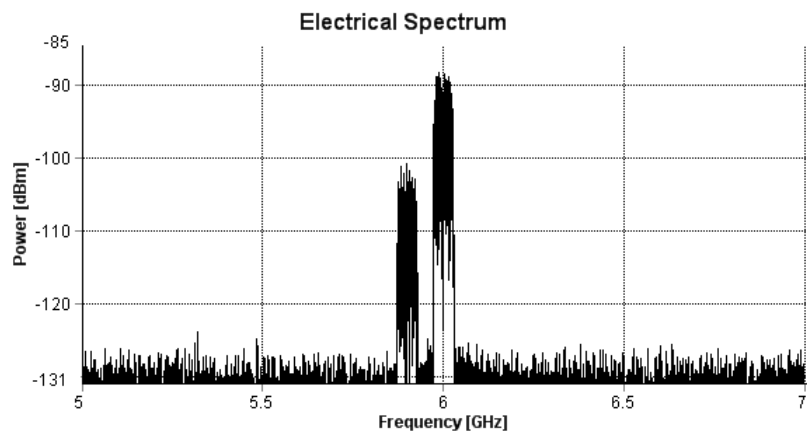
De referir ainda que o EVM no UL está abaixo do limite máximo para toda a gama de valores de OMI do DL, permitindo uma boa recepção do sinal. Assim, conclui-se que este sistema não é limitado pela influência do sinal de DL no sinal de UL, pois os valores de OMI utilizados no DL são limitados. Esta situação pode não se verificar caso o sinal transmitido no UL tenha uma maior restrição nos valores de EVM permitidos.

Na figura 4.31 é apresentado o sinal de UL na recepção, podendo-se observar também o sinal de DL. Tal como no sistema IM-IM, os dois sinais são recebidos no receptor de UL causando interferência entre si, embora a sua separação na frequência permita a recepção individual de cada um, possibilitando a comunicação. São apresentados três exemplos, sendo no primeiro (a) utilizado o melhor OMI tanto para o DL como para o UL (31,1% e 22,2%). No segundo exemplo (b) é apresentado o caso onde o EVM no UL têm o menor valor e o EVM no DL está abaixo dos 6%, ou seja OMIs de 8,9% e 22,2% para o DL e UL, respectivamente. Por fim, no terceiro exemplo (c) é utilizado um OMI de 66,7% no DL, afectando assim bastante a recepção no UL.

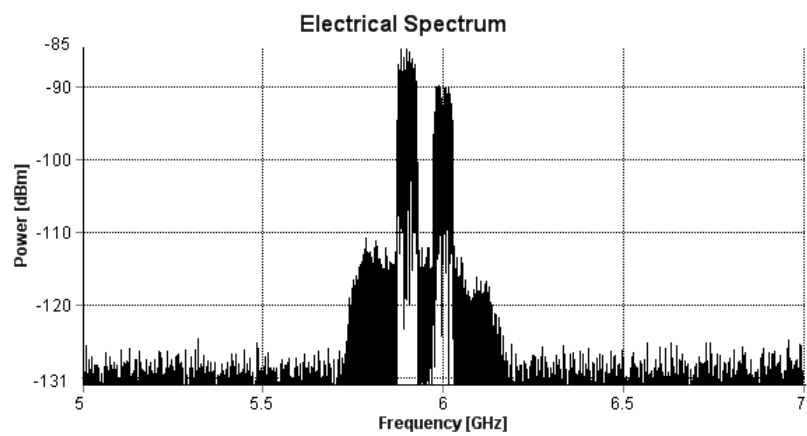
Como análise final deste sistema, conclui-se que esta solução, tal como a solução IM-IM, é claramente pior que a solução PM-IM. Esta solução apresenta como principal vantagem face a solução IM-IM a menor influência do OMI do DL no sinal de UL. As desvantagens relativamente à solução IM-IM são os maiores valores de EVM, principalmente na ligação de DL, e uma maior complexidade nos receptores PM.



(a) Melhor caso para o DL e UL.



(b) Melhor caso para o UL



(c) Pior caso para o UL

Figura 4.31: Recepção do sinal de UL no sistema PM-PM.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

Os sistemas RoF permitem transmitir sinais modulados em RF sobre fibra óptica, simplificando assim as estações base, pois passam a ser divididas em estações centrais de processamento e em unidades remotas. Nas unidades remotas apenas são efectuadas conversões E-O e O-E de modo a transmitir e receber os sinais provenientes de uma antena.

O objectivo desta dissertação foi o estudo da propagação de sinais num sistema RoF. Primeiro foi efectuada uma comparação entre um sistema bidireccional convencional, onde são utilizados dois lasers para a transmissão nos dois sentidos, e um sistema de baixo custo, onde apenas é utilizado um laser para a transmissão no sentido descendente e onde é remodulada a portadora para o sentido ascendente.

Assim, concluiu-se que, comparativamente a um sistema convencional, os resultados obtidos com o sistema de baixo custo são piores relativamente à qualidade da transmissão mas melhores em termos de custos associados, pois apenas utilizam um laser, tornando a estação remota ainda mais simples. Embora os resultados sejam piores, estão dentro dos limites impostos, sendo realizável a utilização destes sistemas de baixo custo para curtas e medias distâncias. Para distâncias longas, há que ter em atenção que num sistema com apenas um laser o sinal óptico percorre duas vezes a distância da CS até à RU, o que torna a distância um factor bastante limitativo devido aos níveis reduzidos de sinal recebidos no UL. Neste caso, pode-se optar por utilizar amplificação óptica, sendo que esta solução aumenta os custos do sistema e poderá não ser compensatório face à solução convencional.

Relativamente à modulação óptica utilizada nos sistemas de baixo custo, conclui-se que a melhor solução é a utilização de PM no DL e IM no UL, pois nesta situação o sinal de DL não têm grande influência no sinal de UL, devido à potência constante do sinal PM. Esta potência constante não causa restrições no valor do OMI utilizado no DL. A única desvantagem desta solução é a complexidade na desmodulação PM, a qual não pode ser directa como numa

solução em que se utiliza IM. A solução em que se utiliza IM nos dois sentidos também é viável, mas apenas para sistemas com distâncias curtas, pois existe uma grande restrição com o OMI utilizado no DL. A potência do sinal de DL não poderá ser muito alta pois causa interferência com o canal de UL. No entanto, esta solução torna-se mais simples e conseqüentemente mais barata devido à baixa complexidade do receptor IM. A solução que utiliza PM nos dois sentidos tem as mesmas restrições que a solução que utiliza IM nos dois sentidos, tendo no entanto a vantagem de o sinal de UL não restringir o OMI do DL. Também neste sistema existe o problema relativo à complexidade da recepção, o que é uma desvantagem face à utilização de IM.

5.2 Trabalho futuro

Nas comunicações ópticas existem inúmeras soluções em estudo, no que se refere ao melhoramento do desempenho destes sistemas. A constante evolução das comunicações ópticas leva ao estudo de componentes ópticos e modulações mais avançadas que permitam um melhor desempenho e custos reduzidos.

Assim, existem inúmeras propostas de trabalho futuro no âmbito desta dissertação, nomeadamente estudar quais os melhores componentes ópticos a utilizar em sistemas rádio sobre fibra. Neste sentido, é possível fazer variar as características dos componentes a utilizar, desde fibras ópticas, fontes, receptores e modulações. Pode-se também estudar quais os melhores sinais rádio que se podem transmitir em fibras ópticas, estudando assim os limites dos sistemas rádio sobre fibra e tentando arranjar soluções que cada vez mais possam explorar a capacidade máxima dos sistemas ópticos e sistemas rádio.

Referências

- [1] Gerd Keiser. *Optical Fiber Communications*. McGraw Hill, Singapore, 1991.
- [2] A. Bruce Carlson; Paul B. Crilly; Janet C. Rutledge. *Communication Systems - An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication*. McGraw Hill, 2002.
- [3] European Space Agency. Another World First For ARTEMIS: A Laser Link With An Aircraft. <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=27945>, Dezembro 2006.
- [4] T. H. Maiman. Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, 187:494, 1960.
- [5] K. C. Kao; G. A. Hockham. Dielectric-Fibre Surface Waveguides For Optical Frequencies. *Proceedings of the IEEE*, 113:1151–1158, 1966.
- [6] F. P. Kapron; D. B. Keck; R. D. Maurer. Radiation Losses in Glass Optical Waveguides. *Applied Physics Letters*, 17:423–425, 1970.
- [7] Ira Jacobs. Atlanta Fiber System Experiment. *The Bell System Technical Journal*, 57:1717–1721, 1976.
- [8] Jeremiah Hayes. A History of Transatlantic Cables. *IEEE Communications Magazine*, 1:42–48, 2008.
- [9] Yutaka Miyamoto; Senichi Suzuki. Advanced Optical Modulation and Multiplexing Technologies for High-Capacity OTN Based on 100 Gb/s Channel and Beyond. *IEEE Communications Magazine*, Março 2010.
- [10] Guillaume Vu-Brugier. Analysis of the Impact of Early Fiber Access Deployment on Residential Internet Traffic. In *Teletraffic Congress*, 2009.
- [11] International Telecommunication Union. <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>, 2010. Último acesso em 14 Março de 2011.
- [12] Probir K. Bondyopadhyay. Marconi’s 1901 Transatlantic Wireless Communication Experiment. Mahanad Communications Inc.

- [13] Kai Chang. *RF and Microwave Wireless Systems*. John Wiley and Sons, New York, United States of America, 2000.
- [14] Kabelwerk Eupen AG, Belgium. *Data Sheet RG214/U*, Março 2007.
- [15] Rajiv Ramaswami; Kumar Sivarajan; Galen Sasaki. *Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition*. Morgan Kaufmann, 2010.
- [16] K. M. Djafar. Teaching Fiber-Optic Communications in Engineering Technology Program by Virtual Collaboration with Industry. Education and Training in Optics and Photonics, 2003.
- [17] R. Abdolee; R. Ngah; V. Vakilian; T. A. Rahman. Application of Radio-over-Fiber (RoF) in Mobile Communication. *Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceedings*, 1:1–5, 2007.
- [18] H. Chettat; L. M. Simohamed; Y. Bouslimani; H. Hamam. RoF Networks : A Comprehensive Study. *Wireless Pervasive Computing*, 1:495–498, 2008.
- [19] M. Crisp; R.V. Penty; I.H. White; A. Bell. Wideband Radio over Fiber Distributed Antenna Systems for Energy Efficient In-building Wireless Communications. *Vehicular Technology Conference*, 1:1–5, 2010.
- [20] W. D. Jemison; E. Funk; M. Bystrom; P. R. Herczfeld; I. Frigyes; T. Berceci. Fiber Radio: From Links to Networks. *Microwave Photonics*, 1:169–172, 2001.
- [21] Xin Qian. *Optically-Amplified Radio-over-Fibre Systems*. PhD thesis, University of Cambridge, 2006.
- [22] M. Brenci; P. F. Checcacci. RF Reference Signal Transport by Optical Fibers. *IEEE Transactions on Communications*, 28:1847–1848, 1980.
- [23] A. J. Cooper. Fibre/Radio For The Provision of Cordless/Mobile Telephony Services in The Access Network. *Electronics Letters*, 26:2054–2056, 1990.
- [24] Jiunn-Shyen Wu; Jingshown Wu; Hen-Wai Tsao. A Radio-over-Fiber Network for Microcellular System Application. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 47:84–94, 1998.
- [25] R. P. Braun; G. GroBkopf; D. Rohde. Optical Millimeter-wave Generation And Transmission Technologies For Mobile Communications, An Overview. *IEEE Microwave Systems Conference*, 1:239–242, 1995.

- [26] Michel Goloubkoff; Elisabeth Pknard; Daniel Tanguy; Pierre Legaud; Dean Mathoorasing; Fabrice Devaux; Christophe Minot. Outdoor and Indoor Applications for Broadband Local Loop with Fibre supported mm-wave Radio Systems. *IEEE MTT-S Digest*, 1:31–34, 1997.
- [27] Allen Telecom’s Radio-over-Fiber Technology Powers Mobile Communications at Sydney 2000 Olympics. *Fiber Optics Business*, Novembre 2000.
- [28] Nadya Anscombe. Demand for Indoor Coverage Drives Radio-over-Fibre. *Wireless Europe*, 2005.
- [29] Andrea Casini; Pier Faccin. Wavelength Division Multiplication Technologies for UMTS Radio Coverage Extension by using the Radio over Fibre Technique. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 1:123–128, 2003.
- [30] Ajung Kim; Young Hun Joo; Yungsoo Kim. 60 GHz Wireless Communication Systems with Radio-over-Fiber Links for Indoor Wireless LANs. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50:517–520, 2004.
- [31] David Wake; Keith Beacham. A Novel Switched Radio over Fiber Architecture for Distributed Antenna Systems. *Lasers and Electro-Optics Society*, 1:55–56, 2004.
- [32] Tsutomu Niiho; Mariko Nakaso; Koichi Masuda; Hiroyuki Sasai; Kuniaki Utsumi; Masaru Fuse. Multi-channel Wireless LAN Distributed Antenna System Based on Radio-over-Fiber Techniques. *Lasers and Electro-Optics Society*, 1:57–58, 2004.
- [33] ABI Research. *In-Building Wireless Systems*, 2004.
- [34] Ming-Li Yee; Anthony Ng’Oma; Michael Sauer. Performance Analysis of IEEE 802.16e WiMAX Radio-over-fiber Distributed Antenna System. *IEEE Microwave Systems*, 1:197–200, 2009.
- [35] C. H. Yeh; C. W. Chow ; F. Y. Shih; C. H. Wang; Y. F. Wu; Y. L. Liu; D. Z. Hsu; Allan Lin; Denial Mai; S. Chi. Performance and Limitation of Radio-over-Fiber Network Using Standard WiMAX Signal. *Wireless and Optical Communications Networks*, 1:1–4, 2009.
- [36] Mohammad Shaifur Rahman; Jung Hyun Lee; Youngil Park; Ki-Doo Kim. Radio over Fiber as a Cost Effective Technology for Transmission of WiMAX Signals. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 56:424–428, 2009.
- [37] Davide Visani; Giovanni Tartarini; Luigi Tarlazzi; Pier Faccin. Transmission of UMTS and WiMAX Signals Over Cost-Effective Radio over Fiber Systems. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 19:831–833, 2009.

- [38] FUTON - Fibre-Optic Networks for Distributed Extendible Heterogeneous Radio Architectures and Service Provisioning. <http://www.ict-futon.eu/>. Último acesso em 15 Março de 2011.
- [39] Carlos Santiago; Bodhisattwa Gangopadhyay; Artur M. Arsenio; M.V.Ramkumar; Neeli R. Prasad. Next Generation Radio over Fiber Network Management for a Distributed Antenna System. *Wireless VITAE*, 1:182–186, 2009.
- [40] Paulo Monteiro; Sílvia Pato; Esther López; David Wake; Nathan J. Gomes; Atilio Gameiro. Fiber Optic Networks for Distributed Radio Architectures: FUTON concept and operation. *Wireless Communications and Networking Conference*, 1:1–5, 2010.
- [41] Fabian Diehm; Patrick Marsch; Gerhard Fettweis. The FUTON Prototype: Proof of Concept for Coordinated Multi-Point in Conjunction with a Novel Integrated Wireless/Optical Architecture. *Wireless Communications and Networking Conference*, 1:1–4, 2010.
- [42] P. K. L. Yu G. L. Li. Optical Intensity Modulators for Digital and Analog Applications. *Journal of Lightwave Technology*, 21:2010–2030, 2003.
- [43] Charles H. Cox III; Edward I. Ackerman; Gary E. Betts; Joelle L. Prince. Limits on the Performance of RF-over-Fiber Links and Their Impact on Device Design. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54:906–920, 2006.
- [44] ThorLabs. *Manual of Electro-Optic Phase Modulators*, 2007.
- [45] Hong Bong Kim. *Radio over Fiber based Network Architecture*. PhD thesis, Technischen Universität Berlin, 2005.
- [46] Shangyuan Li; Xiaoping Zheng; Hanyi Zhang; Bingkun Zhou. Highly Linear Radio-over-Fiber System Incorporating a Single-Drive Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22:1775–1777, 2010.
- [47] Fernando Fortes. Apontamentos de Sistemas de Electronica e Telecomunicações. ADEECT-ISEL, Setembro 2009.
- [48] Anthony Ng’oma. *Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems*. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [49] Thomas E. Darcie; George E. Bodeep. Lightwave Subcarrier CATV Transmission Systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 38:524–533, 1990.
- [50] Mohd Fairuz Yusof; Malek Al-Qdah; Siti Barirah Ahmad Anas; Mohamad Khazani Abdullah. Increasing Optical Fiber Transmission Bandwidth Using SCM-WDM Technique. In *Asian Pacific Communications Conference*, 2003.

- [51] Muhammad Haider Raza; Kamran Zaidi; S.M.H Zaidi. A Review of Full-Duplex WDM RoF Architectures. In *Proc. of SPIE Vol. 6784*, 2007.
- [52] Li Wenjing; Sang Xinzhu; Yuan Jinhui; Wang Kuiru; Yu Chongxiu; Xin Xinagjun. Millimeter-Wave Multi-Carrier Generation for WDM-ROF System Without Ultra-High-Speed Modulator. *Optoelectronics and advanced materials*, 4:1901–1905, 2010.
- [53] Darko Zibar; Idelfonso Tafur Monroy; Christophe Peucheret; Leif A. Johansson; John E. Bowers; Palle Jeppesen. DSP based Coherent Receiver for Phase-Modulated Radio-over-Fiber Optical Links. In *Optical Society of America*, 2008.
- [54] Ho-Chul Ji; Hoon Kim; Yun Chur Chung. Full-Duplex Radio-over-Fiber System Using Phase-Modulated Downlink and Intensity-Modulated Uplink. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21:9–11, 2009.
- [55] Hoon Kim. Phase-Modulated Subcarrier-Multiplexed Transmission Systems.
- [56] Hoon Kim; H. C. Ji; Jun Haeng Lee. Nonlinear Optical Crosstalk in Analog Phase-Modulated Wavelength-Division-Multiplexed Systems. In *Optics Express*, 2008.
- [57] Thomas R. Clark; Michael L. Dennis. Coherent Optical Phase-Modulation Link. *IEEE Photonics Technology Letters*, 19:1206–1208, 2007.
- [58] Yifei Li; Renyuan Wang; Ashish Bhardwaj; Sasa Ristic; John Bowers. High Linearity InP-Based Phase Modulators Using a Shallow Quantum-Well Design. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22:1340–1342, 2010.
- [59] A. R. Chraplyvy; R. W. Tkach; L. L. Buhl; R. C. Alfarness. Phase Modulation to Amplitude Modulation Conversion of CW Laser Light in Optical Fiber. *Electronics Letters*, 22:409–410, 1986.
- [60] Hsu-Feng Chou; Anand Ramaswamy; Darko Zibar; Leif A. Johansson; John E. Bowers; Mark Rodwell; Larry A. Coldren. Highly Linear Coherent Receiver With Feedback. *IEEE Photonics Technology Letters*, 19:940–942, 2007.
- [61] Darko Zibar; Leif A. Johansson; Hsu-Feng Chou; Anand Ramaswamy; Mark Rodwell; John E. Bowers. Novel Optical Phase Demodulator Based on a Sampling Phase-Locked Loop. *IEEE Photonics Technology Letters*, 19:686–688, 2007.
- [62] Keang-Po Ho. *Phase-Modulated Optical Communication Systems*. Springer Science and Kusiness Media. Inc., 2005.
- [63] Vicente Mazzolla Morais. Metodologia Para Implementação de Serviços Digitais em uma Rede HFC Existente. Master’s thesis, Universidade Federal do Paraná, 2006.

- [64] VPIsystems. *Photonic Modules Reference Manual*.
- [65] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems.
- [66] Antonio Saraiva Fernandes. *Sebenta da disciplina de sistemas de telecomunicações II*. ADEETC-ISEL, Dezembro 2004.