

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Redes de Bragg para Compensação de Dispersão e
Seleccção de Comprimento de Onda em Sistemas
WDM Fibra-Rádio**

Simão Pedro Costa Machado

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Henrique Manuel de Castro Faria Salgado

Julho de 2008

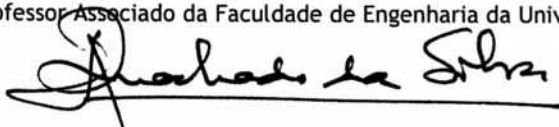
A Dissertação intitulada

“Redes de Bragg para Compensação de Dispersão e Selecção de Comprimento de Onda em Sistemas WDM Fibra-Rádio”


foi aprovada em provas realizadas 21/Julho/2008

o júri

Presidente Professor Doutor José Alberto Peixoto Machado da Silva
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor António Luís Jesus Teixeira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro



Professor Doutor Henrique Manuel de Castro Faria Salgado
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Autor - Simão Pedro Costa Machado



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Esta tese de mestrado, tem como principal objectivo o estudo dos sistemas RoF e das suas tecnologias adjacentes. Tecnologias estas que contribuem para a redução das limitações destes sistemas, assim como a sua aplicação como alternativas sustentadas ao desenvolvimento destes.

Os sistemas rádio sobre fibra, são constituídos genericamente por uma estação central (onde reside a maioria da complexidade), ligada via fibra óptica a múltiplas estações base que radiam o sinal para as entidades móveis, que são nada mais nada menos que, os utilizadores finais.

Ao longo deste documento, são discutidas as vantagens e desvantagens apresentadas por este tipo de sistemas, focando-se a atenção na compensação das penalidades associadas à dispersão cromática. No combate desta, é proposto como solução a utilização de redes de Bragg com índice de refração negativo ou então a filtragem SSB na estação base, sendo adoptada a última.

É dado especial cuidado às técnicas e esquemas para optimização da eficiência espectral, nomeadamente à multiplexagem SCM/WDM com entrelaçamento, sendo ainda proposto um novo esquema de entrelaçamento, utilizando sinais SSB.

Evidenciam-se as múltiplas propriedades das redes de Bragg, assumindo particular destaque, aquelas que permitem realizar a operação de demultiplexagem e simultaneamente compensar a dispersão.

De forma a validar o estudo realizado, é concebido um esquema de simulação que integra a ligação descendente da estação central à estação base, e desta à entidade móvel.

São realizadas várias simulações, que têm como principais objectivos:

- Verificar o comportamento do sistema utilizando a técnica de multiplexagem SCM/WDM com entrelaçamento;
- Optimizar o espaçamento entre portadoras ópticas;
- Concretizar a ligação descendente de um sistema rádio sobre fibra com topologia em anel, constituído por cinco estações base.

Abstract

This master's thesis has its main purpose the study of Radio over Fibre systems and its adjacent technologies. These technologies contribute to the penalties reductions that affect these systems as well as its application as alternatives to the sustained development.

The radio over fibre systems are generally made by a central station (where is the major complexity lies), linked via optical fibre to multiple base stations that send the signal to the mobile entities, which are end-users.

All the way through this document the advantages and disadvantages presented by such systems is discussed, focusing on the compensation of the penalties associated with the chromatic dispersion. In this struggle is proposed, as a solution, to use fiber Bragg gratings with negative refraction index or the SSB filtering in the base station, the latter being the one elected.

Special attention is given to the techniques and schemes for maximize the efficiency spectrum, including the multiplex SCM / WDM with interleaving and even a new scheme of interleaving, using SSB signals is proposed.

Many properties of fiber Bragg gratings are exposed, assuming particular attention to those that can deliver the operation of demultiplexing and simultaneously reimburse the dispersion.

In order to validate the study, a simulation scheme is studied that incorporates the downlink connection, from the central station to the base station, and finally, to the mobile entity.

Several simulations are carried out, which have as main objectives:

- Check the system behavior using the technique of multiplexing SCM / WDM with interleaving;
- Optimize the spacing between optical carriers;
- Reproduce the downlink connection of a radio over fibre system with a ring topology and five base stations.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1-	Motivação	1
1.2-	Estrutura da tese	2
1.3-	Contribuições	2
2	SISTEMAS RÁDIO SOBRE FIBRA	5
2.1-	Introdução	5
2.2-	Conceito	5
2.3-	Revisão do estado da arte	6
2.4-	Arquitectura	8
2.4.1-	Arquitectura genérica de um sistema RoF	8
2.4.2-	Topologias da rede	10
2.4.3-	Configuração das Estações Base	12
2.4.4-	Configuração da Estação Central	13
2.5-	Vantagens da ligação RoF	14
2.5.1-	Baixas perdas por atenuação: RoF vs Linhas de Transmissão	14
2.5.2-	Elevada largura de banda	14
2.5.3-	Imunidade a ruído electromagnético	15
2.6-	Limitações	16
2.6.1-	Ruído, distorção e gama dinâmica	16
2.6.2-	Dispersão	16
2.7-	Aplicações	23
2.8-	Conclusão	24
3	OPTIMIZAÇÃO DA TECNOLOGIA ROF	25
3.1-	Introdução	25
3.2-	Geração de sinais RF e Microondas	25

3.3-	Técnicas para otimização da eficiência espectral	26
3.3.1-	Multiplexagem por divisão nos comprimentos de onda	26
3.3.2-	Multiplexagem SCM/WDM	27
3.3.3-	Entrelaçamento de comprimentos de onda em SCM/WDM	28
3.3.4-	Esquema de entrelaçamento com sinais SSB	29
3.4-	Filtragem SSB para compensação da dispersão	31
3.5-	Redes de Bragg	32
3.5.1-	Conceito	32
3.5.2-	Princípio de funcionamento	33
3.5.3-	Estrutura do grating	34
3.5.4-	FBGs em sistemas WDM	36
3.5.5-	Multiplexador Óptico add/drop	38
3.6-	Conclusão	38
4	SIMULAÇÃO	41
4.1-	Introdução	41
4.2-	Descrição do sistema simulado	41
4.3-	Perfil da rede de Bragg simulada	45
4.4-	Otimização do espaçamento entre canais ópticos	46
4.4.1-	Considerações	46
4.4.2-	Espaçamento Óptico versus BER	46
4.5-	Ligação descendente de um sistema RoF em anel	52
4.6-	Conclusão	54
5	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	59

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Arquitectura genérica de um sistema rádio de ondas milimétricas suportado em fibra óptica.	8
Figura 2.2 - Topologias da rede de um sistema rádio sobre fibra genérico.	11
Figura 2.3 - Configuração genérica da estação base.	12
Figura 2.4 - Configuração genérica da estação central.	13
Figura 2.5 - Penalidade da dispersão para um sinal de frequência 60 GHz aplicado a uma fibra com $D = 17ps/(nm \cdot Km)$	22
Figura 2.6 - Alargamento dos impulsos para três tipos de Fibra Óptica.	23
Figura 3.1 - Mapa de técnicas de geração de ondas milimétricas e imposições de modulações.	26
Figura 3.2 - Multiplexagem por divisão nos comprimentos de onda (WDM).	27
Figura 3.3 - SCM sobre WDM.	27
Figura 3.4 - SCM sobre WDM com intercalamento.	28
Figura 3.5 - Sinais SSB com multiplexagem SCM sobre WDM com entrelaçamento.	29
Figura 3.6 - Sinais DSB com multiplexagem SCM sobre WDM com entrelaçamento.	30
Figura 3.7 - Modificação da estação central para adoptar esquema de entrelaçamento SCM/WDM com sinais SSB.	31
Figura 3.8 - Rede de Bragg na fibra óptica.	33
Figura 3.9 - Funcionamento de uma rede de Bragg.	34
Figura 3.10 - Tipos de estruturas de FBGs.	35
Figura 3.11 - Alterações no índice de refração da fibra óptica.	36
Figura 3.12 - (a) Formatos de apodização; (b) Efeito da apodização na resposta espectral das redes de Bragg.	37
Figura 3.13 - Resposta espectral (a) e atraso introduzido (b) por redes de Bragg com diferentes valores médios da variação do índice de refração	37
Figura 3.14 - Multiplexador Óptico <i>Add/Drop</i>	38
Figura 4.1 - Esquema de entrelaçamento de comprimentos de onda do sistema experimental simulado, com 30 GHz de espaçamento entre portadoras ópticas.	42
Figura 4.2 - Configuração base do sistema experimental simulado.	43
Figura 4.3 - Espectro óptico da multiplexagem dos vários comprimentos de onda entrelaçados.	44

Figura 4.4 - Espectro óptico corresponde à filtragem SSB na estação base.	44
Figura 4.5 - Esquema utilizado na obtenção do perfil da rede de Bragg.....	44
Figura 4.6 - Espectro de potência do sinal transmitido (verde) e o sinal reflectido (azul) para uma FBG de largura de banda 36.9 GHz (parâmetro do software VPI).	45
Figura 4.7 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos para a 1ª banda lateral.	47
Figura 4.8 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos para a 3ª banda lateral.	48
Figura 4.9 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos para a 5ª banda lateral.	48
Figura 4.10 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos, conjugando os resultados da desmodulação da 1ª e 5ª sub-portadoras RF, para um laser com de 10 MHz de largura espectral.	49
Figura 4.11 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos, conjugando os resultados da desmodulação da 1ª e 5ª sub-portadoras RF, para um laser com de 5 MHz de largura espectral.....	50
Figura 4.12 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos, considerando a desmodulação a 3ª sub-portadora RF [37].....	50
Figura 4.13 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos, conjugando os resultados da desmodulação da 1ª e 5ª sub-portadoras RF, para um laser com de 10 MHz de largura espectral, utilizando modulação PSK.	51
Figura 4.14 - Configuração do sistema rádio sobre fibra na ligação descendente.	52
Figura 4.15 - Espectro óptico do sinal transmitido pela rede de Bragg da BS2.....	54
Figura 4.16 - Espectro óptico do sinal reflectido pela rede de Bragg da BS3.....	54
Figura 4.17 - Espectro óptico do sinal transmitido pela rede de Bragg da BS3.....	544

Lista de Tabelas

Tabela 4.1- Parâmetros de simulação para amostragem de sinal.	43
Tabela 4.2- Taxa de erros obtida na desmodulação da 5ª sub-portadora RF, em função do canal óptico filtrado.	54

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

BS	Estação Base
BSs	Estações Base
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BER	Taxa de <i>bits</i> errados
CS	Estação de Controlo Central
DCF	Fibra de Compensação da Dispersão
DCM	Módulo de Compensação da Dispersão
DCMs	Módulos de Compensação da Dispersão
DR	Gama Dinâmica
DSB	Dupla banda lateral
DWDM	Multiplexagem por Divisão de Comprimento de Onda Denso
EDFA	Amplificador de Fibra Dopado com Érbio
EMI	Imunidade a Interferências Electromagnéticas
FBG	Rede de Bragg
FBGs	Redes de Bragg
FSMS	Sistema Rádio de Ondas Milimétricas suportado por Fibra Óptica
GSM	Sistema Global para Comunicações Móveis
IF	Frequência Intermédia
LO	Oscilador Local
ME	Unidade Móvel
MEs	Unidades Móveis
NDSF	Non - Dispersion Shifted Fiber
NF	Figura de Ruído
OFDM	Multiplexagem Ortogonal por Divisão nas Frequências
OTDM	Multiplexagem Óptica por Divisão no Tempo
QAM	Modulação da Amplitude em Quadratura
RAU	Unidade de Antena Remota
RAUs	Unidades de Antenas Remotas
RF	Rádio - Frequência
RoF	Rádio sobre Fibra
SCM	Multiplexagem de Sub-portadoras

SFDR	Gama Dinâmica Livre de Espúrios
SSB	Banda lateral Única
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicações Móveis
WDM	Multiplexagem por Divisão no Comprimento de Onda
WiMAX	Interoperabilidade Mundial para Acesso por Microondas
WLAN	Rede de Área Local Sem Fios
onda-mm	Onda Milimétrica
Ondas-mm	Ondas Milimétricas

Lista de símbolos

ω	Frequência angular
λ	Comprimento de onda
β	Constante de propagação
E	Amplitude do campo eléctrico
m	Índice de modulação
ω_1	Frequência do sinal modulador
ω_c	Frequência da portadora óptica
τ	Atraso de propagação
L	Comprimento da fibra
v_g	Velocidade de grupo
D	Coefficiente de dispersão da velocidade de grupo
θ	Deslocamento de fase acumulado pelas bandas laterais
θ_2	Deslocamento de fase acumulado pela banda lateral
θ_1	Deslocamento de fase acumulado pela portadora óptica
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
n	Índice de refração médio do <i>grating</i>
Λ	Período do <i>grating</i>
δn_0	Varição no índice de refração
η	Fracção de potência no núcleo
N	Número de variações periódicas
L_g	Comprimento do <i>grating</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1- Motivação

Ao longo dos últimos anos, tem-se assistido a um aumento exponencial da procura por acessos *wireless* de banda larga. Os consumidores actuais, estão cada vez menos interessados na tecnologia subjacente, simplesmente necessitam de um sistema de comunicação que seja fiável, que tenha um custo acessível e que permita suportar “*anytime, anywhere, any media*” [1] que desejem.

Os sistemas rádio sobre fibra (RoF), exploram a possibilidade de geração de sinais rádio frequência (RF) ou de ondas milimétricas (ondas-mm) e, a sua transmissão por meio de técnicas ópticas para a interligação da estação central (CS) a um grande número de micro ou pico células (estações base (BSs)). Daqui resulta uma centralização de recursos e equipamento complexo na estação central, com a conseqüente simplificação das estações base, permitindo assim reduzir a relação custo-eficácia no desenvolvimento das BSs, que por sua vez é a chave para o sucesso no mercado desta tecnologia [2].

A grande atracção em ligar a CS às BSs utilizando uma rede de fibra óptica, tem a ver com as baixas perdas que a fibra apresenta, a sua imunidade a ruído electromagnético e com a sua vasta largura de banda [3], sendo necessário um grande número de estações base devido às grandes perdas de transmissão em espaço livre de onda-mm [4].

Infelizmente, este tipo de tecnologia apresenta também limitações, ao nível da atenuação (*limits: “How far”*) e principalmente ao nível da dispersão (*limits: “How fast”*) [5]. Esta última limitação condiciona severamente esta tecnologia, e como tal métodos para combater este problema serão aqui abordados.

Os sistemas RoF podem ainda explorar técnicas de multiplexagem por divisão de comprimento de onda (Wavelength Division Multiplexing (WDM)) na interligação da CS às BSs com vantagens em termos de aumento de capacidade e facilidade de reconfiguração, flexibilidade no encaminhamento dos sinais e protecção da rede [6]. Outras técnicas que permitem o aumento da eficiência espectral, são também alvo de grande interesse como multiplexagem de sub-portadoras (SCM) e também esquemas de entrelaçamento de canais ópticos.

Os sistemas sem fios baseados na transmissão de sinais ondas-mm suportados por fibra óptica e usando técnicas de multiplexagem como WDM, representam uma tecnologia importante para o rápido desenvolvimento e instalação de sistemas sem fios de elevada largura de banda [6], daí o interesse e actualidade deste tipo de sistema.

1.2- Estrutura da tese

Após a introdução, no capítulo 2 é feita uma análise genérica dos sistemas rádio sobre fibra, sendo explicado com algum detalhe em que é consistem, e como são constituídos.

Começa-se com uma breve explicação do conceito, partindo de seguida para uma revisão do estado da arte, onde é dada especial ênfase às redes de Bragg, e a um vasto número de métodos e tecnologias utilizadas para otimizar estes sistemas nos pontos que se revelam mais frágeis. É abordada a arquitectura seguida pelos sistemas RoF, nomeadamente expondo um esquema genérico, as topologias da rede, e a configuração das estações base e estação central. Apresentam-se também as vantagens e limitações constituintes de um sistema rádio sobre fibra genérico. Por último são citadas algumas aplicações para este tipo de sistemas.

No capítulo 3, é feita uma análise mais específica às técnicas e tecnologias utilizadas pelos sistemas rádio sobre fibra. São abordadas as técnicas de geração de sinais RF e microondas assim como os vários processos utilizadas para optimização da eficiência espectral, como SCM, WDM, entrelaçamento, e ainda geração de sinais SSB na estação central. É demonstrado teoricamente, como a utilização de filtragem SSB poderá ser utilizada na compensação da dispersão. Por fim, neste capítulo estuda-se ainda, o comportamento e os vários tipos de redes de Bragg existentes.

No capítulo 4 são realizadas várias simulações com um sistema rádio sobre fibra, através do software “VPI photonics”. É traçado o perfil em termos espectrais da rede de Bragg a ser simulada. São feitas várias iterações de modo a otimizar o espaçamento entre portadoras ópticas (canais ópticos), e concretiza-se também a ligação descendente de um sistema rádio sobre fibra com topologia em anel, constituído por cinco estações base.

Finalmente, são expostas as conclusões obtidas, surgindo em forma de um resumo crítico de todo o trabalho realizado. São por fim enunciadas algumas propostas ou caminhos a seguir no futuro.

1.3- Contribuições

Neste trabalho de dissertação, podem ser destacadas algumas contribuições para a evolução dos sistemas rádio sobre fibra:

- Análise detalhada do impacto da dispersão em sistemas analógicos, recorrendo à transmissão de sinais DSB. Ver subsecção 2.6.2 do capítulo 2;
- Análise de técnicas para optimização da eficiência espectral, incluindo um novo esquema de entrelaçamento com sinais SSB. Ver secção 3.3 do capítulo 3;
- Demonstração da compensação da dispersão recorrendo a filtragem SSB na estação base, ou mesmo à transmissão de sinais SSB na estação central. Ver secção 3.4 do capítulo 3;

- Optimização do espaçamento entre canais ópticos, utilizando os vários elementos de um sistema rádio sobre fibra. Subsecção 4.4.2 do capítulo 4;
- Concretização de uma ligação descendente de um sistema RoF com topologia de rede em anel, recorrendo a cinco estações base. Ver secção 4.5 do capítulo 4.

Capítulo 2

Sistemas Rádio sobre Fibra

2.1- Introdução

Após esta secção, é apresentado o conceito rádio sobre fibra, em tom de familiarizar o termo com o leitor, assim como introduzir este tipo de sistemas.

Na secção 2.3, é feita a revisão do estado da arte dos sistemas rádio sobre fibra, sendo dado especial destaque às técnicas e tecnologias propostas por vários autores, com o intuito de otimizar este tipo de sistemas, nos pontos onde se revela mais débil.

Na secção 2.4, começa-se por expor a arquitectura genérica dos sistemas RoF, evidenciando quais os benéficos dessa constituição. Segue-se a ilustração das várias topologias da rede, onde se realiza uma análise crítica da topologia em anel. Explica-se ainda a configuração das estações base e também da estação central, indicando as funções dos elementos que as constituem.

Na secção 2.5, são apresentadas as vantagens dos sistemas RoF em comparação com as demais tecnologias, sublinhando as baixas perdas por atenuação, a elevada largura de banda e ainda a imunidade a ruído electromagnético.

Na secção 2.6, expõem-se as limitações dos sistemas RoF, nomeadamente o ruído, distorção e gama dinâmica, sendo tido especial cuidado na explicação das penalidades associadas à dispersão apresentada pelas fibras ópticas, e como esta incide nos sistemas RoF.

Na secção 2.7 são citados vários exemplos a título de demonstração da aplicabilidade dos sistemas RoF.

Por fim, na secção 2.8 apresentam-se as conclusões, que sumarizam o trabalho aqui realizado assim como destacam o que de mais importante se tratou neste capítulo.

2.2- Conceito

O conceito RoF significa transportar informação sobre fibra óptica através da modulação da luz com o sinal rádio. A técnica de modulação de uma sub-portadora de frequência rádio, numa portadora óptica para distribuição numa rede de fibra óptica é denominada por

tecnologia *radio over fiber*¹ [7]. Esta modulação pode ser feita directamente com o sinal rádio ou a uma frequência intermédia.

Segundo [7], uma ligação RoF consiste no hardware necessário para colocar um sinal RF numa portadora óptica, na ligação de fibra óptica, e no hardware necessário para recuperar o sinal RF da portadora.

2.3- Revisão do estado da arte

Este trabalho incide no uso redes de Bragg em sistemas rádio sobre fibra, como tal nesta secção será discutido o seu uso e aplicação neste contexto.

Uma rede de Bragg (FBG), é uma perturbação periódica ou aperiódica do índice de refração efectivo de uma porção de fibra óptica. Uma FBG, dependendo do perfil específico do índice de refração, pode funcionar como um elemento de selecção de comprimento de onda, isto é, pode reflectir uma gama restrita ou vasta, predeterminada de comprimentos de onda de luz incidente no *grating*, enquanto deixa passar todos os outros comprimentos de onda de luz, ou pode ainda funcionar como um elemento de atraso dependente do comprimento de onda. Consequentemente, as FBGs têm sido propostos para seguir uma grande variedade de tarefas na maioria dos sistemas de comunicações ópticas.

Naturalmente, as FBGs também têm sido propostas para acompanhar um certo número de tarefas em particular no caso de sistemas rádio sobre fibra utilizando ondas milimétricas. O estado da arte e alguns problemas ainda sem solução em aplicações de FBGs em sistemas rádio sobre fibra com uso de ondas-mm são descritos de seguida.

Uma das principais aplicações de FBGs incide sobre a compensação da dispersão cromática nos sistemas rádio sobre fibra de ondas-mm. A dispersão cromática na fibra desempenha um papel muito importante no desempenho dos sistemas rádio sobre fibra de ondas-mm, uma vez que pode levar à ocorrência de interferências destrutivas dos sinais RF detectados e, consequentemente a perdas de potência RF na dupla banda lateral mais, nos blocos de transporte da portadora associados com a modulação convencional, directa ou externa do díodo laser [8]. A utilização de apenas uma banda lateral óptica incluindo técnicas de geração de portadoras baseadas nos moduladores *dual-electrode Mach-Zehnder* têm sido propostos para atenuar o impacto da dispersão cromática em sistemas rádio sobre fibra de ondas milimétricas [9].

Estas técnicas resultam em nada mais nada menos que a supressão de uma banda lateral óptica ideal devido a diferenças em deslocamentos de fase entre os dois braços do modulador *Mach-Zehnder* [9]. Um conjunto de técnicas de fase ópticas complexas também têm vindo a ser propostas para reduzir o impacto da dispersão cromática na fibra óptica em sistemas RoF de ondas-mm [10]. Alternativamente, as FBGs podem também ser integradas para combater a dispersão na fibra. Neste contexto, as FBGs são explorados de duas formas diferentes. Marti et al. [11] e Kitayama [12] usam um *chirped* FBG como um elemento de atraso que depende do comprimento de onda, onde as características de dispersão do *chirped* Bragg *grating*'s cancelam as características intrínsecas de dispersão da fibra. Park et al. [13] usa uma FBG

¹ Também pode ser chamado de “*radio on the fiber*”, “*radio on fiber*”, “*hybrid fiber radio*”, e “*fiber radio access*” na bibliografia encontrada.

como um *notch filter* para transformar o sinal de dupla banda lateral (optical single side band-OSSB) mais o sinal da portadora óptica numa única banda lateral óptica, levando a uma maior imunidade à dispersão cromática na fibra. Kaszubowska et al. [14] e Capmany et al. [15] também usam uma FGB como *notch filter* para reduzir o impacto da dispersão cromática em sistemas RoF de ondas-mm com técnicas WDM.

Finalmente, é importante notar que o método “Bragg grating notch filter” compara-se de forma muito positiva ao método chirped Bragg grating porque também pode ser usado simultaneamente para realizar outras operações, por exemplo, selecção de comprimento de onda em redes WDM [16]. No entanto, as características de dispersão intrínsecas do FBG quando usado como um filtro rejeita banda (notch filter) para geração de OSSB, pode degradar significativamente o desempenho do sistema. Certamente, a dispersão do *grating* pode levar por ela própria a perdas de potência até 13 dB em sinais RF [16].

A dispersão do *grating* pode também levar a ruído de fase no sinal RF [8]. No entanto, poucos esforços têm sido tomados para otimizar o perfil de dispersão da FBG de modo a compensar o ruído de fase. Outra aplicação crucial das FBGs, concentra-se na selecção de comprimento de onda em sistemas RoF de ondas-mm utilizando técnicas WDM. Isto tem sido considerado por vários autores incluindo Kitayama et al. [17], Castleford et al. [18], Teixeira et al. [19], Marra et al. [20] e Kaszubowska et al. [14]. Neste contexto, vários problemas de interesse prático surgiram, sendo eles, o efeito de indução de dispersão pelo *grating* nos modos de transmissão e reflexão assim como o crosstalk induzido pelo *grating*.

O efeito de dispersão do *grating* em sistemas rádio sobre fibra de ondas milimétricas com técnicas WDM é considerado em [17]. É mostrado que como consequência, a dispersão afecta consideravelmente a extensão e a alocação do canal em sistemas rádio sobre fibra WDM.

O facto de o *grating* induzir crosstalk em sistemas rádio sobre fibra de ondas-mm com WDM é considerado em [18]. É mostrado que o crosstalk introduz perdas de potência RF, que podem ser na generalidade reduzidas utilizando técnicas de filtragem no domínio eléctrico. Teixeira et al. [19] considera o efeito das variadas técnicas de filtragem ópticas em sistemas rádio sobre fibra com WDM incluindo técnicas baseadas em FBGs e uma nova técnica baseada em FBGs altamente birrefringentes.

As FBGs têm também sido propostas para realizar várias tarefas simultaneamente. Lima et al. [21], realizam uma análise teórica e experimental para determinar a resposta espectral de várias redes de Bragg, dando particular destaque às FBG que efectuem a operação de desmultiplexagem e simultaneamente compensem a dispersão. Lima et al., descreve também os parâmetros do processo de escrita de redes de Bragg utilizado, evidenciando os resultados experimentais obtidos. Em particular, Kaszubowska et al. [14] usa uma única FBG na compensação da dispersão cromática da fibra e na desmultiplexagem de comprimentos de onda em sistemas rádio sobre fibra de ondas milimétricas com técnicas WDM. Esta importante contribuição demonstra as operações multifuncionais destes dispositivos.

Finalmente, FBGs são também usados como “enablers” de uma específica arquitectura de sistemas rádio sobre fibra ou dos conceitos dos sistemas rádio sobre fibra. Por exemplo, Bragg gratings são a base dos desmultiplexadores de comprimentos de onda, assim como os multiplexadores add/drop nas redes estrela-árvores WDM [17,22] e redes em anel WDM [17], respectivamente. De maior importância, encontra-se o uso de FBGs para capacitar arquitecturas que favoreçam a coexistência de sistemas rádio sobre fibra WDM com a existência de infra-estruturas de redes ópticas WDM de telecomunicações baseadas no espaçamento de comprimento de onda da ITU. Marra et al. [20] propôs o transporte óptico do

oscilador local RF remoto e sinais de dados IF multiplexados em sub-portadoras com uma banda de 25 GHz usando um único comprimento de onda.

A recuperação do oscilador local e sinais de dados é otimizada via filtragem óptica utilizando quer um novo e unitário Bragg *grating* que incorpora múltiplos deslocamentos de fase ou múltiplo Bragg *grating* com restrições de banda. No entanto, este sistema proposto não é suficientemente flexível porque apenas entrega sinais de comprimento de onda milimétricos com frequências RF por volta de 30-35 GHz. Apesar de tudo, este importante tópico é ainda relativamente pouco explorado na bibliografia disponível.

Outro problema em aberto, aponta para o impacto das infra-estruturas dos sistemas rádio sobre fibra nos cenários de sinalização realísticos que formam a base das normas das actuais *wireless LAN* e *wireless MAN* assim como os actuais e futuros sistemas de comunicações. Isto inclui, OFDM, CDMA e *multi-carrier* CDMA.

No entanto, o trabalho até à data tem considerado principalmente o impacto das infra-estruturas dos sistemas rádio sobre fibra em cenários muito simples de sinalização, por exemplo, BPSK e DPSK. Uma excepção inclui, análise do impacto das não linearidades dos dispositivos na sinalização OFDM [23]. Porém, a análise, desenho e optimização dos FBGs para sistemas rádio sobre fibra baseados em cenários realísticos de sinalização é ainda de uma forma genérica, um problema em aberto.

2.4- Arquitectura

2.4.1- Arquitectura genérica de um sistema RoF

As rede RoF englobam uma CS onde variadas funções são desempenhadas, por exemplo, *switching*, encaminhamento, *medium access control* e gestão de frequências. A CS por sua vez, através da rede de fibra óptica, é interligada a um vasto número de compactas BSs de antenas funcionalmente simples, para distribuição de sinal *wireless*.

A topologia genérica de um sistema rádio de ondas milimétricas suportado por fibra óptica [24] é ilustrada na figura 2.1

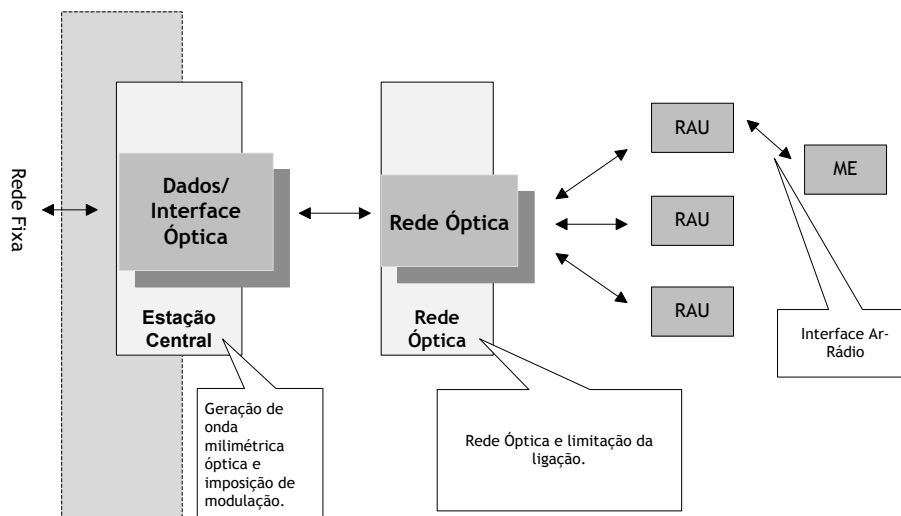


Figura 2.1 - Arquitectura genérica de um sistema rádio de ondas milimétricas suportado em fibra óptica.

Na ligação descendente da estação central (CS) para a unidade de antena remota (RAU), a interface *data/optical* precisa de gerar um sinal óptico e impor a modulação necessária tal que, o resultado do sinal óptico possa ser detectado e processado para gerar o sinal RF de onda-mm.

A rede óptica distribui o sinal óptico a várias RAUs, onde a conversão óptica/RF toma lugar. As RAU radiam o sinal RF, sendo que as entidades móveis (ME) recebem o sinal. As RAU permitem também receber o sinal RF radiado pelas entidades móveis e converter este num sinal óptico apropriado para a transmissão ascendente para a estação base dentro da estação central, onde este é recebido e os dados são extraídos.

Este tipo de arquitectura apresenta várias vantagens, sendo de referir algumas das mais importantes [25]:

- Fácil instalação, manutenção e baixos custos;
- Baixo consumo de potência;
- Alocação dinâmica de recursos.

Fácil instalação, manutenção e baixos custos

Em sistemas RoF, o equipamento mais caro e complexo encontra-se na CS, deste modo as BS tornam-se bastante simples. Por exemplo, a maioria das técnicas RoF elimina a necessidade de oscilador local e equipamento relacionado na BS. Em tais casos, um fotodetector, um amplificador RF e uma antena tornam funcionais as BSs [26].

A transmissão de sinais rádio sobre fibra ligados à CS, com simples conversão óptico - eléctrica nas BSs seguida de radiação de sinal por antenas remotas tem vindo a ser proposto como método de minimização de custos. A redução de custos pode ser alcançado por duas formas [7]. Primeiramente, a antena remota da BS ou o ponto de distribuição rádio apenas deve realizar funções simples, ter um tamanho reduzido e baixo custo o que reduz os custos associados à instalação e manutenção. Em segundo lugar, os recursos providenciados pela CS (modulação, switching) podem ser repartidos pelas várias antenas das BS.

Fácil instalação e baixos custo de manutenção das BS são requisitos muito importantes para sistemas de ondas milimétricas, devido à necessidade da existência de várias unidades de antenas remotas. Em aplicações onde as unidades de antenas remotas (RAUs) não são acessíveis facilmente, a redução de manutenção necessária é um requisito que leva directamente a uma redução de custos operacionais [26].

Baixo consumo de potência

O reduzido consumo de potência é uma consequência da existência de unidades antenas remotas simples com equipamento reduzido. A maioria do equipamento encontra-se na CS. Em alguns casos, as unidades remotas de antenas são operadas em modo passivo. Por exemplo, alguns sistemas rádio sobre fibra a 5 GHz utilizando pico células podem ter as suas RAUs operando em modo passivo [26]. O baixo consumo das RAU é significativo, considerando que algumas RAUs são colocadas em sítios remotos não alimentadas pela rede eléctrica.

Alocação dinâmica de recursos

Desde que, funções como comutação, modulação, processamento, entre outras, são desempenhadas na CS, é possível dinamicamente alocar capacidades [26]. Por exemplo, num sistema de distribuição RoF para tráfego GSM, mais capacidade poderá ser alocada para uma área (centro comercial) durante os períodos críticos e depois realocado para outras áreas quando terminar o período crítico. Isto pode ser conseguido, alocando comprimentos de onda ópticos através da técnica de multiplexagem por divisão de comprimentos de onda (WDM) assim que seja necessário.

A alocação de capacidades de forma dinâmica evita a exigência de atribuição permanente de capacidades, o que seria um desperdício de recursos em casos onde o tráfego varia constantemente e numa gama ampla.

2.4.2- Topologias da rede

As arquitecturas genéricas de um sistema rádio sobre fibra baseado em tecnologia WDM, podem estar subjacentes a várias topologias de organização da rede [17], tal como se pode constatar na figura 2.2. Entre elas, as mais importantes são:

- Topologia em Árvore;
- Topologia “Bus”;
- Topologia em anel.

O acesso às BSs pela CS, faz-se via fibra óptica. Na estação central vários comprimentos de onda contendo sinais rádio são multiplexados. Estes viajam pela fibra vários quilómetros, sendo cada comprimento de onda entregue a apenas uma BS.

As várias topologias de rede poderão ser escolhidas consoante seja a disposição das BS (sendo dispostas em função da densidade de utilizadores naquela área). Deste modo, por exemplo em áreas urbanas, onde a densidade de utilizadores é elevada, uma topologia de rede em anel será uma escolha adequada.

Sendo a análise das várias topologias de redes semelhante, e sendo mais importante para aqui compreender o funcionamento da topologia em anel, uma vez que será abordada novamente no capítulo 4, descrever-se-á o comportamento desta de seguida.

Análise da Topologia em Anel

A topologia em anel destaca-se das demais, pelo facto de todos os comprimentos de onda que viajam pela fibra óptica, terem todas as BSs como locais de passagem obrigatória, sendo que as restantes topologias, poderão de forma não obrigatória assumir o mesmo comportamento. Este facto, não se torna necessariamente numa desvantagem para a topologia em anel.

Na BS, terá que existir um mecanismo de selecção do comprimento de onda. Este mecanismo poderá ser fisicamente implementado através de um multiplexador óptico add/drop (OADM).

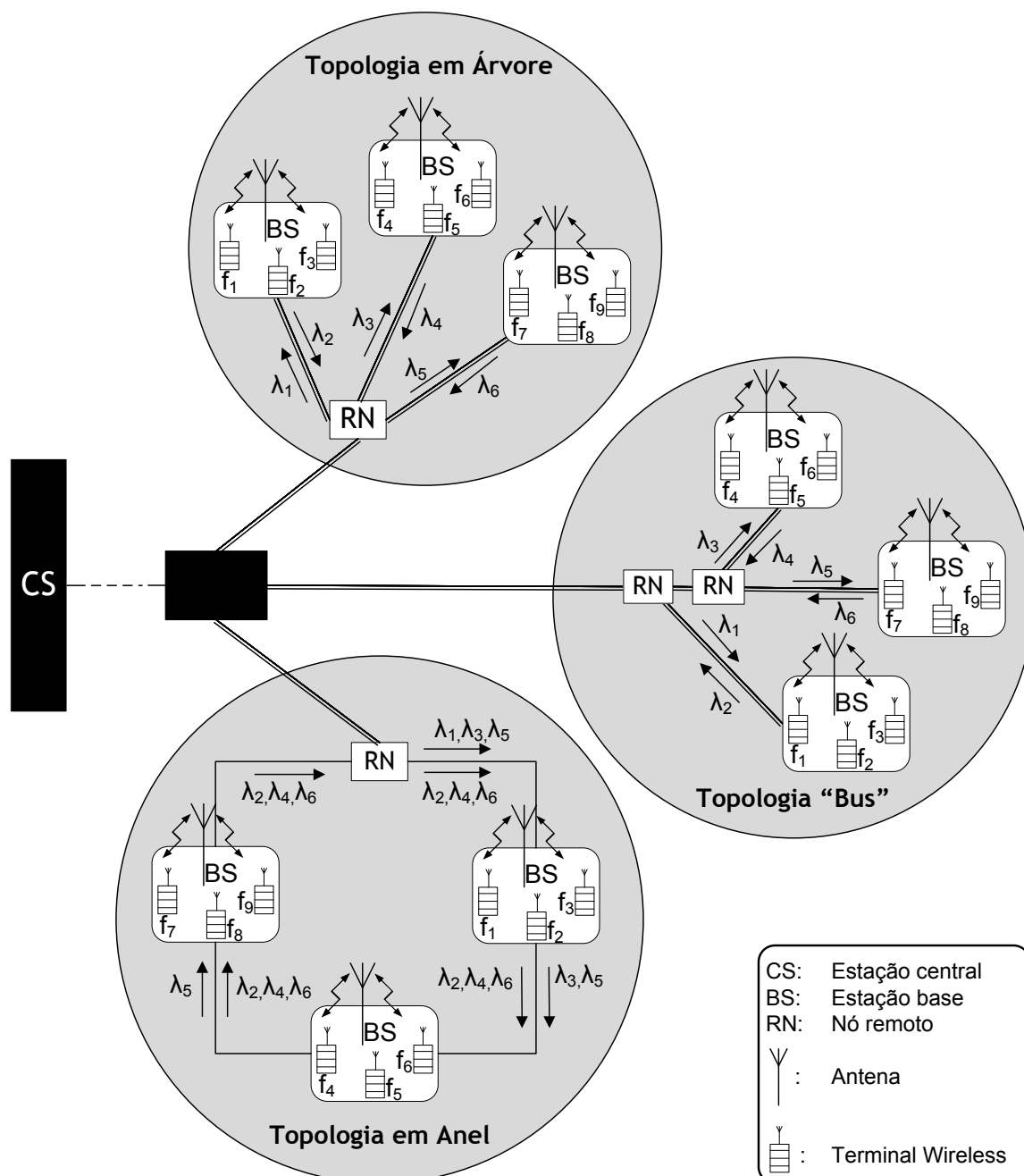


Figura 2.2 - Topologias da rede de um sistema rádio sobre fibra genérico.

Nas restantes topologias, em cada nó de bifurcação da rede teremos que sujeitar o sinal a uma perda de metade de potência, isto para o caso em que se faz simplesmente a divisão do sinal pelos dois caminhos, ou então para o caso em que se pretende seleccionar o comprimento de onda desejado, termos de instalar um OADM. Se for optado pela opção de colocar um OADM, nos nós de bifurcação da rede, não será necessário filtrar novamente o sinal nas BSs, contudo e dependendo da distância que separa o nó da BS, o sinal poderá sofrer uma degradação maior que na topologia em anel devida a perdas de potência e introdução de dispersão [17] pelo FBG do OADM. Feita uma breve comparação da topologia em anel face às demais, ir-se-á descrever o comportamento desta de acordo com a figura 2.2.

Considerando que a ligação entre a CS e a BS da topologia em anel é unilateral, são destacados para este caso seis comprimentos de onda, sendo que λ_1 , λ_3 e λ_5 são utilizados na ligação descendente e λ_2 , λ_4 e λ_6 são utilizados na ligação ascendente. Em cada passagem pelas BSs é retirado um comprimento de onda de índice ímpar e adicionado um novo comprimento de onda de índice par. Este processo é realizado fisicamente por um OADM.

2.4.3- Configuração das Estações Base

Uma estação base, de uma forma geral tem como principais funções retirar um comprimento de onda da rede, colocá-lo no formato apropriado e radiar o mesmo através da antena. Deverá igualmente captar sinais através da antena, recepcioná-los, colocar estes no formato adequado e adicioná-los à rede através de uma portadora óptica, que corresponde a um comprimento de onda estabelecido. Estas funções, são desempenhados por um conjunto de blocos que constituem a BS, sendo estes:

- OADM: permite retirar e adicionar comprimentos de onda na rede;
- Fotodíodo: permite converter o sinal óptico proveniente da CS num sinal eléctrico;
- Amplificador eléctrico: permite amplificar o sinal recebido da CS (depois do fotodíodo) e o sinal captado pela antena da BS;
- Antena: permite radiar o sinal eléctrico recebido da CS para as unidades móveis e permite captar o sinal eléctrico emitido por estas;
- Laser e modulador óptico: permitem após a amplificação do sinal eléctrico captado pela antena, a sua modulação em torno do comprimento de onda desejado.

A disposição dos diferentes blocos que constituem a BS e sua interligação será mais facilmente constatada na figura 2.3.

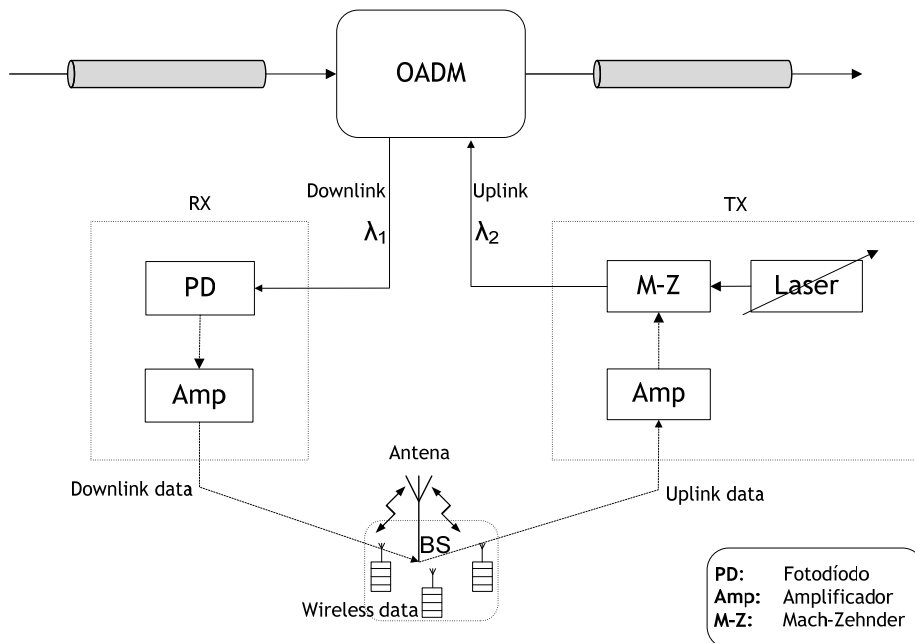


Figura 2.3 - Configuração genérica da estação base.

2.4.4- Configuração da Estação Central

A estação central tem funções semelhantes às estações base, no entanto para além de fazer a recepção e entrega à rede de todas as portadoras ópticas, esta desempenha igualmente as tarefas de gestão e processamento do sinal. Será de mais fácil compreensão se se acompanhar esta descrição, juntamente com a observação da figura 2.4.

No sentido ascendente, visto das BSs para a CS, esta tem como principais funções a recepção de todos os comprimentos de onda, a sua desmultiplexagem, e de forma individual, isto é, por cada comprimento de onda desmultiplexado, terá de realizar a sua conversão de sinal óptico para sinal eléctrico através do fotodíodo, a heterodinação do sinal para banda base através da multiplicação por uma portadora óptica RF frequência e fase adequadas. Por fim segue-se a sua desmodulação, de acordo com o tipo de modulação realizada. Poderão ser incluídos blocos de amplificação, nomeadamente a seguir ao fotodíodo e a seguir à passagem do sinal para banda base.

No sentido descendente, visto da CS para as BSs, aquela tem como principais funções o envio de todos os comprimentos de onda, porém antes disso terá de realizar algumas tarefas. Terá de codificar o sinal, aplicar a modulação pretendida, e multiplicar o sinal pela portadora RF com frequência e fase desejada. De seguida terá de modular o sinal eléctrico com uma portadora óptica. Para isso deverá utilizar um laser e por exemplo um modulador mach-zehnder. O laser deverá estar centrado na frequência óptica desejada, ou dito de outra forma, no comprimento de onda de interesse. Obtendo-se assim o comprimento de onda pretendido com o sinal RF modulado. Este processo é feito para todos os comprimentos de onda que se pretende criar, sendo que de seguido bastará multiplexar todos os comprimentos de onda e injectá-los na rede.

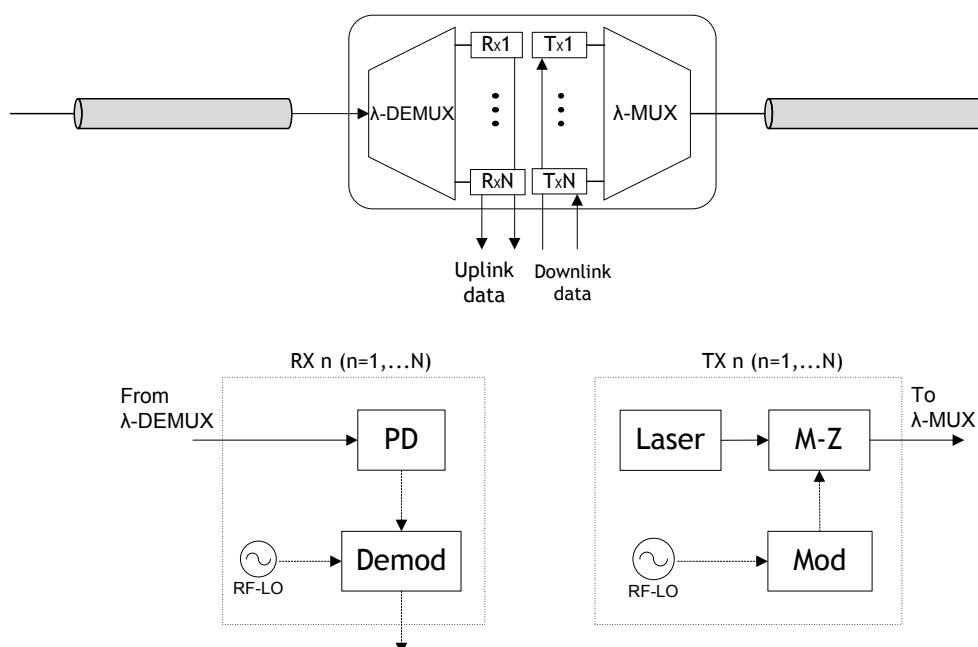


Figura 2.4 - Configuração genérica da estação central.

A configuração aqui descrita, corresponde a uma multiplexagem de comprimentos de onda (WDM). Para o caso de estudo nesta tese, como poderemos ver mais á frente no capítulo

4, será feita primeiramente a multiplexagem de sub portadoras RF (SCM) e só depois a multiplexagem de comprimentos de onda, isto é SCM/WDM. Deste modo o funcionamento é idêntico, apenas terá de ser introduzido na estação central multiplexadores e desmultiplexadores eléctricos.

Nas estações base, a diferença surge apenas no facto de, em vez de chegar a estas um sinal RF modulado por uma portadora óptica, chegarão vários sinais RF, que serão por sua vez difundidos pela antena. Será eventualmente necessária a utilização de um multiplexador eléctrico nas BSs, para a transmissão no sentido ascendente (BSs -> CS).

2.5- Vantagens da ligação RoF

2.5.1- Baixas perdas por atenuação: RoF vs Linhas de Transmissão

A transmissão eléctrica de sinais microondas de elevada frequência, seja em espaço livre seja através de linhas de transmissão acarreta vários problemas e custos. No espaço livre, perdas devido à absorção e reflexão aumentam com a frequência. Em linhas de transmissão, a impedância cresce igualmente com a frequência, levando a elevadas perdas [26]. Portanto, a distribuição eléctrica de sinais rádio de alta-frequência de forma a cobrir longas distâncias requer equipamento de regeneração de sinal de alto preço. Quanto às ondas milimétricas, a sua distribuição por meio da utilização de linhas de transmissão não é viável, mesmo para curtas distâncias.

A solução alternativa para este problema passa por distribuir sinais em banda base ou sinais a frequências intermédias (IF) baixas desde a CS para a BS. Estes sinais serão posteriormente convertidos para as frequências requeridas (ondas milimétricas ou microondas) em cada estação base, sendo amplificados e depois radiados [26]. Esta configuração do sistema é a mesma que é usada na distribuição de sistemas de comunicações móveis de banda estreita.

Dado que, osciladores locais (LO) de elevado desempenho seriam requeridos para conversão ascendente em cada BS, esta configuração conduz a estações base muito complexas e com apertados requisitos de desempenho. No entanto, dado que a fibra óptica oferece perdas muito baixas, a tecnologia RoF pode ser usada quer para alcançar baixas perdas na distribuição de sinais milimétricos quer para simplificar as BS [26].

Fibras ópticas monomodo apresentam perdas por atenuação de 0.2 dB/km e 0.5dB/km, na janela de transmissão de 1550nm e 1300nm, respectivamente. Estas perdas são muito inferiores às encontradas em cabos coaxiais, que apresentam perdas de 3 ordens de grandeza acima das apresentadas. Por exemplo, a atenuação de um cabo coaxial (RG-214) de meia polegada é superior a 500 dB/km para frequências de aproximadamente 5 GHz [26].

Consequentemente, transmitindo microondas de forma óptica, as distâncias de transmissão dobram várias vezes e a potência necessária diminui consideravelmente.

2.5.2- Elevada largura de banda

A fibra óptica apresenta uma largura de banda enorme. Existem três janelas de transmissão que oferecem baixa atenuação, nomeadamente nos seguintes comprimentos de

onda, 850 nm, 1310 nm e 1550 nm. Para uma única fibra óptica monomodo, a largura de banda, combinando as três janelas é de aproximadamente 50 THz [26]. No entanto, o actual estado da arte dos sistemas que se comercializam apenas utiliza uma fracção desta capacidade (aproximadamente 1.6 THz), se bem que investigações para explorar mais capacidade óptica por fibra estão avançando [26].

A enorme largura de banda oferecida pela fibra óptica tem outros benefícios além da grande capacidade de transmissão de sinais microondas. Esta permite realizar processamento de sinal a grande velocidade, que poderá ser mais difícil senão impossível em sistemas electrónicos.

Em outras palavras, algumas das exigências das funções microondas tais como filtragem, mistura, conversão ascendente e descendente, podem ser implementadas no domínio óptico. Por exemplo, a filtragem de ondas milimétricas pode ser alcançada primeiramente pela conversão do sinal eléctrico para ser filtrado para um sinal óptico, depois executando a filtragem usando componentes ópticos tais como *FBGs*, e por fim convertendo o sinal filtrado de volta para a sua forma eléctrica [26].

Para além do referido, o processamento no domínio óptico torna possível lidar com sinais de elevada largura de banda.

A utilização da enorme largura de banda disponível nas fibras ópticas é consecutivamente dificultada pela limitação da largura de banda dos sistemas electrónicos, os quais são as fontes primárias e receptores da transmissão de dados.

Este problema é referido como o “*electronic bottleneck*” ou “estrangulamento electrónico”. A solução em torno do estrangulamento electrónico reside na eficácia do multiplexador. As técnicas *Optical Time Division Multiplexing* (OTDM) e *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) são usadas em sistemas ópticos digitais [26].

Em sistemas ópticos analógicos, incluindo a tecnologia RoF, a multiplexagem de sub-portadoras (SCM) é usada para aumentar a utilização da largura de banda da fibra óptica. Em SCM, várias sub-portadoras microondas, as quais são moduladas com dados digitais ou analógicos, são combinados e usados para modular o sinal óptico [26], o qual é depois transportado numa única fibra. Isto torna baixa a relação custo-eficácia no sistema RoF.

2.5.3- Imunidade a ruído electromagnético

A imunidade a interferências electromagnéticas (EMI) é uma propriedade muito interessante nas comunicações por fibra óptica, especialmente em transmissões de sinais microondas. Isto acontece, pois os sinais são transmitidos na forma de luz através da fibra. Por causa desta imunidade, os cabos de fibra óptica são preferidos até mesmo em transmissões de curta distância com sinais milimétricos [26].

Relacionado com a imunidade EMI, está a imunidade a *eavesdropping*, a qual é uma característica importante nas comunicações por fibra óptica, já que providencia privacidade e segurança [26].

2.6- Limitações

2.6.1- Ruído, distorção e gama dinâmica

Desde que RoF envolve modulações analógicas e detecção da luz, é fundamentalmente um sistema de transmissão analógico. Portanto, condicionantes do sinal tais como ruído e distorção, são muito importantes nos sistemas de comunicações analógicos, e de igual forma são igualmente importantes nos sistemas RoF. Estes condicionantes tendem a limitar a razão sinal-ruído e a gama dinâmica das ligações RoF [26].

DR é um parâmetro muito importante no que trata a sistemas de comunicações móveis como o GSM, pois a potência recebida na BS das unidades móveis (MU) varia extensamente (ex. 80 dB). Isto é, a potência do sinal RF recebido da MU que está próxima da BS pode ser muito mais elevado que a potência recebida do sinal RF de uma MU que está afastada vários quilómetros, porém pertence ainda à mesma célula [26].

As fontes de ruído nas ligações de fibra óptica analógicas incluem: ruído da intensidade relativa do laser, o ruído de fase do laser, o fotodíodo *shot noise*, o ruído térmico do amplificador e a dispersão da fibra.

Deve-se sublinhar que apesar do próprio sistema de transmissão de RoF seja analógico, o sistema de rádio que está sendo distribuído não necessita ser igualmente analógico, poderá ser digital (ex. WLAN, UMTS), utilizando formatos de modulação de sinal multi-nível detalhados, tais como xQAM, ou *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) [26].

2.6.2- Dispersão

Nos sistemas RoF, a dispersão é um dos condicionantes que mais penaliza este tipo de sistemas, tendo como principal efeito, a redução de largura de banda, o que limita severamente as taxas de transmissão [27].

A dispersão nas fibras ópticas poderá ser dividida em dispersão intramodal ou cromática e dispersão intermodal, sendo que esta apenas afecta as fibras ópticas multimodo [27].

Nos sistemas RoF que utilizam fibra óptica monomodo, a dispersão cromática poderá limitar severamente a distância entre ligações da fibra e poderá causar descorrelacionamento na fase levando a um aumento do ruído de fase na portadora RF. Nos sistemas RoF que utilizam fibra óptica multimodo, a dispersão intermodal limita drasticamente a disponibilidade em distância e largura de banda das ligações [26]. De forma a ser mais intuitivo como a dispersão afecta este tipo de sistemas, serão de seguida descritos alguns conceitos e também algumas demonstrações.

Velocidade de fase

Uma onda monocromática que se propaga na direcção de z , pode ser escrita como

$$E(z, t) = E_0 e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.1)$$

ω é a frequência angular da onda,
 β é a constante de propagação.

Definição de velocidade de fase

A velocidade de fase é aquela que um observador deve de manter para viajar com o campo a uma fase constante.

$$\omega t - \beta z = \text{constante} \quad (2.2)$$

Diferenciando a equação anterior e resolvendo dz/dt chega-se à velocidade de fase, que é dada por:

$$\frac{dz}{dt} = v_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.3)$$

A velocidade de fase caracteriza apenas mudanças na taxa de variação da fase no espaço, mas não na taxa de variação na propagação do envelope da onda. Este último é caracterizado pela velocidade de grupo.

Velocidade de Grupo

Um sinal modulado não é monocromático. Os vários componentes do sinal propagam-se ao longo da fibra geralmente com diferentes velocidades de fase, e portanto, acumulam diferentes deslocamentos de fase o que leva à distorção de fase. A velocidade de grupo é, por definição, a velocidade do envelope do sinal. De modo a não complicar excessivamente os cálculos iremos considerar a seguir o caso simples de modulação em amplitude (AM). Neste caso o sinal óptico é modulado por uma sinusóide.

Sinal Óptico AM

Considerando um sinal óptico AM dado por,

$$E_{AM}(t, z = 0) = E_0 [1 + m \cos(\omega_1 t)] \cos(\omega_c t) \quad (2.4)$$

E : amplitude do campo

m : índice de modulação

ω_1 : frequência do sinal modulador

ω_c : frequência da portadora óptica ($\omega_1 \ll \omega_c$)

Expandindo a função cosseno através da fórmula de Euler chega-se a:

$$E_{AM}(t, z = 0) = E_0 \left\{ 1 + \frac{m}{2} [e^{j\omega_1 t} + e^{-j\omega_1 t}] \right\} \cdot \frac{1}{2} (e^{j\omega_c t} + e^{-j\omega_c t}) \quad (2.5)$$

Depois de alguma manipulação, a equação anterior pode ser escrita como

$$E_{AM}(t, z = 0) = E_0 \cdot \text{Re} \left\{ e^{j\omega_1 t} + \frac{m}{2} (e^{j(\omega_1 + \omega_c)t} + e^{j(\omega_c - \omega_1)t}) \right\} \quad (2.6)$$

Este sinal contém três componentes às frequências, ω_c , $\omega_c - \omega_1$ e $\omega_c + \omega_1$. Cada uma destas componentes irá propagar-se pela fibra à sua própria velocidade de fase e irão acumular o seu próprio deslocamento de fase.

É conveniente expandir $\beta(\omega)$ em série de Taylor em torno da frequência da portadora:

$$\beta(\omega) = \beta_c + \dot{\beta}(\omega - \omega_c) + \frac{1}{2}\ddot{\beta}(\omega - \omega_c)^2 + \frac{1}{6}\dddot{\beta}(\omega - \omega_c)^3 + \dots \quad (2.7)$$

$$\dot{\beta} = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_c}$$

$$\ddot{\beta} = \left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right)_{\omega=\omega_c}$$

$$\dddot{\beta} = \left(\frac{\partial^3 \beta}{\partial \omega^3} \right)_{\omega=\omega_c}$$

Desprezando os termos de ordem superior a dois, $\beta(\omega) \approx \beta_c + \dot{\beta}(\omega - \omega_c)$:

$$\beta(\omega_c \pm \omega_1) = \beta_c \pm \dot{\beta}\omega_1 = \beta_c \pm \Delta\beta \quad (2.8)$$

onde, $\Delta\beta = \dot{\beta}\omega_1$.

A uma distância z na fibra:

$$\begin{aligned} E_{AM}(t, z) &= E_0 \cdot \text{Re} \left\{ e^{j\omega_c t - \beta_c z} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c - \omega_1)t - (\beta_c - \Delta\beta)z]} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c + \omega_1)t - (\beta_c + \Delta\beta)z]} \right\} \\ &= E_0 \cos(\omega t - \beta_c z) [1 + m \cos(\omega_1 t - \Delta\beta z)] \end{aligned} \quad (2.9)$$

O deslocamento de fase acumulado pela portadora é $\beta_c z$, enquanto que o deslocamento de fase acumulado pela modulação é igual a $\Delta\beta z$. A velocidade de grupo, v_g é definida como a velocidade que deve ser mantida para se observar uma fase constante do envelope. Quando $z = v_g t$, $\omega_1 t - \Delta\beta z$ deve ser constante:

$$\omega_1 t - \Delta\beta z = \text{const}, \forall t,$$

$$\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 v_g t = \text{const}, \forall t.$$

Esta equação tem solução se e apenas se $\text{const} = 0$, e neste caso:

$$v_g = \frac{1}{\dot{\beta}} = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

Dispersão Cromática em fibras ópticas monomodo

A dispersão intramodal ou cromática corresponde ao alargamento da duração de um impulso à medida que atravessa a fibra óptica. Num meio dispersivo, o índice de refração é função do comprimento de onda. Portanto, se o sinal transmitido consistir em mais do que um comprimento de onda, certos comprimentos de onda irão propagar-se mais rapidamente. Como ocorre alargamento do impulso, este pode atingir um valor tal que interfira com os

impulsos vizinhos na fibra, levando à ocorrência de interferência intersimbólica em sistemas digitais banda-base [28].

Dado que nenhum laser consegue criar um sinal que contenha exactamente apenas um comprimento de onda, a dispersão intramodal irá ocorrer na maioria dos sistemas. Assim sendo, o efeito da dispersão cromática é tanto maior quanto maior for a largura espectral da fonte óptica. Por exemplo, considerando que fontes LED apresentam uma maior largura espectral do que díodos laser, aqueles provocaram valores mais elevados de dispersão intramodal.

A dispersão intramodal divide-se em dois tipos de dispersões, a dispersão material e *waveguide dispersion* (dispersão do guia de onda) [28].

A dispersão material está relacionada com a variação do índice de refração do núcleo como função do comprimento de onda, sendo que a *waveguide dispersion* ocorre porque na fibra monomodo uma fracção da potência óptica (tipicamente 20%) viaja na bainha com uma velocidade superior que a luz que se propaga no núcleo.

Uma das formas de reduzir a dispersão material, é usar um laser monomodo com uma largura espectral estreita. Por exemplo, *Distributed Feedback Laser* tem uma largura espectral típica de 10-30 MHz (relembrar que 1 GHz \approx 0,008 nm, no comprimento de onda de 1550 nm). Outra forma é operar a comprimentos de onda a que corresponde valores mínimos da dispersão material. Por exemplo: para fibras de sílica, existe uma região em torno dos 1330 nm que apresenta uma dispersão material muito baixa [29].

É possível projectar o perfil do índice de refração núcleo-bainha de modo a haver compensação entre a dispersão material e de guia de onda para λ entre 1,3 a 1,6 μm .

Quando se pretende utilizar técnicas como DWDM, ou se pretende tirar o maior partido da largura de banda oferecida pela fibra óptica, existem tecnologias que devem de ser consideradas para compensar a dispersão cromática, tais como fibras de compensação da dispersão (DCF) e Fiber Bragg Grating (FBG).

Actualmente, na maioria das aplicações de fibra óptica em vigor, a probabilidade de que seja do tipo *Non - Dispersion Shifted Fiber* (NDSF) são altas. Mais de 80% de todas as fibras ópticas monomodo por todo o Mundo são do tipo NDSF. Nestes casos, a forma mais comum de se controlar a dispersão é usar módulos de compensação da dispersão (DCM) colocados em intervalos periódicos [29].

DCMs são usualmente de dois tipos. O primeiro tipo é DCF. Este é simplesmente um tipo de bobina especial de fibra que tem uma grande dispersão negativa. Tipicamente a dispersão das DCF é de aproximadamente -80 ps/(nm.km), portanto 20 km de comprimento da DCF pode compensar a dispersão em 100 km de comprimento da fibra do tipo NDSF.

O segundo tipo de DCM é o tipo FBG. Neste caso, uma série de FBGs ou um muito longo FBG está escrito em dezenas de metros de comprimento de fibra para realizar a compensação da dispersão. Ambos os tipos de DCM's têm relativamente grandes perdas de inserção. Após 60 km de compensação poderão surgir perdas 6 dB ou mais. Devido a este facto, DCM's são usualmente colocados juntamente com amplificadores de fibra óptica dopados com érbio (EDFAs) [29].

Matematicamente, a dispersão cromática pode ser caracterizada quer por β'' quer pelo coeficiente de dispersão de velocidade de grupo (GVD), usualmente conhecido por D .

Alargamento do impulso

Se τ é o atraso de propagação para um valor particular de ω :

$$\tau = \frac{L}{v_g}, \quad \frac{\partial \tau}{\partial \omega} = L \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{1}{v_g} \right) = L \ddot{\beta}, \quad (2.11)$$

L é o comprimento da fibra e v_g é a velocidade de grupo que depende da frequência. Se um sinal tem uma largura no espectro de frequência de $\Delta\omega$, a diferença entre os tempos de propagação das partes constituintes do sinal entre os extremos oposto do espectro, será:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \right| \Delta\omega = |\ddot{\beta}| \cdot L \cdot \Delta\omega \quad (2.12)$$

Assim, o alargamento do impulso é proporcional a $\ddot{\beta}$, L e à largura do espectro do sinal $\Delta\omega$.

O alargamento do impulso é usualmente especificado em termos de $\Delta\lambda$, a largura do espectro do sinal é expressada em comprimento de onda e o coeficiente de dispersão da velocidade de grupo, D :

$$\Delta\tau = |D| \cdot L \cdot \Delta\lambda \quad (2.13)$$

Com GVD dado por:

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \ddot{\beta} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{2\pi c}{\lambda} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \quad (2.15)$$

O parâmetro D tem unidades (s/m^2) ou ($ps/(nm \cdot Km)$).

Considerando que:

$$\ddot{\beta} = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{1}{v_g^2} \frac{\partial v_g}{\partial \omega} \quad (2.16)$$

Esta equação implica que no ponto de dispersão zero, λ_D onde $\ddot{\beta} = 0$, a velocidade de grupo, v_g , como função de ω tem um mínimo (a derivada é zero). Para comprimentos de onda $\lambda < \lambda_D$, $\ddot{\beta} > 0$, da fibra é dito que tem dispersão normal. Neste regime ($dv_g/d\omega < 0$), onde significa que os componentes de elevada frequência ($\Delta\omega > 0$ - *blue shifted*) de um impulso óptico propagam-se mais devagar do que os componentes de baixa frequência (red-shifted). De forma análoga, o oposto ocorre no bem conhecido regime de dispersão anômalo em que $\ddot{\beta} < 0$.

Em aplicações digitais, a dispersão cromática sofre um aumento na interferência intersimbólica, considerando que nas aplicações analógicas a dispersão é vulgarmente quantificada em termos de uma redução de potência do sinal. Este ponto é descrito a seguir.

Penalidade da dispersão em aplicações analógicas

Para quantificar o impacto em sistemas analógicos, começa-se pela expansão em série de Taylor da constante de propagação considerando apenas os primeiros três termos desta série.

$$\beta(\omega) = \beta_c + \dot{\beta}(\omega - \omega_c) + \frac{1}{2}\ddot{\beta}(\omega - \omega_c)^2 \quad (2.17)$$

$$\beta(\omega_c) = \beta_c \quad (2.18)$$

$$\beta(\omega_c \pm \omega_1) = \beta_c \pm \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2 \quad (2.19)$$

Repetindo os cálculos para obter $E_{AM}(t, z)$ a uma distância z na fibra, mas agora incluindo a dispersão, obtém-se:

$$E_{AM}(t, z) = E_0 \cdot Re \left\{ \begin{array}{l} e^{j\omega_c t - \beta z} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c - \omega_1)t - (\beta_c - \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z]} \\ + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c + \omega_1)t - (\beta_c + \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z]} \end{array} \right\} \quad (2.20)$$

Para simplificar os cálculos, utilizou-se a notação complexa, obtendo-se:

$$\begin{aligned} E_{AM}(t, z) &= E_0 \cdot \left\{ e^{j(\omega_c t - \beta_c z)} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c - \omega_1)t - (\beta_c - \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z]} \right. \\ &\quad \left. + \frac{m}{2} e^{-j[(\omega_c + \omega_1)t - (\beta_c + \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z]} \right\} \\ &= E_0 \left\{ e^{j(\omega_c t - \beta_c z)} \left[1 + \frac{m}{2} \left(e^{j(\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 z)} + e^{-j(\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 z)} \right) e^{-j(\ddot{\beta}\omega_1^2 z/2)} \right] \right\} \\ &= E_0 \left\{ e^{j(\omega_c t - \beta_c z)} \left[1 + \frac{m}{2} \left(\cos(\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 z) \right) e^{-j(\ddot{\beta}\omega_1^2 z/2)} \right] \right\} \end{aligned}$$

No final da fibra $z = L$, o fotodetector responde a este sinal com uma corrente que é proporcional ao quadrado do campo eléctrico,

$$\begin{aligned} i_{AM}(t) &= \frac{E_{AM}(t, L) \cdot E_{AM}^*(t, L)}{2} \\ &= E_0^2 \left[1 + \frac{m}{2} \cos(\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 L) e^{-j\theta} \right] \cdot \left[1 + \frac{m}{2} \cos(\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 L) e^{+j\theta} \right] \\ &= E_0^2 + E_0^2 m \cos(\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 L) \cos \theta + E_0^2 \frac{m^2}{8} \cos(\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 L) \end{aligned}$$

onde $\theta = \ddot{\beta}\omega_1^2 L/2$ é o deslocamento de fase acumulado pelas bandas laterais sobre o comprimento L .

O primeiro termo é um componente DC e o terceiro termo, se expandido, contém um componente dc mais um componente à frequência de $2\omega_1$. O segundo termo é o termo de interesse à frequência ω_1 .

$$i_{AM}(\omega_1) = E_0^2 m \cos(\omega_1 t - \dot{\beta}\omega_1 L) \cos(\theta) \quad (2.21)$$

A partir desta equação pode ser verificado que, quando $\theta = (2n + 1) \cdot \pi/2$ com $n = 0, 1, 2, \dots$ a amplitude do sinal recebido anula-se, e isto ocorre periodicamente ao longo da fibra. O primeiro nulo ocorre para:

$$\frac{\beta \omega_1^2 L_{null,1}}{2} = \frac{D \lambda^2 \omega_1^2 L_{null,1}}{2\pi c} = \frac{\pi}{2} \quad (2.22)$$

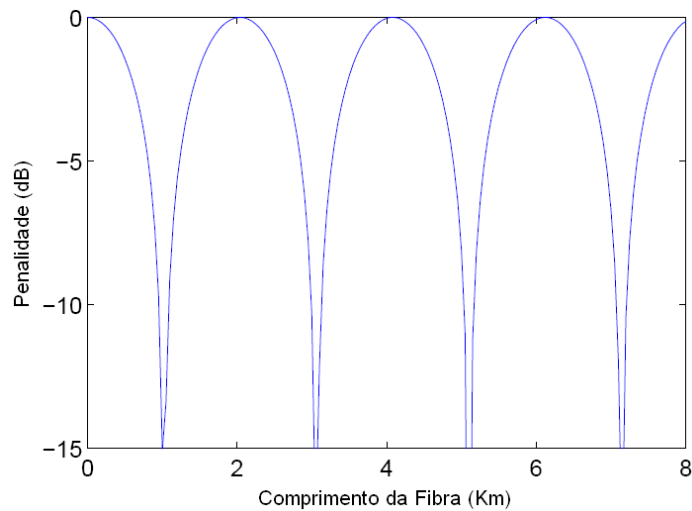


Figura 2.5 - Penalidade da dispersão para um sinal de frequência 60 GHz aplicado a uma fibra com $D = 17\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{Km})$.

Isto é, para:

$$L_{null,1} = \frac{c}{2D\lambda^2 f_1^2} \quad (2.23)$$

A figura acima mostra a penalidade da dispersão para uma fibra com $D = 17\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{Km})$ operando a um comprimento de onda $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ considerando que o sinal modulador tem frequência $f_1 = 60\text{GHz}$, o primeiro nulo ocorre para 1.02Km .

Dispersão Intermodal

A dispersão intermodal é provocada quando diferentes modos do mesmo sinal se propagam ao longo da fibra a velocidades diferentes, isto é, resulta de cada modo de propagação ter um valor diferente da sua velocidade de grupo para a mesma frequência. Este tipo de dispersão não ocorre nas fibras ópticas monomodo [27].

Assim, como os diferentes modos que constituem um impulso, viajam ao longo da fibra a diferentes velocidades de grupo, a largura do impulso depende dos tempos de transmissão do modo mais rápido e do modo mais lento. De referir que é este mecanismo o responsável pela diferença básica, em termos de dispersão, dos três tipos de fibras: fibras multimodo “step-index”, fibras multimodo “graded-index” e fibras “single-mode” [27].

Para reduzir este tipo de dispersão terá que se reduzir a diferença entre as velocidades de propagação dos diferentes modos, isto é, tal como se pode ver na figura 2.6, deverá ser utilizadas fibras do tipo *graded-index*. Outra forma, embora óbvia, será reduzir o número de modos a apenas um, utilizando neste caso fibras monomodo.

Dispersão em três tipos de Fibras

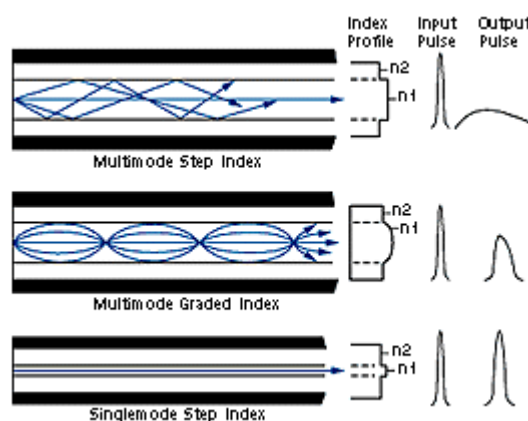


Figura 2.6 - Alargamento dos impulsos para três tipos de Fibra Óptica [38].

Pode-se observar na figura 2.6, que o maior alargamento do impulso transmitido ocorre na fibra multimodo “step-index”, notando-se uma melhoria significativa na fibra “graded-index”. Por fim, a fibra “single-mode” apresenta a menor dispersão, sendo por isso, a que tem maior largura de banda.

Todavia, o alargamento dos impulsos depende da distância percorrida no interior da fibra. Assim, a dispersão de uma fibra é usualmente especificada como o alargamento temporal do impulso na unidade de comprimento - p. ex., ns/km ou ps/km.

A 1300 nm, a dispersão cromática numa fibra óptica monomodo convencional é aproximadamente zero. Por sorte, esta também é uma janela de baixa atenuação (apesar das perdas serem maiores que na janela de 1550 nm). Através de avançadas técnicas tal como deslocação da dispersão, *dispersion shifting*, podem ser concebidas fibras ópticas com dispersão praticamente nula para comprimentos de onda entre 1300 - 1700 nm [29].

2.7- Aplicações

As aplicações para esta tecnologia são várias, por exemplo, redes telefónicas móveis, rede *wireless local area network (WLAN)* usando bandas de frequências milimétricas, redes de acesso wireless de banda larga, redes para comunicação com veículos na estrada para sistemas de transporte inteligentes, etc [30].

A tecnologia RoF é geralmente inadequada para aplicações em sistemas onde uma elevada gama dinâmica livre de espúrios (SFDR) seja requerida, por causa da limitação da gama dinâmica (DR). Isto é especialmente verdade para uma larga cobertura de sistemas móveis como GSM onde a SFDR tem de ser superior a 70 dB no exterior. No entanto, a maioria das aplicações *indoor* não requer elevados valores de SFDR. Por exemplo, o requisito (*uplink*) da SFDR para GSM reduz-se de 70 dB (mínimo) para 50 dB para aplicações *indoor* [26].

No entanto, sistemas de distribuição RoF podem ser prontamente usados em distribuições de sinais *wireless* dentro de edifícios (*indoor*), onde existam sistemas de comunicações de dados (ex. WLAN) e móveis. Neste caso os sistemas ROF tornam-se num sistema de antenas distribuídas.

Os sistemas RoF são igualmente atractivos para futuras implementações onde elevada SFDR não seja requerida. Por exemplo, as unidades móveis com UMTS são obrigadas a controlar a sua transmissão de potência para que o mesmo nível de potência de sinal seja recebido na BS. Assim sendo, o UMTS não necessita de um elevado valor de SFDR ao contrário do GSM, por isso sistemas de distribuição RoF poderão ser usados quer na distribuição *indoor* ou *outdoor* de sinais do UMTS [26].

Outra área de aplicação é nos sistemas de acesso *wireless* fixo, tais como o WiMAX, onde a tecnologia RoF poderá ser usada para transportar opticamente sinais ao longo de grandes distâncias, trazendo a significativa simplicidade das unidades de antenas remotas para junto do utilizador final, de onde as ligações *wireless* ajudam a alcançar o acesso banda larga, numa baixa relação custo - eficácia [26].

2.8- Conclusão

Ao longo deste capítulo, foi permitido entrar em algum detalhe nas especificidades dos sistemas rádio sobre fibra. Tomou-se conhecimento da arquitectura adoptada por estes sistemas, a configuração das estações base e estação central, e permitiu também identificar as topologias da rede, dando especial ênfase à topologia em anel.

Foram constatadas as vantagens numa ligação RoF, e verificou-se ainda, quais as limitações apresentadas por estes sistemas. Algumas das variadas aplicações para estes sistemas foram expostas, demonstrando-se a versatilidade e o terreno em que estes sistemas poderão vir a actuar.

Com a revisão do estado da arte, foi possível verificar de forma clara o que foi feito até então, quais os aspectos mais importantes a trabalhar, de modo a tomar o rumo certo na optimização dos sistemas RoF.

Tendo agora, o conhecimento das necessidades destes sistemas, poder-se-á progredir no estudo, através da aplicação de técnicas e tecnologias que visam tornar estes sistemas cada vez mais credíveis. É neste âmbito, e com estas necessidades de respostas, que se entra no próximo capítulo: "Optimização da tecnologia RoF".

Capítulo 3

Optimização da Tecnologia RoF

3.1- Introdução

Após a introdução deste capítulo, segue-se a secção 3.2. Nela são expostas um conjunto de técnicas que poderão ser adoptadas na geração de sinais RF e microondas.

Na secção 3.3, são desenvolvidas e ilustradas várias técnicas para optimização da eficiência espectral, nomeadamente WDM, SCM/WDM, SCM/WDM com entrelaçamento, sendo ainda proposto uma nova técnica baseada na utilização de sinais SSB e não DSB como nas restantes.

Na secção 3.4, é demonstrado como a filtragem SSB na estação base poderá ser utilizada como meio de compensação da dispersão.

Na secção 3.5, é elaborado um estudo minucioso sobre redes de Bragg onde se aponta, a sua constituição, estrutura e, funcionamento. Faz-se também o paralelismo entre as redes de Bragg e os sistemas ópticos WDM, retendo especial atenção naquelas que permitam realizar a operação de desmultiplexagem e simultaneamente compensar a dispersão. Por fim, nesta secção é ainda apresentado em termos gerais um multiplexador *add/drop*, que como é sabido assume um papel de grande importância nestes sistemas.

Por fim, na secção 3.6 apresenta-se as conclusões a retirar do estudo realizado ao longo deste capítulo.

3.2- Geração de sinais RF e Microondas

Durante os últimos anos tem ocorrido uma proliferação de técnicas desenvolvidas para geração de sinais ópticas de ondas milimétricas e para a imposição da modulação [24].

Estas podem ser divididas em duas abrangentes classes:

Single stage techniques, onde a geração de ondas milimétricas e a imposição da modulação são optimizadas no mesmo estágio;

Dual stage techniques, onde a geração de ondas milimétricas e a imposição da modulação são optimizadas em dois estágios separados em cascata.

A relação entre estas duas abrangentes classes são ilustradas no mapa de geração de métodos na figura 3.1. Outras subclasses pode ser identificadas:

Three-term techniques, correspondendo à convencional modulação de intensidade do sinal óptico à frequência das ondas milimétricas. Isto gera uma portadora óptica centrada entre as duas modulações das bandas laterais;

Two-term techniques, onde as duas componentes ópticas se misturam (heterodinam) no fotodetector, onde dado a não linearidade do campo eléctrico do fotodetector um sinal eléctrico à frequência igual à frequência de separação das duas componentes ópticas é gerada. Estas técnicas também são conhecidas como heterodinação óptica ou técnicas de auto-heterodinação. De forma a gerar uma linha RF de estreita largura, o ruído de fase dos dois termos ópticos devem estar correlacionados. Vários métodos têm sido propostos para obter um ruído de fase correlacionado nos dois termos ópticos tais como, obter os dois termos de uma simples fonte óptica, cancelando o ruído de fase ou implementando ciclos com *feedback* para seguimento da fase.

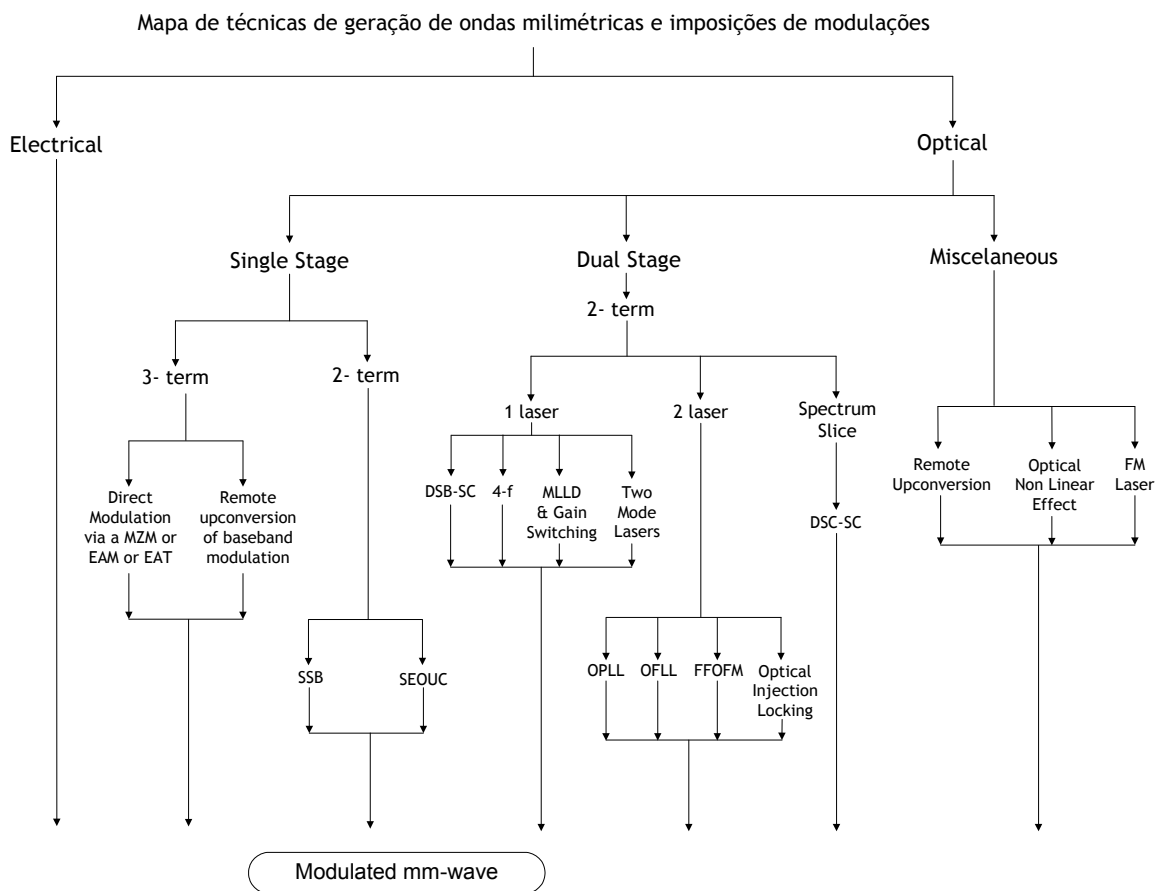


Figura 3.1 - Mapa de técnicas de geração de ondas milimétricas e imposições de modulações.

3.3- Técnicas para optimização da eficiência espectral

3.3.1- Multiplexagem por divisão nos comprimentos de onda

Como é sabido, WDM corresponde à multiplexagem de vários comprimentos de onda. Cada comprimento de onda que é multiplexado, é constituído pela portadora óptica que se encontra à frequência correspondente ao comprimento de onda em questão, mais a portadora

RF (caso seja transmitida), que é a portadora eléctrica. Se for transmitido um sinal DSB teremos ainda as duas bandas laterais do sinal eléctrico que modulou a portadora RF. Caso seja um sinal SSB teremos apenas uma banda lateral, podendo ser a superior ou a inferior. Pode-se observar na 3.2, o espectro de um sinal WDM com um sinal RF DSB a 155 Mb/s sem a transmissão da portadora eléctrica a 60 GHz. Veja-se agora de seguida, a utilização de SCM sobre WDM.

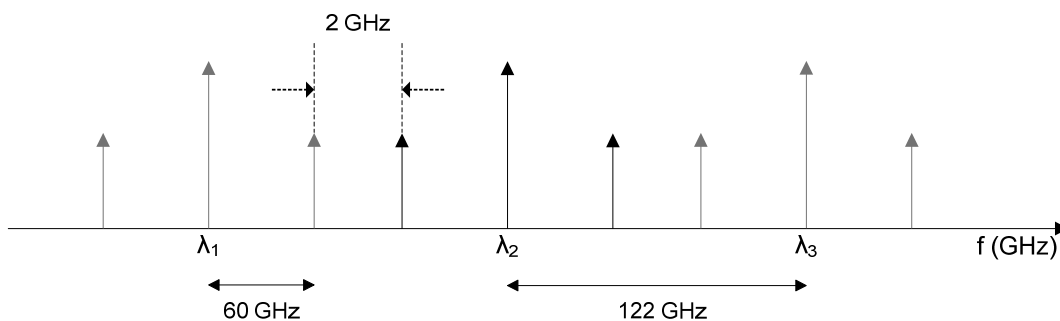


Figura 3.2 - Multiplexagem por divisão nos comprimentos de onda (WDM).

3.3.2- Multiplexagem SCM/WDM

O conceito de SCM sobre WDM corresponde à multiplexagem de vários Sinais RF no domínio eléctrico, previamente à multiplexagem dos vários comprimentos de onda (WDM). Finalizando este passo, procede-se à modulação de uma portadora óptica pelo sinal constituído pela multiplexagem de vários sinais RF. Deste modo é possível entregar na estação base vários sinais RF, que poderão ser o suporte de serviços distintos, ao invés de entregar apenas um sinal RF com a técnica WDM.

Considerando 5 sinais RF de dupla banda lateral, o espectro de sinal que se obtém utilizando esta técnica, é semelhante ao da figura 3.3. É de notar que na figura 3.3, os sinais RF aparentam estar muito distanciados contudo não é verdade, pois o gráfico não está com igual escala para todos os elementos, senão seria difícil observar os 5 sinais RF. A título de exemplo, na figura 3.3 considerou-se a representação de um sinal 155 Mb/s, com um espaçamento mínimo entre sinais RF de 400 MHz, para se conseguir recuperar o sinal original com uma taxa de erros (BER) inferior a 10^{-9} . Este sinal é utilizado para modular uma portadora eléctrica RF de 60 GHz, sendo que o espaçamento entre portadoras ópticas terá de ser no mínimo de 122 GHz, para não ocorrer sobreposição do espectro.

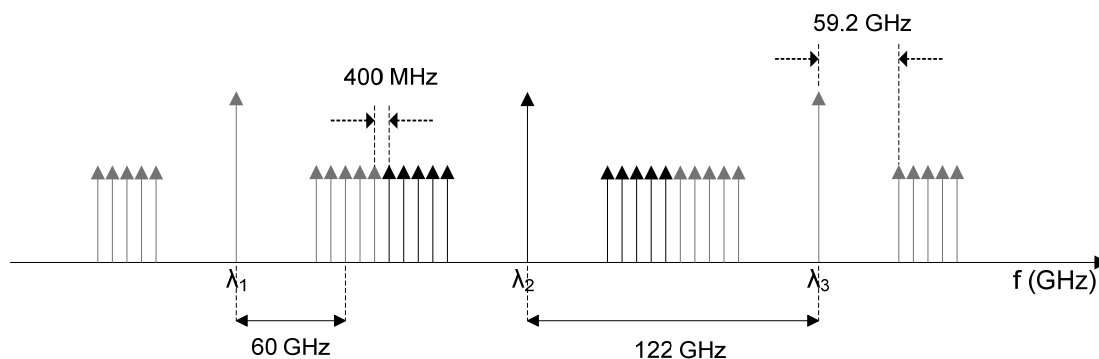


Figura 3.3 - SCM sobre WDM.

È de notar, que entre a portadora óptica e as bandas laterais do seu primeiro sinal RF, existem $(59.2 \text{ GHz} \times 2 = 118.4 \text{ GHz})$ 118.4 GHz de largura de banda que estão a ser desperdiçados, e como tal existem técnicas, como a que se segue, que poderão utilizar estas zonas de forma eficiente.

3.3.3- Entrelaçamento de comprimentos de onda em SCM/WDM

SCM/WDM ou simplesmente WDM, são técnicas que permitem tornar mais eficiente a utilização do espectro disponibilizado pelas fibras ópticas, contudo estas técnicas podem ser ainda complementadas pela técnica de entrelaçamento de comprimento de onda.

A utilização desta técnica sobre SCM/WDM, permite reutilizar de forma eficiente o espectro de sinal que distancia cada portadora óptica do primeiro sinal RF correspondente, colocando aqui a banda lateral inferior do sinal RF da portadora óptica seguinte, tal como facilmente se pode constatar pela figura 3.4. Esta técnica é normalmente utilizada recorrendo a sinais RF DSB, contudo outros esquemas de optimização do espectro podem ser utilizados, como se poderá ver a seguir.

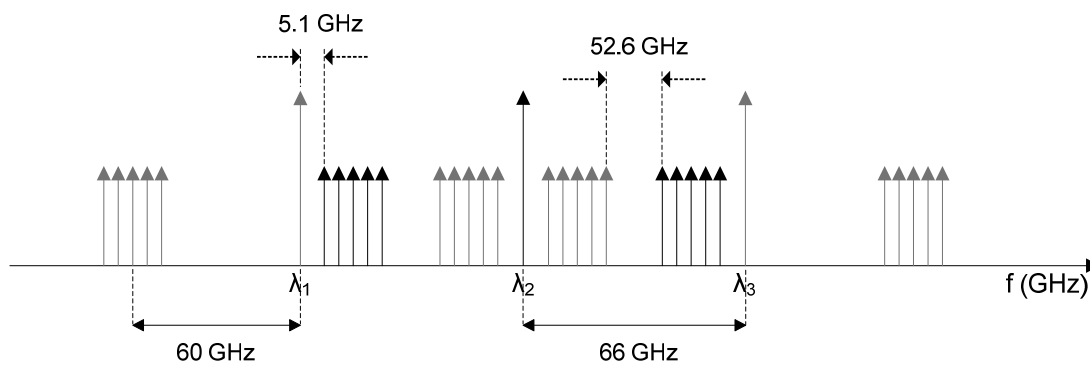


Figura 3.4 - SCM sobre WDM com intercalamento.

Na figura 3.4, voltou-se novamente a utilizar um sinal DSB de 155 Mb/s , com espaçamento entre sinais RF de 400 MHz . Este sinal é utilizado para modular uma portadora eléctrica RF a 60 GHz , sendo que neste caso, e de forma a garantir uma distância mínima de 5 GHz entre as portadoras ópticas e as bandas laterais adjacentes, considerou-se um espaçamento entre as portadoras ópticas de 66 GHz . Deste modo, para este caso, existe ainda uma distância de 62.8 GHz ($52.6 \text{ GHz} + 5.1 \text{ GHz} \times 2 = 62.8 \text{ GHz}$), de largura de banda espectral que não está a ser utilizada (considerou-se os 5.1 GHz para efeitos de comparação com o ponto anterior sem entrelaçamento SCM/WDM). Tal como se pode facilmente constatar, apesar de existir ainda espectro que não está a ser utilizado, em comparação com a figura 3.3, conseguiu-se aqui aumentar a eficiência espectral:

$$\text{Crescimento eficiência espectral} = \frac{118.4}{62.8} = \mathbf{1.89 \text{ vezes}} \quad (3.1)$$

o que demonstra ser uma técnica bastante eficiente. Podem ainda ser considerados outros esquemas de entrelaçamento de sinais, de modo a optimizar cada vez mais o espectro de sinal.

3.3.4- Esquema de entrelaçamento com sinais SSB

A utilização de sinais SSB permite a utilização mais eficiente do espectro de sinal disponível, uma vez que é possível recuperar na totalidade o sinal com somente uma banda lateral. De forma a ser explícito como se traduz em termos de eficiência, a utilização de SSB ao invés de DSB, é proposto um novo esquema de entrelaçamento com SSB, comparando este com o anterior.

Neste processo, será necessário que no final da modulação de cada portadora óptica pelo sinal RF, se realize uma filtragem SSB na estação central, isto é, será filtrada a portadora óptica mais uma banda lateral. Esta filtragem SSB terá alguns requisitos especiais, isto é, serão filtradas as bandas laterais superiores que correspondam a comprimentos de onda de índice ímpar (por ex. λ_n , $n = 1,3,5, \dots$) e serão filtradas as bandas laterais inferiores que correspondam a comprimentos de onda de índice par (por ex. λ_n , $n = 2,4,6, \dots$). Após este passo, poderão ser então multiplexados os vários comprimentos de onda.

Para exemplificar este esquema de entrelaçamento, foram multiplexados quatro comprimentos de onda, segundo a configuração já descrita, tal como poderá ser visto na figura 3.5.

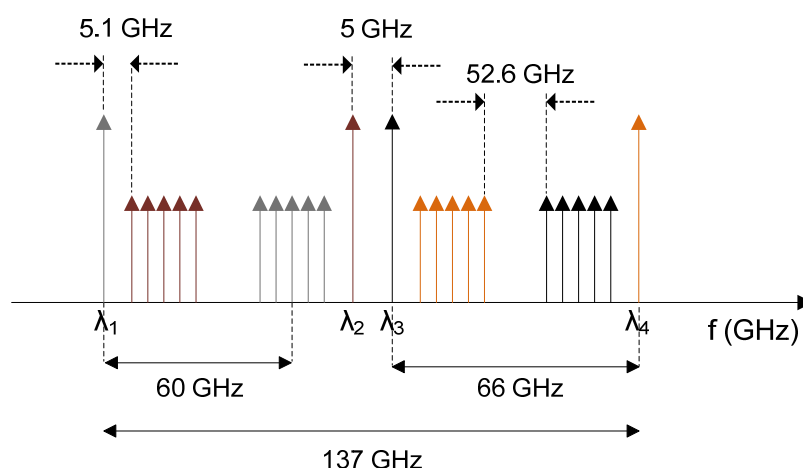


Figura 3.5 - Sinais SSB com multiplexagem SCM sobre WDM com entrelaçamento.

De forma a se observar mais concretamente quais as vantagens ao nível de eficiência espectral quando se recorre a sinais SSB relativamente à utilização de sinais DSB, elaborou-se um esquema semelhante ao apresentado na figura 3.4, porém com quatro portadoras ópticas, tal como pode ser visto na figura 3.6. Assim, quer o esquema com SSB quer com DSB irão entregar em quatro estações base a mesma quantidade de informação, utilizando somente esquemas diferentes.

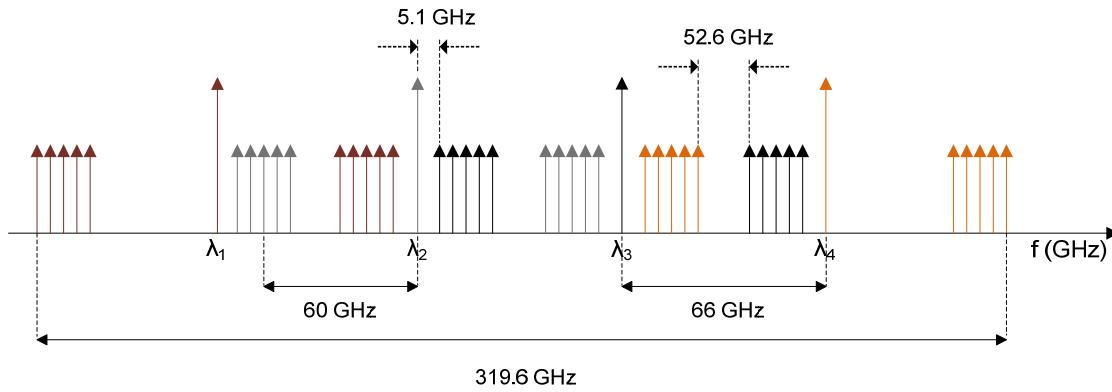


Figura 3.6 - Sinais DSB com multiplexagem SCM sobre WDM com entrelaçamento.

Comparando agora os esquemas representados na figura 3.5 e na figura 3.6, podemos verificar que para ambas entregarem nas 4 BSs, os quatro comprimentos de onda com os respectivos sinais, é necessário uma ocupação espectral segundo o esquema com SSB de 137 GHz, sendo que para o esquema com DSB será necessário 319.6 GHz. Pode-se então concluir que utilizando o esquema de filtragem SSB se obtém um aumento da eficiência espectral relativamente ao esquema com sinais DSB de:

$$\text{Crescimento da eficiência espectral} = \frac{319.6}{137} = \mathbf{2.33 \text{ vezes}} \quad (3.2)$$

Contudo, apesar deste esquema se verificar bastante eficiente em relação aos demais acarreta mais alguma sofisticação dos Sistemas RoF. Neste caso, seria necessário colocar por exemplo uma FBG e um circulador na estação central por cada comprimento de onda para realizar a filtragem SSB, antes da multiplexagem de todos os canais ópticos, tal como pode ser visto na figura 3.7.

No projecto de estações base, dependendo do comprimento de onda destinado a estas, seja de índice par ou ímpar, elas deverão realizar a filtragem da banda lateral inferior ou superior, não trazendo mais nenhuma complicação directa para estas.

A filtragem de sinais SSB traz vantagens não só ao nível da eficiência espectral, isto utilizando esquemas como o que foi apresentado, mas também ao nível da compensação da dispersão, como se pode verificar a seguir.

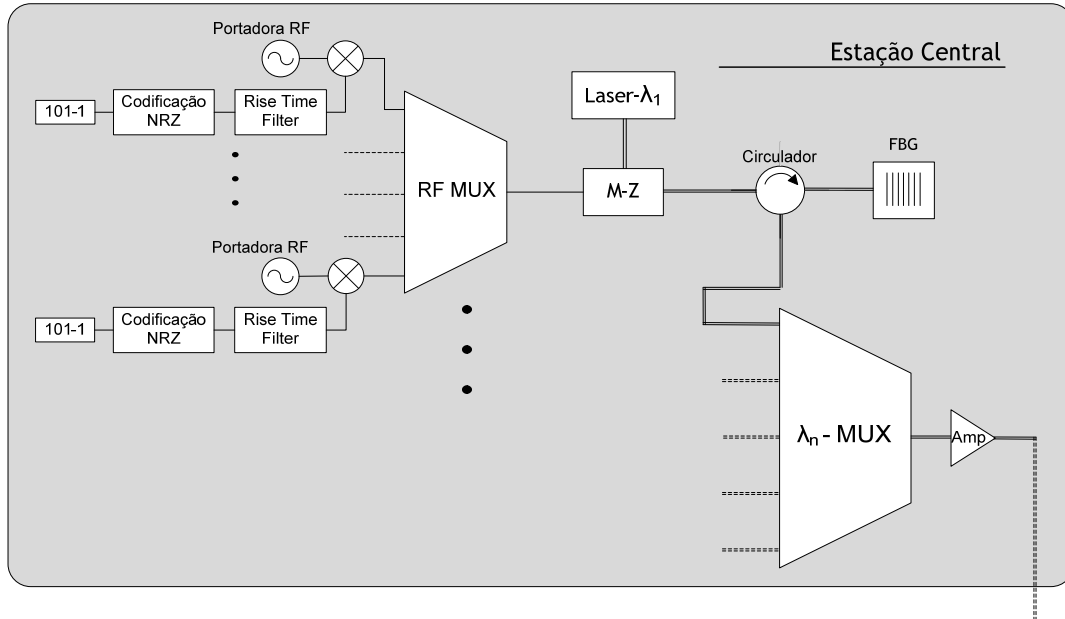


Figura 3.7 - Modificação da estação central para adoptar esquema de entrelaçamento SCM/WDM com sinais SSB.

3.4- Filtragem SSB para compensação da dispersão

A compensação da dispersão é um tema de muito relevo nos sistemas rádio sobre fibra, uma vez que nela se traduz uma das grandes limitações destes. Na secção 2.6.2 foi demonstrada a penalização da dispersão na recuperação de um sinal DSB. Neste ponto será demonstrado que a filtragem SSB permite evitar ou compensar o efeito de dispersão.

Na secção 2.6.2 para obter $E_{AM}(t, z)$ a uma distância z na fibra, incluindo a dispersão, obteve-se:

$$E_{AM}(t, z) = E_0 \cdot Re \left\{ \begin{aligned} & e^{j\omega_c t - \beta_c z} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c - \omega_1)t - (\beta_c - \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z]} \\ & + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c + \omega_1)t - (\beta_c + \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z]} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Contudo, como na estação base se realiza uma filtragem SSB, uma das bandas laterais é eliminada, tendo portanto:

$$E_{AM}(t, z) = E_0 \cdot Re \left\{ e^{j\omega_c t - \beta_c z} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c - \omega_1)t - (\beta_c - \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z]} \right\} \quad (3.4)$$

Para simplificar os cálculos, utilizou-se a notação complexa, obtendo-se:

$$E_{AM}(t, z) = E_0 \cdot \left\{ e^{j(\omega_c t - \beta_c z)} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c - \omega_1)t - (\beta_c - \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z]} \right\} \quad (3.5)$$

Considerando: $\theta_1 = \beta_c z$,
 $\theta_2 = (\beta_c - \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)z$,

tem-se que:

$$E_{AM}(t, z) = E_0 \cdot \left\{ e^{j(\omega_c t - \theta_1)} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c - \omega_1)t - \theta_2]} \right\} \quad (3.6)$$

No final da fibra $z = L$, o fotodetector responde a este sinal com uma corrente que é proporcional ao quadrado do campo eléctrico,

$$\begin{aligned} i_{AM}(t) &= \frac{E_{AM}(t, L) \cdot E_{AM}^*(t, L)}{2} \\ &= \frac{E_0^2}{2} \left\{ e^{j(\omega_c t - \theta_1)} + \frac{m}{2} e^{j[(\omega_c - \omega_1)t - \theta_2]} \right\} \cdot \left\{ e^{-j(\omega_c t - \theta_1)} + \frac{m}{2} e^{-j[(\omega_c - \omega_1)t - \theta_2]} \right\} \\ &= \frac{E_0^2}{2} + \frac{m^2}{8} E_0^2 + E_0^2 \frac{m}{4} e^{j[\omega_1 t + \theta_2 - \theta_1]} + E_0^2 \frac{m}{4} e^{-j[\omega_1 t + \theta_2 - \theta_1]} \\ &= E_0^2 \left(\frac{4 + m^2}{8} \right) + E_0^2 \frac{m}{4} e^{j[\omega_1 t + \theta_2 - \theta_1]} + E_0^2 \frac{m}{4} e^{-j[\omega_1 t + \theta_2 - \theta_1]} \end{aligned}$$

onde $\theta_2 = (\beta_c - \dot{\beta}\omega_1 + \frac{1}{2}\ddot{\beta}\omega_1^2)L$ é o deslocamento de fase acumulado pela banda lateral sobre o comprimento L , e $\theta_1 = \beta_c L$ é o deslocamento de fase acumulado pela portadora óptica sobre o comprimento L .

O primeiro termo é um componente dc, o segundo e terceiro termos são os termos de interesse:

$$i_{AM}(\omega_1) = E_0^2 \frac{m}{2} \cos(\omega_1 t + \theta_2 - \theta_1) \quad (3.7)$$

Como se pode observar, com SSB e ao contrário de DSB o sinal não é afectado pela dispersão, apenas contém uma diferença de fase, $\theta_2 - \theta_1$, que corresponde à diferença entre a fase acumulada pela banda lateral e a fase acumulada pela portadora óptica.

3.5- Redes de Bragg

3.5.1- Conceito

Uma *FBG* é um tipo de reflector de Bragg distribuído, construído num pequeno segmento de fibra óptica que reflecte um determinado comprimento de onda de luz e transmite todos os outros. Isto é conseguido, adicionando uma variação periódica do índice de refração do núcleo da fibra, o qual gera um espelho dieléctrico para um comprimento de onda específico [31].

Uma *FBG* pode ser usada como um filtro óptico para bloquear certos comprimentos de onda, ou como reflector de específicos comprimentos de onda, tal como se pode verificar na figura 3.8. A *FBG* tem também especial importância na compensação da dispersão [32].

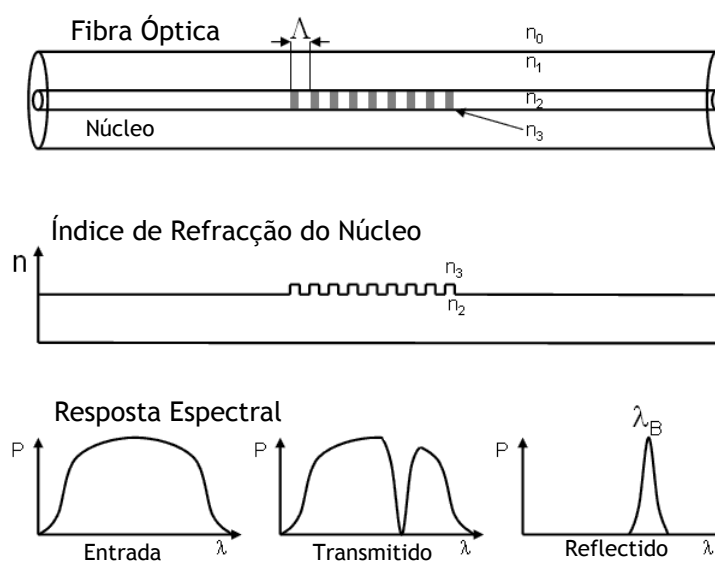


Figura 3.8 - Rede de Bragg na fibra óptica.

3.5.2- Princípio de funcionamento

O princípio fundamental de funcionamento que está por detrás de um FBG, é a reflexão de Fresnel. Onde a luz viajando entre meios com índices de refração diferentes pode, quer reflectir quer refractar na interface.

O *grating* tem tipicamente uma variação sinusoidal do índice de refração sobre um determinado comprimento, como se pode observar na figura 3.9. O comprimento de onda reflectido (λ_B), chamado o comprimento de onda de Bragg, é definido pela relação [33]:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (3.8)$$

Onde n é o índice de refração médio do grating e Λ é o período do grating. Observando a figura 3.8, n é a média de n_2 e n_3 .

O intervalo de comprimento de onda entre o primeiro mínimo (1º nulo), ou a largura de banda ($\Delta\lambda$), é dada por:

$$\Delta\lambda = \left[\frac{2\delta n_0 \eta}{\pi} \right] \lambda_B, \quad (3.9)$$

onde δn_0 é a variação no índice de refração ($n_3 - n_2$), e η é a fracção de potência no núcleo.

O pico de reflexão ($P_B(\lambda_B)$), é dado aproximadamente por:

$$P_B(\lambda_B) \approx \tanh^2 \left[\frac{N\eta(V)\delta n_0}{n} \right], \quad (3.10)$$

onde N é o número de variações periódicas. A equação total para a potência reflectida ($P_B(\lambda)$), é dada por:

$$P_B(\lambda) = \frac{\sinh^2[N\eta(V)\delta n_0\sqrt{(1-\Gamma^2)}N\Lambda/\lambda]}{\cosh^2[\eta(V)\delta n_0\sqrt{(1-\Gamma^2)}N\Lambda/\lambda]-\Gamma^2} \quad (3.11)$$

onde,

$$\Gamma(\lambda) = \frac{\pi}{\eta(V)\delta n_0} \left[\frac{\lambda}{\lambda_B} - 1 \right] \quad (3.12)$$

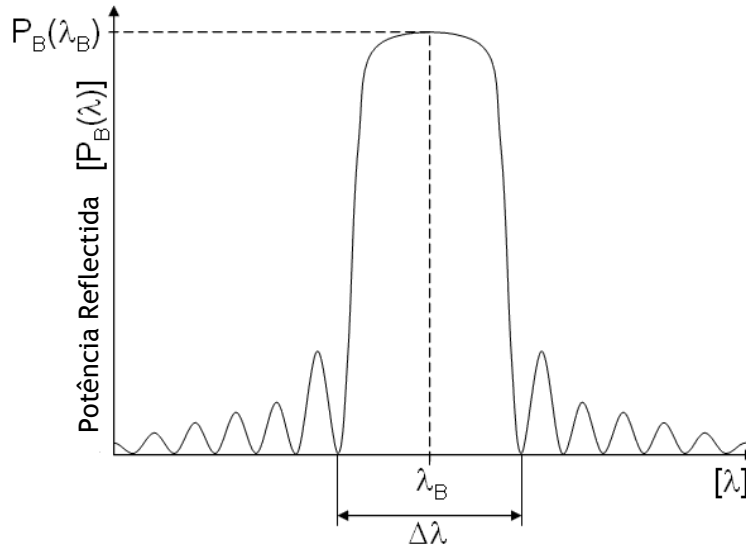


Figura 3.9 - Funcionamento de uma rede de Bragg.

3.5.3- Estrutura do grating

A estrutura do FBG pode variar segundo o índice de refração, ou o período do *grating*. O período do *grating* pode ser uniforme ou gradual, e pode ser localizado ou distribuído numa super-estrutura. O índice de refração tem duas características primárias, o perfil do índice de refração e o *offset*. Tipicamente, o perfil do índice de refração pode ser uniforme ou *apodizado*, e o *offset* do índice de refração é positivo ou zero.

As 6 estruturas mais comuns de FBGs [31] são:

- 1) Uniform positive-only index change;
- 2) Gaussian apodized;
- 3) Raised-cosine apodized;
- 4) Chirped;
- 5) Discrete phase shift;
- 6) Superstructure.

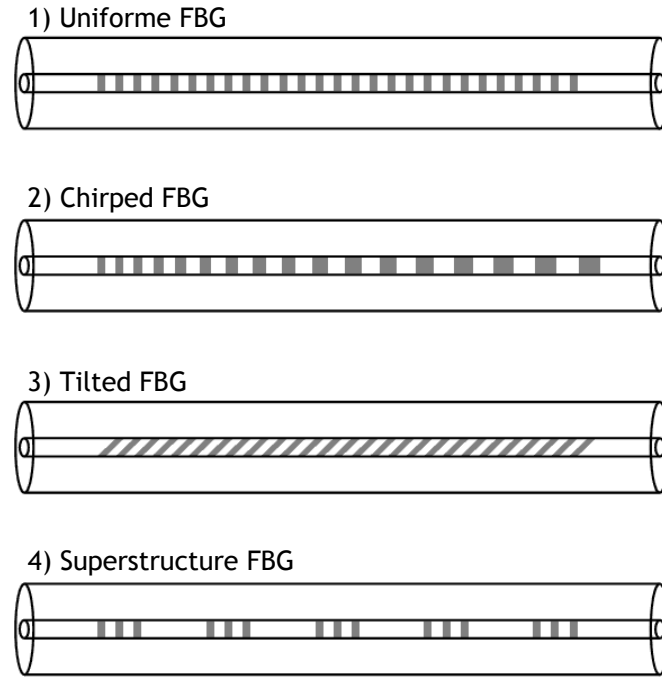


Figura 3.10 - Tipos de estruturas de FBGs.

Apodização das redes de Bragg

Existem basicamente duas quantidades que controlam as propriedades do FBG. Estas são o comprimento do *grating*, L_g , dado por:

$$L_g = N\Lambda \quad (3.13)$$

e a força do *grating*, $\delta n_0 \eta$ [34]. Existem, no entanto, três propriedades que necessitam de ser controladas num FBG. Estas são a reflectividade, a largura de banda, e a força do lobo lateral.

A partir da equação:

$$\Delta\lambda = \left[\frac{2\delta n_0 \eta}{\pi} \right] \lambda_B \quad (3.14)$$

Pode-se verificar que a largura de banda depende da força do *grating*, e não do comprimento do *grating*. Isto significa que a força do *grating* pode ser usada para definir a seleccionar a largura de banda.

O comprimento do *grating*, N efectivo, pode ser usado para seleccionar o pico da reflectividade de acordo com a equação:

$$P_B(\lambda_B) \approx \tanh^2 \left[\frac{N\eta(V)\delta n_0}{n} \right] \quad (3.15)$$

a qual depende quer da força do *grating* quer do comprimento do *grating*. Disto resulta que, a força do lobo lateral não pode ser controlada, e esta simples optimização resulta em significativos lobos laterais.

Uma terceira quantidade pode ser variada para ajudar com a supressão do lobo lateral, isto é, a *apodização* das mudanças do índice de refração. O termo *apodização* refere-se à *grelha* do índice de refração para se aproximar do zero no final do *grating*. *Apodized gratings* oferecem melhorias significativas na supressão do lobo lateral, enquanto mantêm a reflectividade, e uma estreita largura de banda. As duas funções são tipicamente usadas para *apodizar* a FBG são gaussianiana, e um *raised-cosine*.

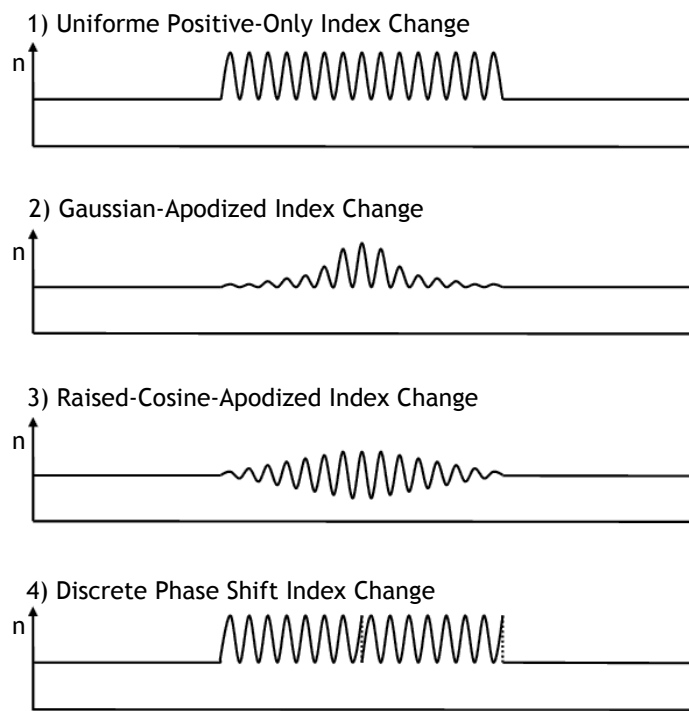


Figura 3.11 - Alterações no índice de refração da fibra óptica.

3.5.4- FBGs em sistemas WDM

Dados os diversos parâmetros controláveis das FBGs, é possível manipular estas de modo a se obter a resposta espectral ótima pretendida para as várias situações. As redes de Bragg, na sua forma mais básica, apresentam uma perturbação periódica do índice de refração de valor máximo constante e são denominadas por redes de Bragg uniformes. Em sistemas onde sejam usadas técnicas de multiplexagem como WDM, este tipos de redes de Bragg poderão ter um comportamento indesejado, uma vez que a atenuação dos lobos secundários é baixa e certamente poderão introduzir *crossstalk* pelos canais adjacentes [21]. De forma a aumentar a atenuação dos lobos secundários, a solução passa por variar a amplitude do índice de refração, obtendo-se assim redes de Bragg apodizadas. Poderá ser observado na figura 3.12 (a) vários formatos de apodização e na figura 3.12 (b) os espectros de reflexão correspondentes. Pode-se observar que a apodização do tipo Gaussiana é a mais eficaz na redução dos lobos laterais [21].

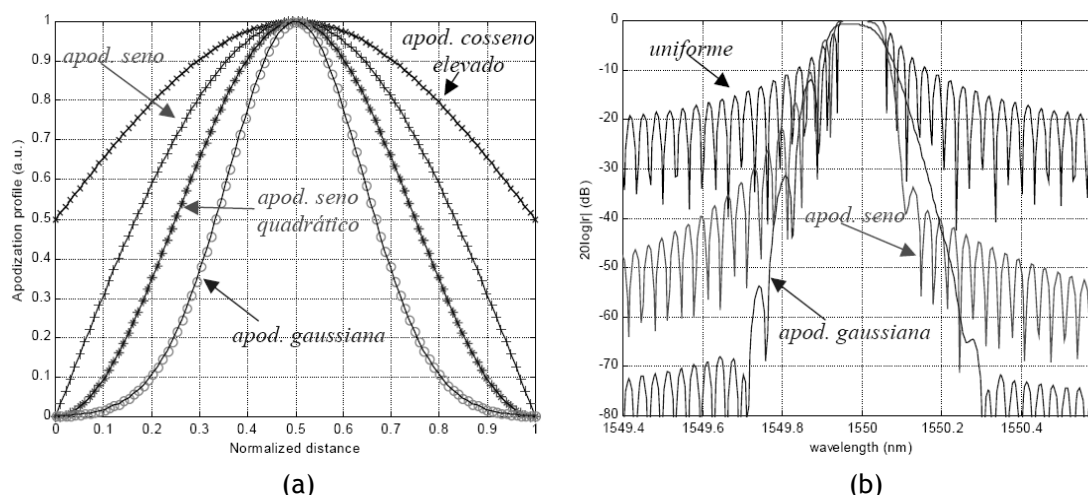


Figura 3.12 - (a) Formatos de apodização; (b) Efeito da apodização na resposta espectral das redes de Bragg ($L = 25$ mm, $\overline{\delta n_{eff}} = 10^{-4}$, $n_{eff} = 1.45$, $v = 1.0$). [35]

Para além do formato de apodização deve-se igualmente considerar o efeito do *offset* n_{th} , que influencia o valor médio da perturbação [21]. Observando a figura 3.13, verifica-se que para valores de n_{th} diferentes de zero obtêm-se respostas espectrais assimétricas, com menor rejeição fora da banda passante que no caso de n_{th} nulo. Quando n_{th} é positivo, a variação do atraso introduzido com o comprimento de onda apresenta uma inclinação negativa em torno de $f_{max}(c/\lambda_{max})$ aumentando a dispersão introduzida por uma FBG [21]. Contudo, as redes de Bragg com n_{th} negativo podem compensar a dispersão introduzida pela fibra óptica, dado que nesta a dispersão é positiva, levando a uma melhoria no desempenho do sistema. Além disso, à variação de n_{th} desde $-v$ até 0 corresponde uma variação da inclinação do atraso e da largura de banda passante da resposta da rede [21]. Conclui-se portanto que, para as aplicações das FBGs como filtros ópticos em sistema WDM existe um n_{th} óptimo para o qual o melhor desempenho do sistema é conseguido [36].

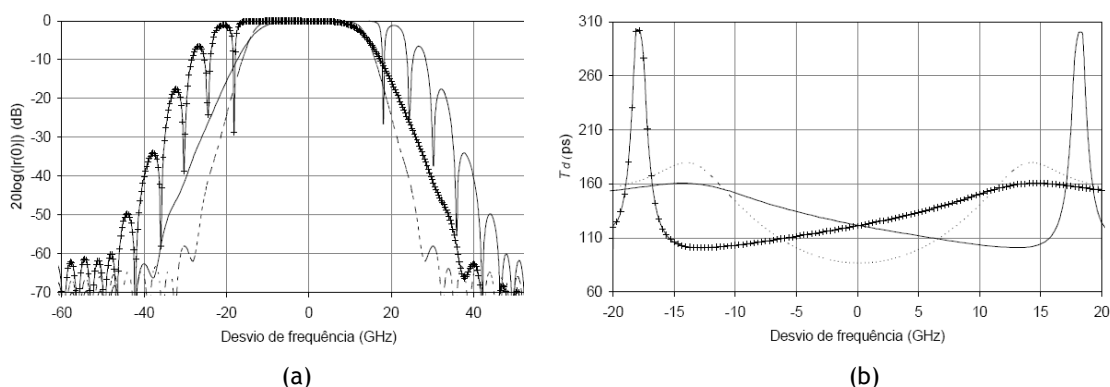


Figura 3.13 - Resposta espectral (a) e atraso introduzido (b) por redes de Bragg com diferentes valores médios da variação do índice de refração: positivo, $n_{th} = v(-)$; negativo, $n_{th} = v(+)$ e nulo, $n_{th} = 0$ (---); o formato da apodização é gaussiano, $L = 30$ mm, $\overline{\delta n_{eff}} = 2 \times 10^{-4}$, $n_{th} = 1.45$, $v = 1.0$; o desvio de frequência é em torno de $f_{max}(c/\lambda_{max})$, com $\lambda_{max} = 1.55\mu\text{m}$ [21].

3.5.5- Multiplexador Óptico add/drop

Um multiplexador óptico add/drop é um dispositivo utilizado em sistemas de multiplexagem por divisão nos comprimentos de onda e também para encaminhamento de diferentes canais de luz para dentro ou fora de uma fibra óptica monomodo. Este tipo de nó óptico é geralmente usado para construir uma rede óptica de telecomunicações em anel. “Add” e “Drop” refere-se à capacidade do dispositivo para adicionar um ou mais canais de comprimentos de onda a um sinal WDM com múltiplos comprimentos de onda, e/ou também remover um ou mais canais, encaminhando estes sinais para um outro caminho da rede. Um OADM pode ser considerado para ser um tipo específico de *optical cross-connect*.

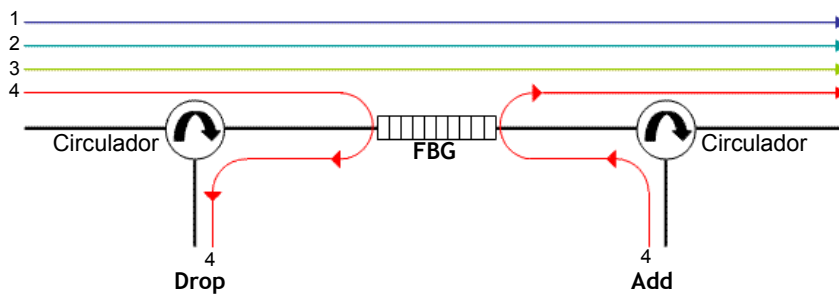


Figura 3.14 - Multiplexador Óptico Add/Drop

A figura 3.14 representa um OADM baseado numa FBG para selecção e inserção de canais num dado comprimento de onda (comprimento de onda de Bragg). Um tradicional OADM consiste em três estágios: um desmultiplexador óptico, um multiplexador óptico e entre eles um método de reconfiguração de caminhos entre o desmultiplexador óptico, o multiplexador óptico e um conjunto de portas para adicionar ou remover sinais (comprimentos de onda).

O desmultiplexador óptico separa comprimentos de onda na entrada da fibra para várias portas. A reconfiguração pode ser alcançada por um painel do caminho óptico ou então por comutadores ópticos, os quais direccionam os comprimentos de onda para o multiplexador óptico ou para portas para remoção.

3.6- Conclusão

Este capítulo visou o estudo da optimização da tecnologia rádio sobre fibra. Nesse intuito foram expostas técnicas de geração de sinais RF e microondas, assim como um conjunto de técnicas para optimizar a eficiência espectral. Neste último ponto, teve especial destaque a técnica de multiplexagem de SCM/WDM com entrelaçamento utilizando sinais DSB, sendo por isso adoptada no próximo capítulo.

Elaborou-se uma demonstração para comprovar como a filtragem SSB na BS poderá ser utilizada para realizar a compensação da dispersão.

Finalmente, foram estudadas de forma minuciosa os vários tipos de redes de Bragg, ao nível de estrutura, da constituição e princípio de funcionamento. Foi também revisto, a aplicação destas em sistemas WDM, sendo estas adoptadas na simulação do capítulo seguinte. Estudou-se ainda o princípio de funcionamento de um multiplexador *add/drop*.

Concluído este capítulo, e estudadas as várias técnicas e tecnologias que visam otimizar os sistemas rádio sobre fibra, surge agora a necessidade de elaborar algumas simulações que aprovelem ou refutem o que aqui foi referido. Surge assim o próximo capítulo: “Simulação”.

Capítulo 4

Simulação

4.1- Introdução

Após a introdução deste capítulo, segue-se a secção 4.2. Nela é realizada uma descrição do sistema experimental pormenorizada, que se manterá ao longo dos restantes pontos deste capítulo, salvaguardando algumas alterações pontuais que serão oportunamente referidas.

Na secção 4.3, é traçado o perfil da rede de Bragg que será usada ao longo das simulações, em termos da sua resposta espectral, em amplitude.

Na secção 4.4, são realizadas varias simulações que têm por objectivo otimizar o espaçamento entre canais ópticos, de modo a maximizar a eficiência espectral. Neste estudo inclui-se a desmodulação por parte das entidades móveis da 1ª, 3ª e 5ª sub-portadora RF. É ainda comparado o resultado obtido com a variação da largura espectral do laser utilizado, de 10 MHz para 5 MHz.

Na secção 4.5, utilizando o esquema base da simulação, é acrescido a montagem de cinco estações base em série, concretizando assim a ligação descendente de um sistema rádio sobre fibra com topologia de rede em anel.

Os resultados obtidos nas várias simulações são sujeitos ao cálculo da taxa de erros introduzida pelos sistemas simulados.

Por fim, na secção 4.6 apresentam-se as conclusões que sumarizam o estudo desenvolvido neste capítulo e focam os aspectos essenciais dele.

4.2- Descrição do sistema simulado

O sistema experimental que foi utilizado como base para a obtenção dos resultados ao longo deste capítulo, é baseado na técnica de multiplexagem SCM/WDM, sendo aqui utilizado um esquema de entrelaçamento de comprimentos de onda igual ao da figura 4.1. Para além disto, poderá também ser evidenciado na figura 4.1, a filtragem que será realizada pelo FBG para selecção do comprimento de onda e respectiva banda lateral (filtragem SSB).

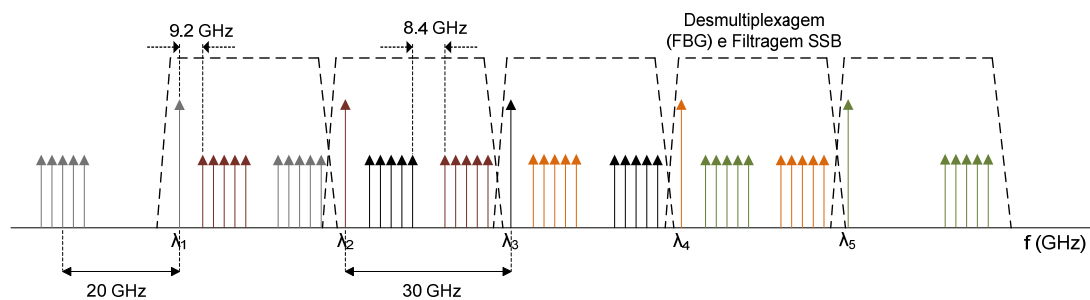


Figura 4.1 - Esquema de entrelaçamento de comprimentos de onda do sistema experimental simulado, com 30 GHz de espaçamento entre portadoras ópticas.

Para a obtenção do espectro de sinal que figura em cima, é necessário um conjunto de processos, evidenciados na figura 4.2 e que se passa agora a descrever.

Inicialmente, é gerada uma sequência pseudo-aleatória com uma taxa de transmissão de 156.25 Mbits/s, sendo de seguida realizada uma codificação NRZ do sinal. Este faz-se atravessar por um filtro (*Rise Time Filter*) que tem como função limitar o sinal a uma largura de banda de 117 MHz. Na tabela 4.1 poderá ser encontrado os parâmetros utilizados na simulação para amostragem de sinal.

Este sinal é utilizado para gerar um sinal BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), aplicando uma portadora RF centrada a 20 GHz. A par deste sinal, são gerados mais quatro sinais BPSK, dois acima e dois abaixo dos 20 GHz, espaçados 400 MHz, sendo depois multiplexados. Assim se constitui um canal SCM.

Uma vez que se pretende transmitir cinco comprimentos de onda com informação distinta, são gerados mais quatro canais SCM, com as mesmas características que o primeiro. Cada um destes cinco canais SCM é utilizado para modular uma única portadora óptica, sendo a frequência da portadora óptica central de 193.1 THz (1553.599 nm) e, o espaçamento entre portadoras ópticas de 30 GHz. Nesta modulação é utilizado um modulador Mach-Zehnder e um laser com largura de banda de 10 MHz.

Procede-se agora à multiplexagem dos vários comprimentos de onda, obtendo-se um sinal semelhante ao da figura 4.1, e que poderá ser constatado na figura 4.3.

Após a multiplexagem dos comprimentos de onda, o sinal obtido é amplificado 10 dB de modo a percorrer os 10 km de fibra óptica monomodo sem sofrer degradação. O sinal SCM/WDM deixa agora a estação central, seguindo pela fibra óptica até à próxima estação base.

Segundo a configuração aqui adoptada, a BS recebe todos os comprimentos de onda, sendo que a FBG encarrega-se de reflectir o comprimento de onda para a qual foi sintonizada. A FBG filtra portanto a portadora óptica e respectiva banda lateral superior, porém, uma vez que se faz aqui entrelaçamento de comprimentos de onda, a banda lateral inferior da portadora óptica seguinte também é filtrada, como se pode ver na figura 4.4, contudo este facto não acarreta qualquer problema para a recuperação do sinal original.

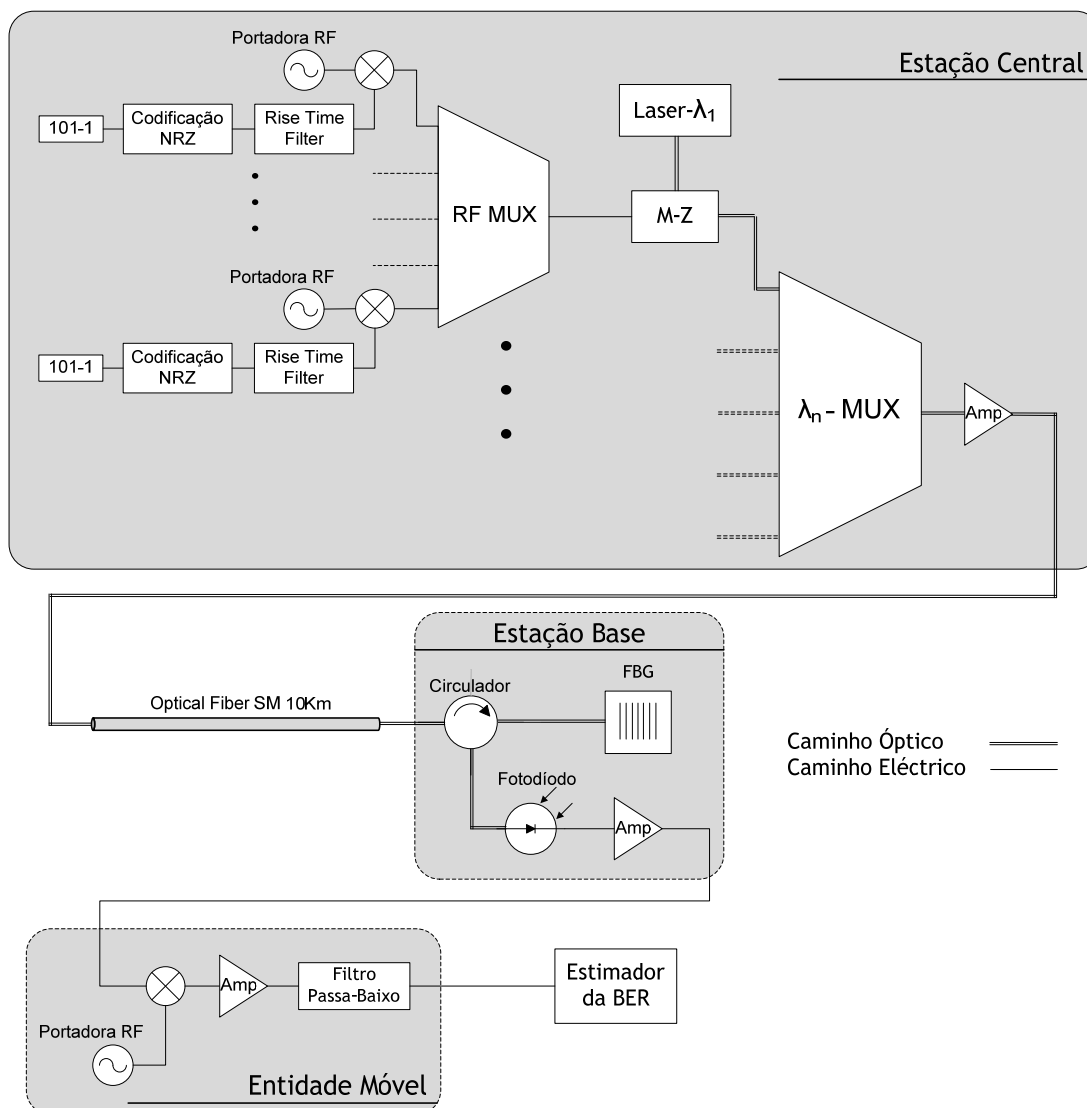


Figura 4.2 - Configuração base do sistema experimental simulado.

Tabela 4.1- Parâmetros de simulação para amostragem de sinal.

Parâmetro	Valor
TimeWindow (s)	$64/(156.25 \times 10^6)$
SampleRateDefault (Hz)	80×10^9
BitRateDefault (bit/s)	156.25×10^6

A seguir à filtragem SSB com o FGB, segue-se a conversão do sinal óptico para sinal eléctrico através do fotodiodo e a sua amplificação. Numa estação base real, o sinal seria agora radiado através da antena da estação base.

Agora em percurso eléctrico o sinal segue para o bloco correspondente à entidade móvel. Neste bloco é multiplicado o sinal pela portadora com frequência e fase original, passando o sinal agora para banda base. Os últimos passos são amplificar novamente o sinal, fazê-lo atravessar um filtro passa baixo com a largura de banda de aproximadamente 110 MHz , para filtrar apenas o espectro correspondente ao sinal original. Por fim é comparado o sinal obtido

com o original e calculada a taxa de erros através do bloco BER, utilizando um método de estimação gaussiano.

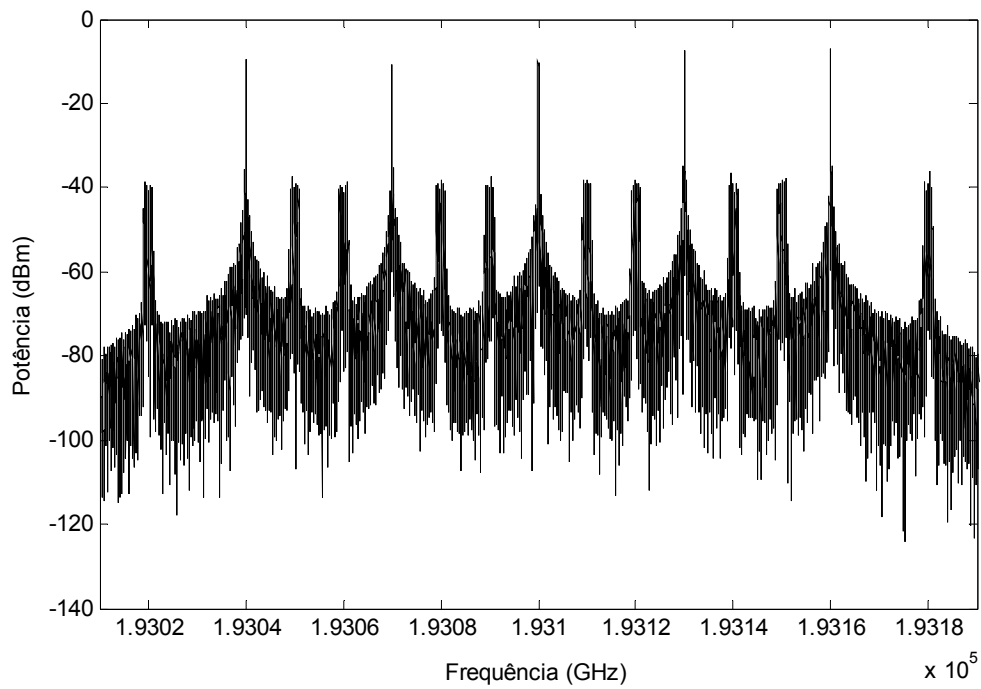


Figura 4.3 - Espectro óptico da multiplexagem dos vários comprimentos de onda entrelaçados.

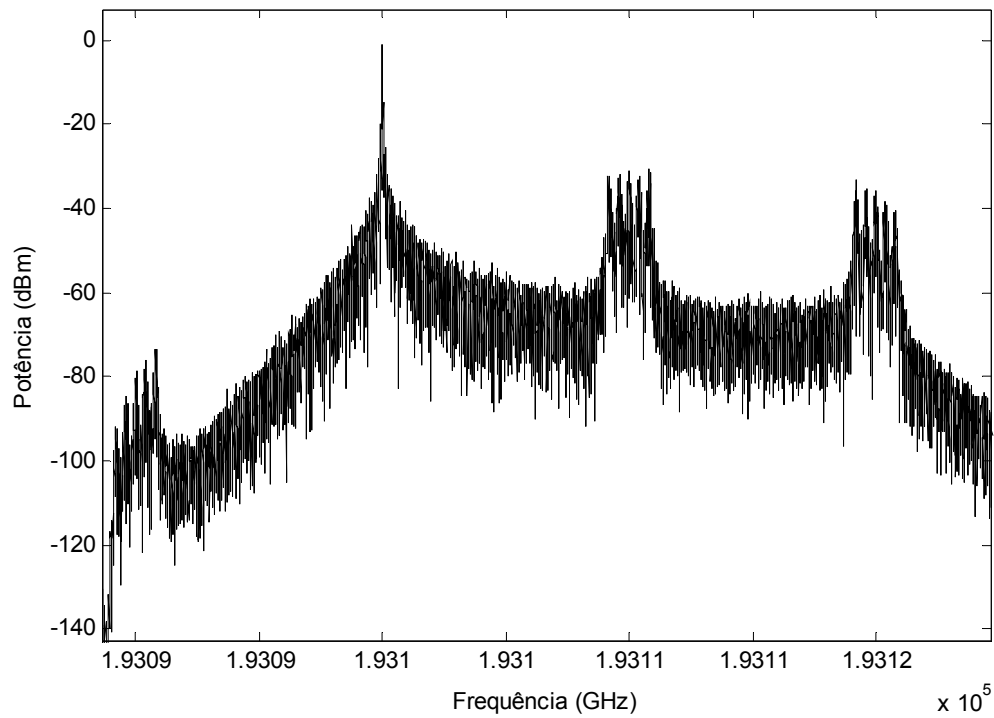


Figura 4.4 - Espectro óptico corresponde à filtragem SSB na estação base.

4.3- Perfil da rede de Bragg simulada

Tal como já foi referido, as redes de Bragg podem ser utilizadas simultaneamente para compensação da dispersão e também filtragem óptica. Contudo, nesta simulação apenas se utilizou FBGs para filtrar o canal óptico na BS, pois na compensação da dispersão optou-se pelo processo de filtragem SSB.

Através de um esquema de simulação representado pela figura 4.5, foram realizadas várias iterações para sucessivos valores de comprimento de onda do laser. Deste modo foi possível traçar o perfil da rede de Bragg. Na figura 4.6 encontra-se evidenciada a resposta da FBG em termos de amplitude, quer para o sinal reflectido quer para o sinal transmitido.

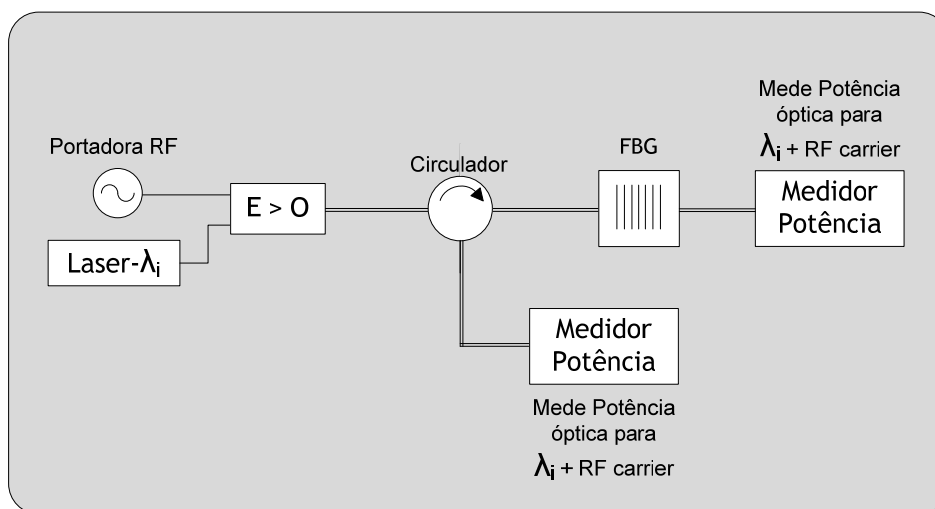


Figura 4.5 - Esquema utilizado na obtenção do perfil da rede de Bragg.

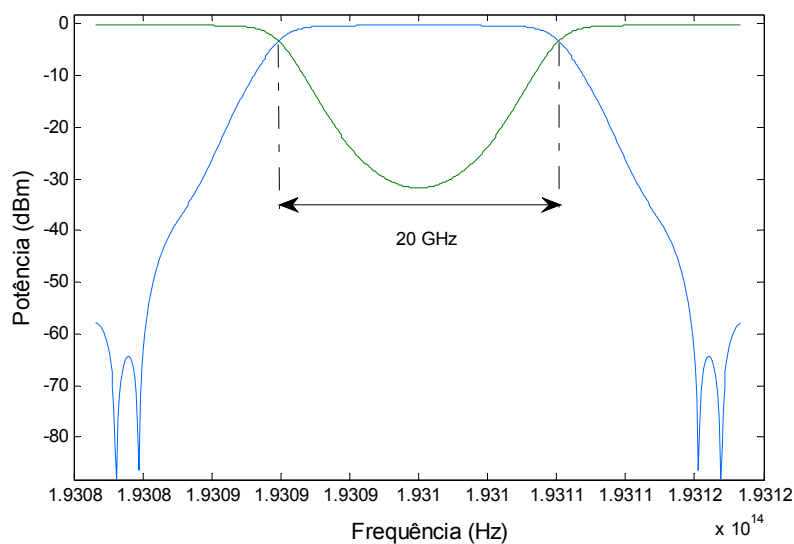


Figura 4.6 - Espectro de potência do sinal transmitido (verde) e o sinal reflectido (azul) para uma FBG de largura de banda 36.9 GHz.

É de notar que a largura de banda a 3 dB é de 20 GHz, contudo por indicação do software de simulação utilizado, o filtro apresenta uma largura de banda de 36.9 GHz.

4.4- Optimização do espaçamento entre canais ópticos

O espaçamento entre canais ópticos, é algo bastante relevante no projecto de um sistema rádio sobre fibra, uma vez que com o conhecimento das consequências da adopção que se faça, é possível minimizar este valor, de modo a reduzir o espectro que poderá ser ocupado sem qualquer utilidade.

Para se obter os resultados pretendidos, calculou-se o valor da BER à medida que se fez variar o espaçamento entre portadoras ópticas de 20 GHz até 50 GHz com passo de 200 MHz. Esta análise foi feita considerando a filtragem pela FBG do canal óptico central, isto é, correspondente a λ_3 . Para efeitos de comparação com o sinal original, considerou-se três casos de desmodulação pela entidade móvel, sendo estes, a desmodulação da 1ª, 3ª e 5ª sub-portadora RF, que correspondem às frequências de 19.2 GHz, 20 GHz e 20.8 GHz, sucessivamente.

4.4.1- Considerações

O software que foi utilizado, tal como já foi dito, foi o VPI Photonics. Para esta simulação obteve-se valores cuja resolução do VPI se verificou insuficiente para os obter, apresentando o valor zero para algumas taxas de erro calculadas. Sabe-se à partida que a resolução do VPI não permite calcular valores de BER de ordem de grandeza inferior a 10^{-300} , e sendo também este valor, face ao número de amostras que são retiradas do sinal (64 bits) para o calcular, um valor sem sentido real. Portanto, considerou-se o valor mínimo de taxa de erros de 10^{-50} .

4.4.2- Espaçamento Óptico versus BER

Tal como foi referido, segue-se a optimização do espaçamento óptico para os casos de desmodulação da 1ª, 3ª e 5ª sub-portadoras RF. Este estudo do espaçamento entre canais ópticos teve por base um artigo publicado por Kaszubowska et al [37]. Neste trabalho usou-se modulação BPSK enquanto que em [37] foi usado uma modulação do tipo PSK, em que o sinal é modulado em fase somente no envio do bit 1.

A desmodulação da 1ª sub-portadora RF, corresponde ao caso mais favorável, uma vez que é aquela que mais se distancia da portadora óptica e se encontra mais próxima do centro da FBG. A figura 4.7 representa a variação da taxa de erros em função do espaçamento óptico, quando se desmodula a 1ª sub-portadora RF. Para este caso, verifica-se que para o espaçamento entre canais ópticos de 20.8 GHz, já é possível recuperar o sinal original apresentando uma taxa de erros inferior a 10^{-9} .

Verifica-se ainda que entre 38.4 GHz e 40 GHz, a taxa de erros oscila, sendo quer inferior a 10^{-9} , quer superior a 10^{-9} . Este facto corresponde à sobreposição das várias sub-portadoras RF da banda lateral inferior da portadora óptica seguinte na sub-portadora RF que se está a tentar recuperar. A desmodulação da 3ª sub-portadora RF, corresponde a um caso intermédio,

uma vez que se encontra entre a 1ª e 5ª sub-portadoras RF. Na figura 4.8, encontra-se a variação da taxa de erros em função do espaçamento óptico, quando se desmodula a 3ª sub-portadora RF. Para este caso, verifica-se que para o espaçamento entre canais ópticos de 21.6 GHz, já é possível recuperar o sinal original apresentando uma taxa de erros inferior a 10^{-9} . Neste caso a taxa de erros apresenta um comportamento oscilatório para um espaçamento superior, entre 39.2 GHz e 40.8 GHz, uma vez que esta sub-portadora RF, pelo facto de se encontrar afastada da 1ª sub-portadora RF 800 MHz, será apenas afectada 800 MHz mais tarde.

A desmodulação da 5ª sub-portadora RF, corresponde ao pior caso, uma vez que é aquela que mais se aproxima da portadora óptica e se encontra mais afastada do centro da FBG. Poderá ser encontrado na figura 4.9, a variação da taxa de erros em função do espaçamento óptico, quando se desmodula a 5ª sub-portadora RF. Para este caso, verifica-se que para o espaçamento entre canais ópticos de 22.4 GHz, já é possível recuperar o sinal original apresentando uma taxa de erros inferior a 10^{-9} .

Mais uma vez a taxa de erros apresenta um comportamento oscilatório, agora 800 MHz afastada da anterior, logo, entre 40 GHz e 41.6 GHz.

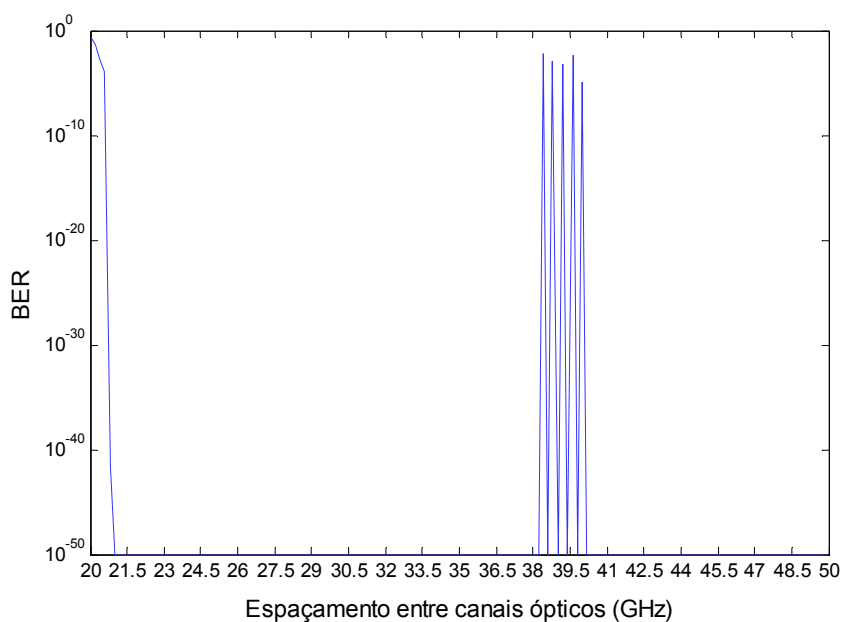


Figura 4.7 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos para a 1ª banda lateral.

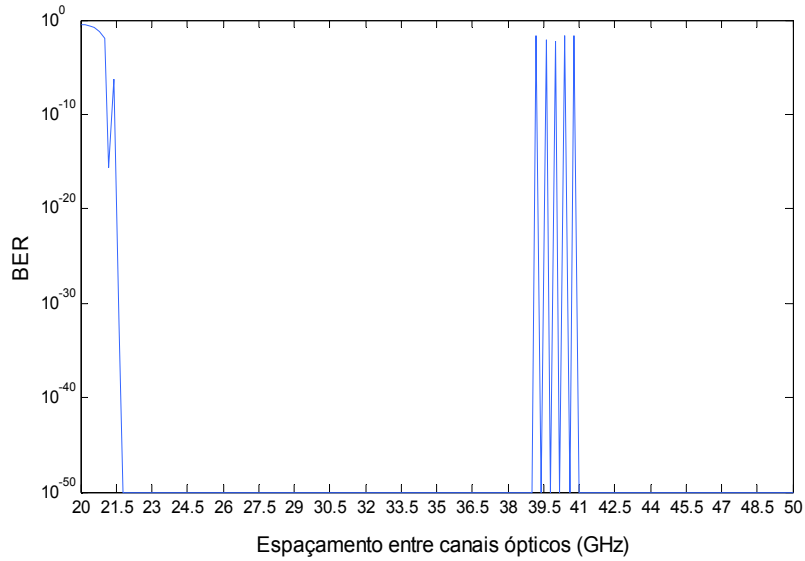


Figura 4.8 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos para a 3ª banda lateral.

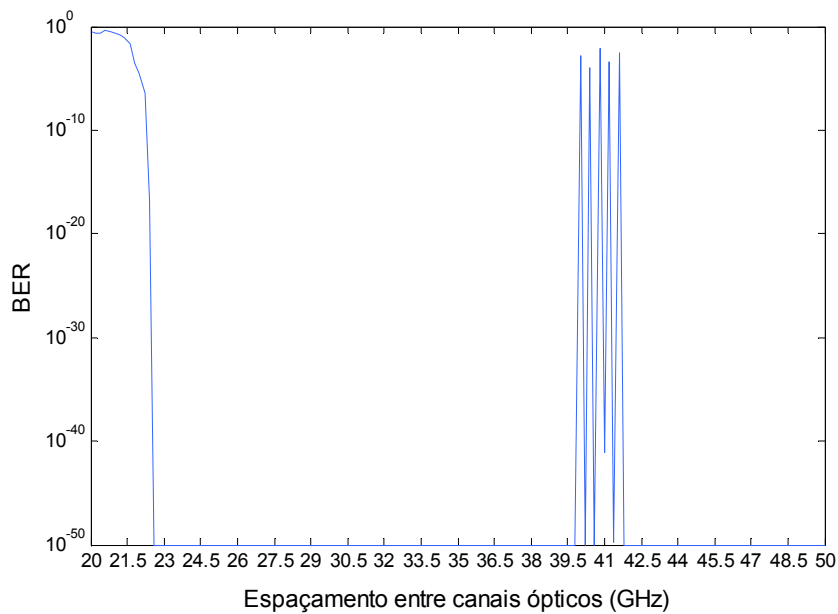


Figura 4.9 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos para a 5ª banda lateral.

De modo a perceber, qual o espaçamento óptico que poderá ser utilizado num sistema rádio sobre fibra semelhante ao aqui especificado, através dos gráficos anteriores traçou-se um gráfico geral, que engloba os resultados da desmodulação da 1ª e 5ª portadora RF, podendo ser visualizado na figura 4.10.

Nesse gráfico é possível constatar, tal como seria suposto, que o valor mínimo para o espaçamento entre canais ópticos é de 22.4 GHz, sendo que, devido à sobreposição com a banda lateral inferior da portadora óptica seguinte, o espaçamento óptico não deverá se encontrar os 38.4 GHz e os 41.6 GHz.

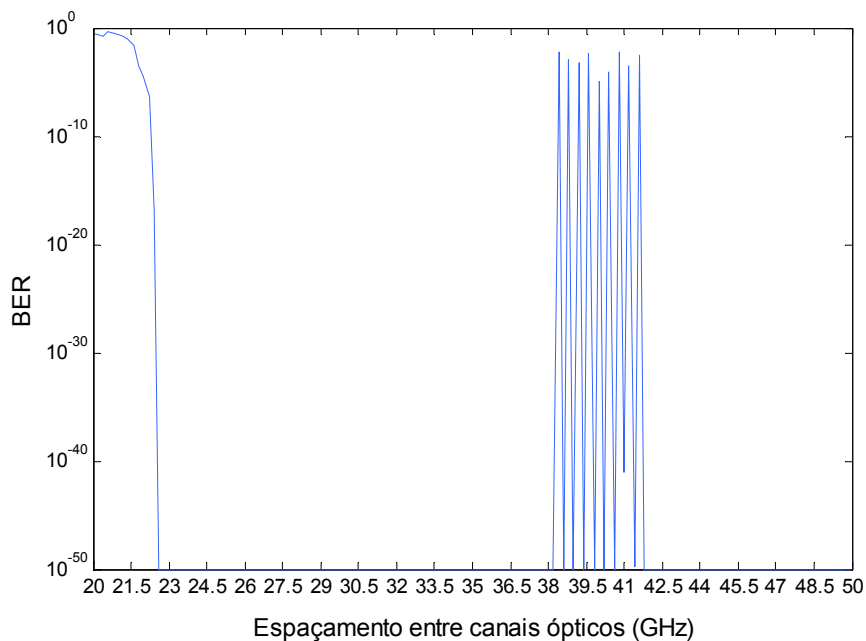


Figura 4.10 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos, conjugando os resultados da desmodulação da 1ª e 5ª sub-portadoras RF, para um laser com de 10 MHz de largura espectral.

De uma forma genérica, o espaçamento que separa a portadora óptica da sub-portadora RF mais próxima, para sinais com taxas de transmissão iguais ou inferiores 155 Mbits/s, deverá ser no mínimo de 1.6 GHz ($22.4 \text{ GHz} - 20.8 \text{ GHz} = 1.6 \text{ GHz}$), de modo a se conseguir recuperar o sinal original com uma taxa de erros inferior a 10^{-9} .

Verificou-se também, qual o comportamento do sistema com a variação da largura espectral do laser de 10 MHz para 5 MHz. Contudo como se pode verificar na figura 4.11, poucas alterações se fazem sentir, verificando-se apenas uma optimização de 200 MHz, isto é, com o laser de largura espectral de 5 MHz, consegue-se obter uma taxa de erros inferior a 10^{-9} , para um espaçamento mínimo entre portadoras ópticas de 22.2 GHz. Isto contrasta com os resultados obtidos em [37] onde é observada uma dependência com a largura espectral do laser, que pode ser explicada pelo facto do tipo de modulação usado ser diferente.

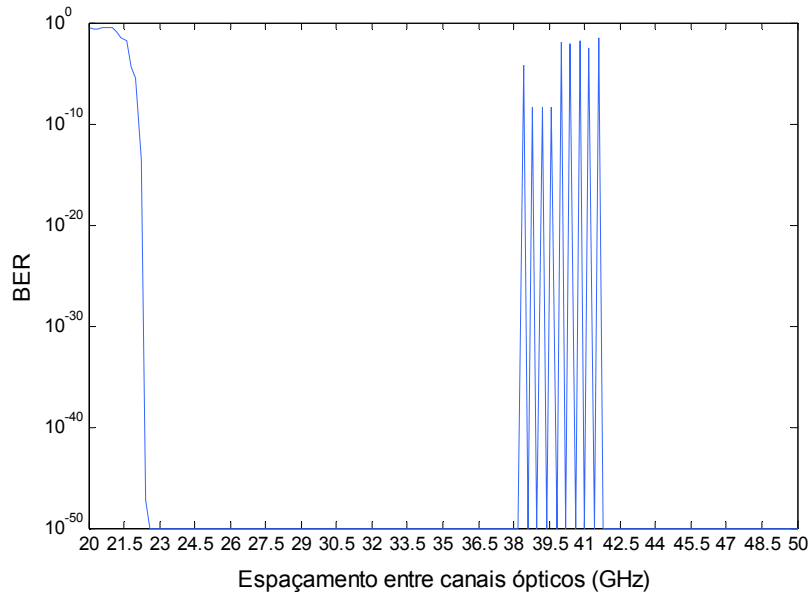


Figura 4.11 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos, conjugando os resultados da desmodulação da 1ª e 5ª sub-portadoras RF, para um laser com de 5 MHz de largura espectral.

Tal como foi referido anteriormente, este estudo de optimização do espaçamento entre canais ópticos, foi realizado tendo por base, um artigo publicado por Kaszubowska et al. [37], sendo que os resultados aí obtidos, para a variação da BER em função do espaçamento podem ser observados na figura 4.12.

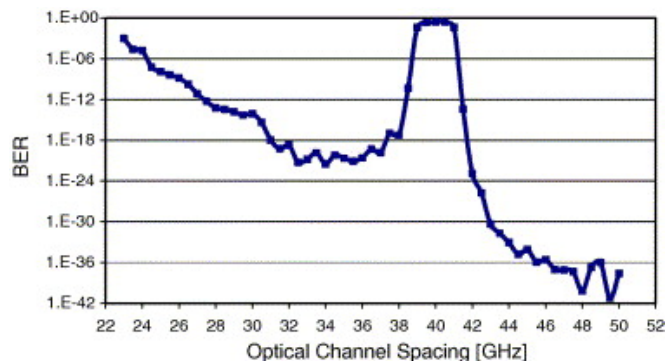


Figura 4.12 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos, considerando a desmodulação a 3ª sub-portadora RF [37].

Contudo, algumas optimizações do sistema foram realizadas, daí os resultados obtidos anteriormente neste capítulo (figura 4.10) se apresentarem bastante diferentes dos obtidos no artigo [37], mais concretamente os evidenciados pela figura 4.12.

De modo a ser compreendido como foi optimizado todo o sistema, mais propriamente que alterações originaram as diferenças entre as figuras 4.12 e 4.10, realizou-se uma simulação em condições praticamente semelhantes relativas à figura 4.12, de modo a comprovar os resultados aí expostos. Após isso, poderá então ser mais facilmente entendido, o que distingue essas duas figuras em termos da montagem de simulação que lhe sucedeu.

Portanto, montou-se um esquema semelhante ao usado na obtenção dos resultados evidenciados pela figura 4.12, obtendo-se novos resultados que são destacados pela figura 4.13. Esta figura apresenta algumas diferenças comparativamente à figura 4.12, devendo-se essencialmente a dois factores.

O primeiro factor é referido ao facto de, no artigo publicado em [37] não ser colocado um bloco para recuperação da fase do sinal original, colocando-se apenas o oscilador local com uma fase próxima da real. Esta circunstância traduz-se na figura 4.13, em uma redução da BER para os valores de espaçamento entre canais ópticos superior ao espaçamento mínimo.

O segundo factor, é devido à figura 4.12 corresponder à desmodulação da 3ª sub-portadora RF, enquanto que os resultados apresentados na figura 4.13, correspondem à conjugação dos piores resultados na desmodulação da 1ª e 5ª sub-portadora RF. Este facto traduz-se a um aumento na figura 4.13, do espaçamento mínimo entre canais ópticos. Sendo que, na figura 4.13 o valor de espaçamento entre canais ópticos para uma BER inferior a 10^{-9} é de 24,4 GHz.

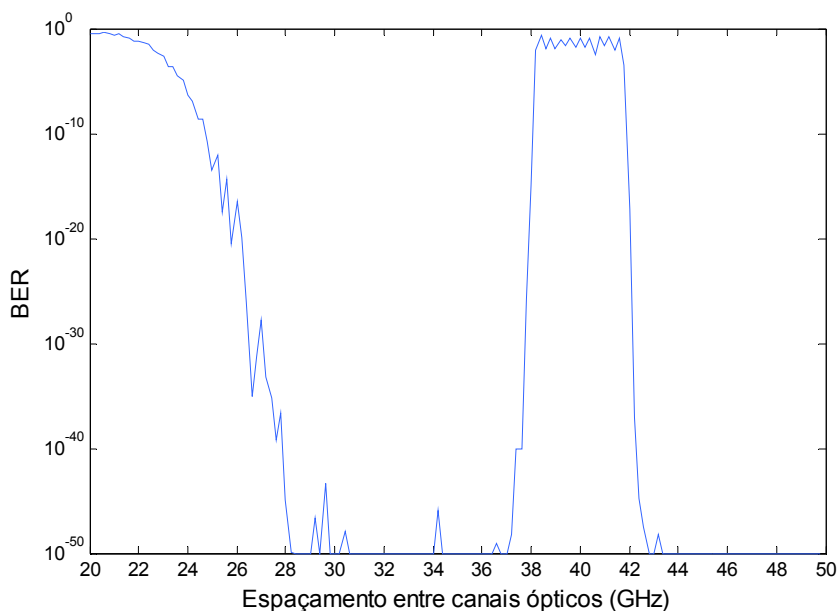


Figura 4.13 - Taxa de erros em função do espaçamento entre canais ópticos, conjugando os piores resultados da desmodulação da 1ª e 5ª sub-portadoras RF, para um laser com de 10 MHz de largura espectral, utilizando modulação PSK.

Comparando agora os resultados evidenciados na figura 4.13 com os da figura 4.10, constata-se na figura 4.10 uma melhoria muito significativa na optimização do espaçamento entre canais ópticos. Esta melhoria de resultados apresentados pela figura 4.10 comparativamente à figura 4.13, surge no facto de na figura 4.10 ser utilizado uma modulação BPSK e na figura 4.13 ser utilizado, tal como no artigo [37] uma modulação PSK. Sendo este facto, o principal responsável pelas diferenças apresentados nos resultados obtidos nesse artigo e os resultados obtidos nesta tese de mestrado.

4.5- Ligação descendente de um sistema RoF em anel

Neste ponto, procurou-se simular o comportamento das redes de Bragg numa arquitectura em anel, contudo considerou-se apenas a ligação descendente, da estação central para a estação base. Elaborou-se um esquema no simulador VPI, semelhante ao da figura 4.2, no entanto contendo agora as várias redes de Bragg em série, que realizarão a filtragem dos cinco canais ópticos. O mesmo pode ser observado pela figura 4.14.

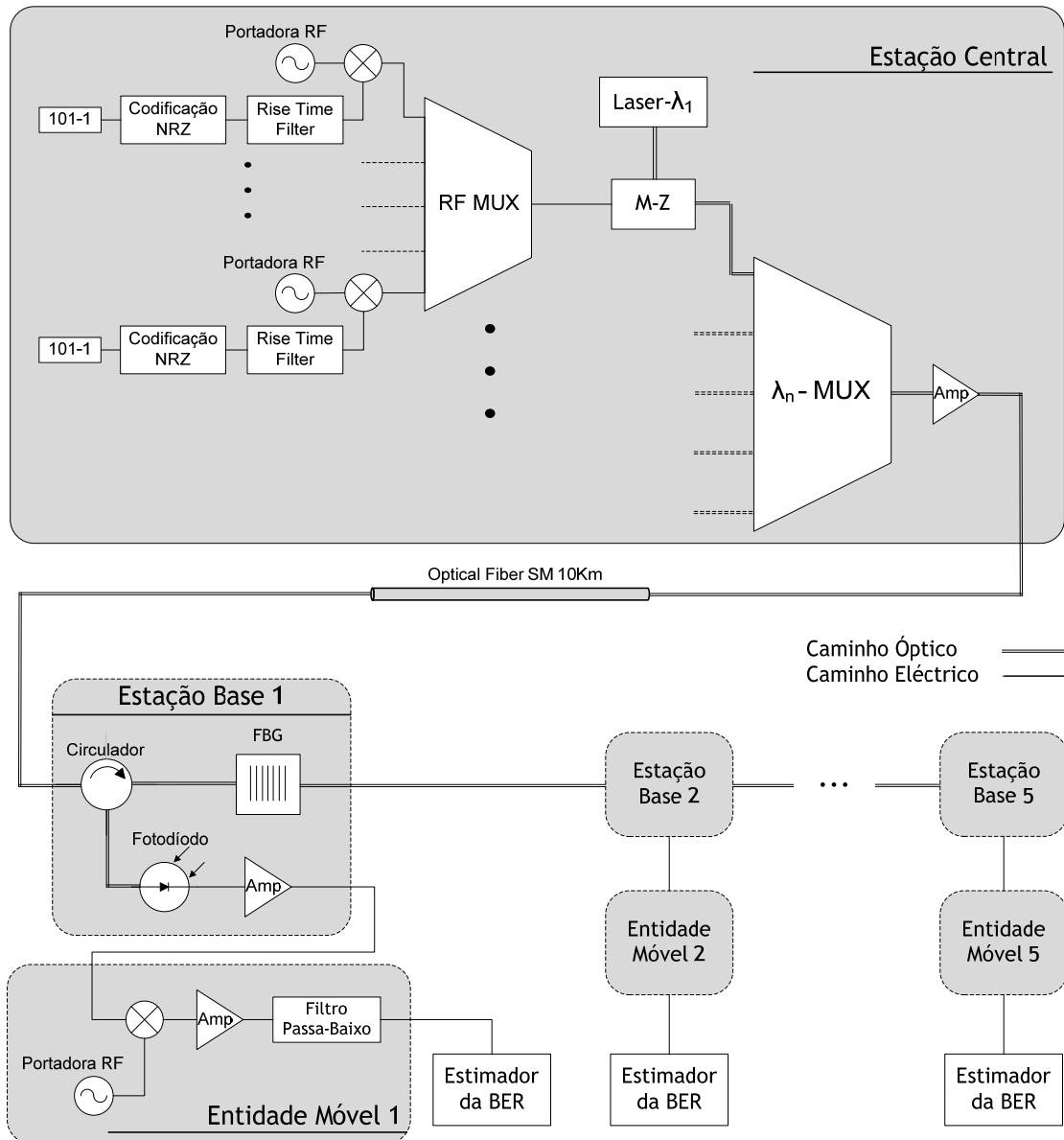


Figura 4.14 - Configuração do sistema rádio sobre fibra na ligação descendente.

Em cada BS é realizada a filtragem do canal óptico correspondente, isto é, a FBG encontra-se sintonizada de forma distinta em cada BS, deste modo, apenas irá reflectir o sinal pretendido, sendo que o restante sinal segue para a próxima estação base. Poderá ser visto nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17, o sinal que chega à BS_3 (é o sinal transmitido pela FBG da BS_2), o sinal reflectido pela BS_3 e o sinal transmitido para a BS seguinte, sucessivamente.

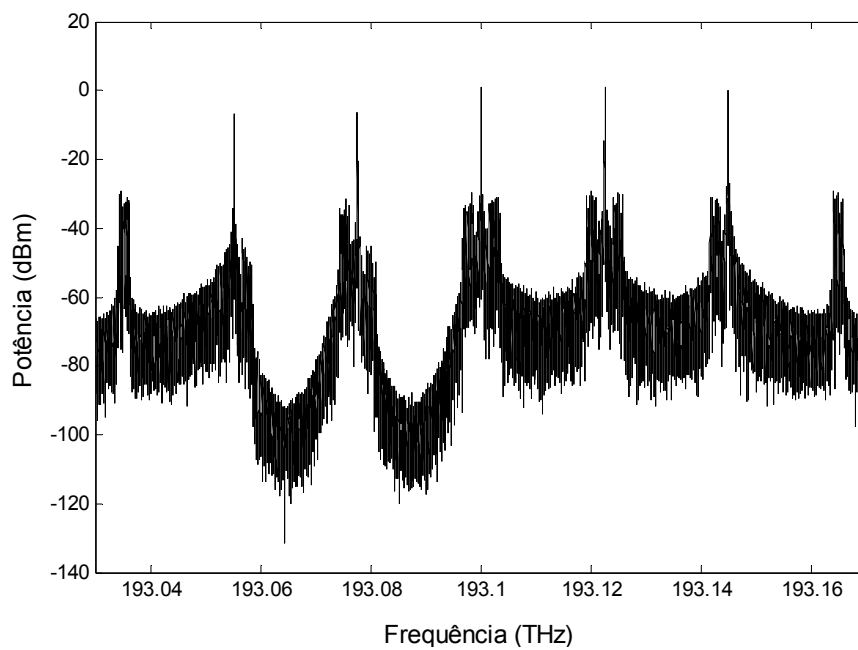


Figura 4.15 - Espectro óptico do sinal transmitido pela rede de Bragg da BS₂.

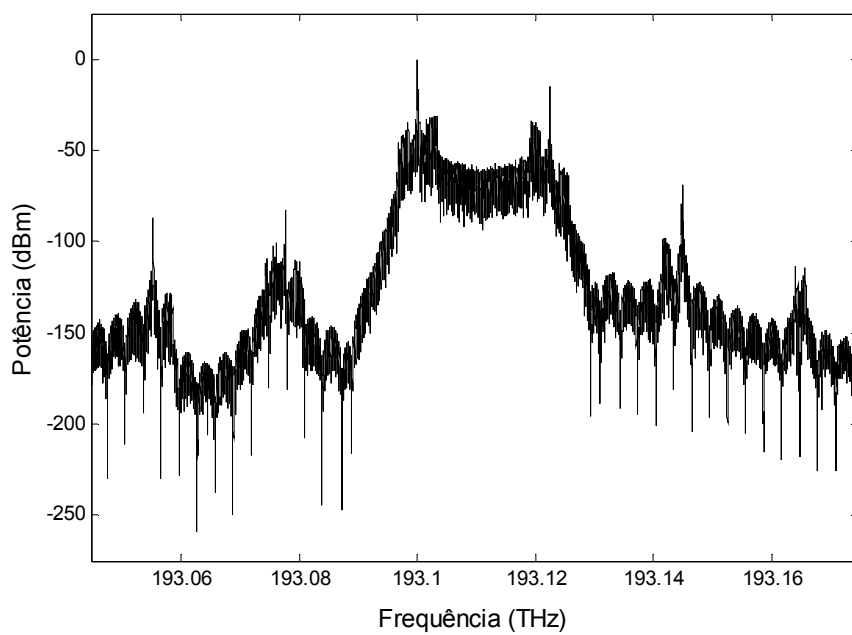


Figura 4.16 - Espectro óptico do sinal reflectido pela rede de Bragg da BS₃.

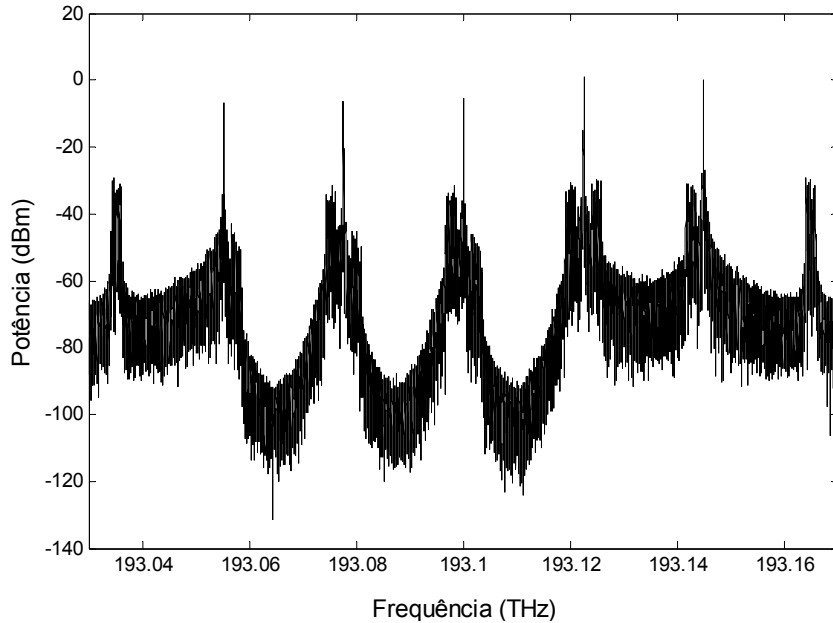


Figura 4.17 - Espectro óptico do sinal transmitido pela rede de Bragg da BS₃.

De forma a se poder concluir algo mais concreto, esta simulação foi realizado para o pior caso, isto é, considerou-se a desmodulação em cada canal óptico da quinta sub-portadora RF, assim como o espaçamento mínimo admissível entre canais ópticos obtido anteriormente, que foi de 22.4 GHz para o laser de largura espectral de 10 MHz.

Obteve-se portanto os seguintes resultados de taxas de erros para os respectivos canais ópticos, nas condições já referidas. Verifica-se que a BER para o quarto canal é superior aos restantes mas ainda assim corresponde aos requisitos mínimos do sistema.

Tabela 4.2- Taxa de erros obtida na desmodulação da 5ª sub-portadora RF, em função do canal óptico filtrado.

Canal Óptico	BER
1	3.8×10^{-13}
2	4.6×10^{-15}
3	1.3×10^{-73}
4	1.0×10^{-9}
5	$< 1.0 \times 10^{-300}$

4.6- Conclusão

Neste capítulo, estabeleceram-se vários esquemas de simulação com intuito de averiguar a validade dos pressupostos teóricos estudados anteriormente.

Foram concebidas várias simulações, características da ligação descendente dos sistemas RoF. Nelas, vários aspectos foram averiguados, como o perfil espectral da rede de Bragg utilizada, a optimização do espaçamento entre canais ópticos, sendo ainda concretizada a

ligação descendente de um sistema rádio sobre fibra com topologia de rede em anel, albergando cinco estações base.

Para este estudo, foram gerados sinais BPSK com taxas de transmissão de 156.25 Mbits/s, sendo adoptada um esquema de multiplexagem SCM/WDM com entrelaçamento. Consideraram-se cinco portadoras ópticas que foram moduladas, cada uma, por um conjunto de cinco sub-portadoras RF.

Na caracterização dos resultados obtidos, foram obtidas as taxas de erros para cada simulação, obtendo-se valores inferiores a 10^{-9} . Comparando estes resultados com resultados anteriores obtidos em [37] usando uma modulação PSK verifica-se que BPSK é uma modulação que permite aproveitar mais eficientemente o entrelaçamento entre canais.

Terminando assim o penúltimo capítulo deste trabalho de dissertação, segue-se agora o capítulo “Conclusões”, onde se apontam as principais conclusões que se podem retirar de todo o estudo realizado.

Capítulo 5

Conclusões

Ao longo deste trabalho de dissertação, procurou-se analisar, compreender e reflectir sobre o actual valor dos sistemas rádio sobre fibra e tecnologias que os suportam. Foi dada especial atenção ao estudo da sua constituição em termos de arquitectura, topologias e das suas principais estruturas, estação central e estação base. Apresentaram-se também as vantagens e limitações dos sistemas RoF.

Do ponto de vista da tecnologia utilizada nestes sistemas, verificou-se a existência de um vasto leque de opções, ao nível de métodos e técnicas que poderão ser utilizadas para otimizar o funcionamento das redes rádio sobre fibra.

Estabeleceu-se um mapa de técnicas para geração de sinais RF e microondas assim como para imposição de modulação.

Atribuiu-se especial importância às técnicas de multiplexagem para optimização da eficiência espectral, sendo testada em termos de simulação a técnica SCM/WDM com entrelaçamento.

Foi também proposto um novo esquema de entrelaçamento baseado em sinais SSB, que apenas introduzindo um pouco mais de complexidade do lado da estação central, poderá ser compensado pela optimização espectral conseguida.

Demonstrou-se teoricamente que a técnica de filtragem SSB permite compensar a dispersão, comparativamente à utilização de sinais DSB.

Analisaram-se os vários tipos de redes de Bragg, nomeadamente a sua estrutura, comportamento e princípio de funcionamento, ilustrando algumas figuras com a resposta espectral das mesmas.

Verificou-se que as redes de Bragg com índice de refração negativo, desempenham um papel importante nestes sistemas, uma vez que permitem realizar a tarefa de desmultiplexagem e simultaneamente a compensação da dispersão para pequenas larguras de banda. Contudo, estas não foram utilizadas na simulação para efeitos de compensação da dispersão, uma vez que para esse efeito se optou por utilizar filtragem SSB, sendo aquelas apenas utilizadas na filtragem do canal óptico.

Nas simulações concebidas, foi procurado tomar conhecimento do desempenho dos sistemas RoF sob várias condições. Foram realizadas várias simulações que demonstram a potencialidade e desempenho da técnica de multiplexagem SCM/WDM, utilizando filtragem SSB para compensação da dispersão e redes de Bragg para selecção de comprimentos de onda, obtendo taxas de erros inferiores a 10^{-9} .

Procurou-se obter ainda o valor mínimo do espaçamento entre canais ópticos, que nas condições especificadas, permitissem recuperar o sinal original ainda com uma taxa de erros inferior a 10^{-9} . Auferiu-se que o espaçamento mínimo, que ainda garante essa mesma taxa de erros, nas condições especificadas era de 22.4 GHz, basicamente é necessária uma distância mínima de 1.6 GHz de espaçamento entre as sub-portadora RF e a portadora óptica. Por comparação com resultados publicados anteriormente verificou-se que a modulação BPSK usada é mais adequada para explorar a técnica de entrelaçamento entre canais em sistemas WDM rádio sobre fibra.

Adoptando esse espaçamento mínimo entre portadoras ópticas, concebeu-se a ligação descendente de um sistema rádio sobre fibra com topologia em anel utilizando cinco estações base, e desmodulando a última sub-portadora RF, que correspondente ao pior caso em cada estação base, conseguindo-se obter taxas de erros ainda inferiores a 10^{-9} .

Deixam-se agora algumas sugestões para trabalho futuro no âmbito dos sistemas rádio sobre fibra:

- Realização de testes experimentais das várias simulações aqui expostas;
- Teste e análise do novo esquema de entrelaçamento proposto, baseado em sinais SSB;
- Desenvolvimentos de novas técnicas de otimização da eficiência espectral poderão ser adoptadas, sendo necessário averiguar o seu desempenho;
- Os sistemas rádio sobre fibra poderão vir a ser uma mais valia para os actuais sistemas de comunicações, contudo é necessários mais avanços, mais maturidade para que se tornem fiáveis e credíveis no mercados. Vários cenários de sinalização, para além de BPSK, DPSK, entre outros, ainda não foram testados ou necessitam de mais abordagens, mais opções. Este poderá ser mais um caminho a percorrer.

Referências

- [1] X. Fernando, Pinter S., “Radio over Fiber for Broadband Wireless Access”, ADROIT Group Ryerson University of Toronto, Canada.
- [2] K. Hong, *Radio over Fiber based Network Architecture*, Philosophy Doctor Degree, Technical University of Berlin, Berlin, 2005, pp. v-vi.
- [3] K. Hong, *Radio over Fiber based Network Architecture*, Philosophy Doctor Degree, Technical University of Berlin, Berlin, 2005, pp. 22-23.
- [4] H. Toda et al, “Kitayama K. Demultiplexing Using an Arrayed-Waveguide Grating for Frequency-Interleaved DWDM Millimeter-Wave Radio-on-Fiber Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 8, pp. 1735-1741, Aug. 2003.
- [5] H. Salgado, *Apontamentos da disciplina de Comunicações Ópticas 2007/2008*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [6] H. Salgado, *Disciplina Preparação da Dissertação*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [7] K. Hong, *Radio over Fiber based Network Architecture*, Philosophy Doctor Degree, Technical University of Berlin, Berlin, 2005, p. 1.
- [8] U. Gliese et al. “Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimetre-wave links”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 44, pp. 1716-1724, 1996.
- [9] G. H. Smith et al., “Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 45, pp. 1410-1415, Aug. 1997.
- [10] H. Sotobayashi and K. Kitayama, “Cancellation of signal fading for 60 GHz subcarrier multiplexed optical DSB signal transmission in non-dispersion-shifted fiber using midway optical phase conjugation”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, pp. 2488-2497, Dec. 1999.
- [11] J. Marti et al., “Experimental reduction of chromatic dispersion effects in lightwave microwave/millimetre-wave transmissions using tapered linearly chirped fibre gratings” *Electronic Letters*, vol. 33, pp. 1170-1171, June 1997.
- [12] K. Kitayama, “Fading-free transport of 60GHz-optical DSB signal in non-dispersion shifted fiber using chirped fiber grating,” *Proc. IEEE MWP*, pp. 223-226, Oct. 1998.
- [13] J. Park et al., “Elimination of the fibre chromatic dispersion penalty on 1550nm millimetre-wave optical transmission” *Electronic Letters*, vol. 33, pp. 512-513, Mar. 1997.

- [14] A. Kaszubowska et al., "Multifunctional operation of a fiber Bragg grating in a WDM/SCM radio over fiber distribution system" *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, pp. 605-607, Feb. 2004.
- [15] J. Capmany et al., "Multiwavelength single sideband modulation for WDM radio-over-fiber systems using a fiber grating array tandem device", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, pp. 471-473, Feb. 2005.
- [16] C. Marra et al., "Optical SSB modulation using fiber Bragg gratings and the impact of grating dispersion on transmission performance", *Proc. IEEE MWP*, pp. 93-96, Jan. 2002.
- [17] K. Kitayama et al., "Dispersion effects of FBG filter and optical SSB filtering in DWDM millimetre-wave fiber-radio systems", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, pp. 1397-1407, Aug. 2002.
- [18] D. Castleford et al., "Optical crosstalk in fiber-radio WDM networks," *IEEE Trans. Microwave Theory Technology*, vol. 49, pp. 2030-2035, Oct. 2001.
- [19] A. Teixeira et al., "Filter optimization for wavelength interleaved radio-over-fiber systems", *Proc. SBMO/IEEE Microwave and Optoelectronics Conference*, vol. 2, pp. 991-993, Sep. 2003.
- [20] C. Marra et al., "FBG-based optical interface to support a multisector antenna in a spectrally efficient fiber radio system," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, pp. 254-256, Jan. 2004.
- [21] M. Lima et al., "Redes de Bragg para Telecomunicações", Universidade de Aveiro, Aveiro, 2001.
- [22] G. H. Smith et al., "A millimetre-wave full-duplex fiber-radio star-tree architecture incorporating WDM and SCM", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, pp. 1650-1652, Nov. 1998.
- [23] M. R. D. Rodrigues and J. J. O'Reilly, "An analytic technique to assess the impact of non-linearities on the error probability of OFDM signals in RoF based wireless networks", *Proc. IEEE ISIT*, p. 316, June 2001.
- [24] J. Attard et al., "Fibre Supported onda-mm Radio Networks - An Enabling Role for Re-configurable Broadband Wireless Networks", 2005.
- [25] C. Duijn, *Radio over Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems*, Doctor of Technology Degree, University Eindhoven, Netherlands, 2005, p. 6.
- [26] C. Duijn, *Radio over Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems*, Doctor of Technology Degree, University Eindhoven, Netherlands, pp. 8-11, 2005.
- [27] H. Salgado *Apontamentos da disciplina de Comunicações Ópticas 2007/2008*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007/2008.
- [28] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, 2000, pp. 103-104.
- [29] A. Costa, *Apontamentos da disciplina de Comunicações Ópticas 2002/2003*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003.
- [30] K. Hong, *Radio over Fiber based Network Architecture*, Philosophy Doctor Degree, Technical University of Berlin, Berlin, 2005, p. 2.
- [31] E. Turan, "Fiber Grating Spectra", *Journal of Lightwave Technology*. pp. 1277 - 1294.
- [32] F. Ouellette, "Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides", *Optics Letters*, Vol. 12, 1987, pp. 847-849.
- [33] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, 1999, pp. 119-156.
- [34] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, 1999, pp. 195-226.

- [35] Teixeira A. et al., "Optimization of apodized fiber grating filters for WDM systems", in *Proc. of LEOS' 99 - 12th IEEE LEOS Annual Meeting*, paper ThZ2, pp. 876-877, San Francisco, USA, 1999.
- [36] A. Teixeira, J. Rocha, "Simultaneous filtering and dispersion compensation in WDM systems using apodised fibre gratings", *Electronics Letters*, Vol. 36, 2000, pp. 1412-1414.
- [37] A. Kaszubowska et al., "Characterization of wavelength interleaving in radio-over fiber systems employing WDM/SCM", *ScienceDirect Optics Communications*, Volume 260, 2006, pp. 144-149.
- [38] Commsplace.com Knowledge Base. Disponível em http://www.commsplace.com/Knowledge/ITcs/html/tutorials/fibre_optics/introduction_fibre_optics.htm. Acesso em 20 de Junho de 2008.