
Agradecimentos

A presente dissertação representa o culminar de todo um percurso académico.

Gostaria agradecer a todos aqueles que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para a finalização do trabalho apresentado, em especial:

À Professora Doutora Paula Louro Antunes, professora orientadora, por me ter proporcionado a realização desta dissertação, pela sua confiança e disponibilidade para esclarecer dúvidas, revisão da dissertação, assim como pela sua competente direcção e perspicácia na superação dos diversos obstáculos que surgiram.

A todos os meus colegas, tanto do ISEL como de trabalho, pela sabedoria e conhecimentos transmitidos, sem os quais não poderia chegar a esta fase.

Aos meus pais, por me inculcarem a importância do estudo e por me terem proporcionado todas as condições para eu chegar até aqui.

À minha namorada pelo apoio constante, carinho, encorajamento e força para continuar.

A todos, muito obrigado!

Resumo

Este trabalho utiliza uma estrutura *pin* empilhada, baseada numa liga de siliceto de carbono amorfo hidrogenado (a-Si:H e/ou a-SiC:H), que funciona como filtro óptico na zona visível do espectro electromagnético. Pretende-se utilizar este dispositivo para realizar a demultiplexagem de sinais ópticos e desenvolver um algoritmo que permita fazer o reconhecimento autónomo do sinal transmitido em cada canal.

O objectivo desta tese visa implementar um algoritmo que permita o reconhecimento autónomo da informação transmitida por cada canal através da leitura da fotocorrente fornecida pelo dispositivo. O tema deste trabalho resulta das conclusões de trabalhos anteriores, em que este dispositivo e outros de configuração idêntica foram analisados, de forma a explorar a sua utilização na implementação da tecnologia WDM.

Neste trabalho foram utilizados três canais de transmissão (Azul – 470 nm, Verde – 525 nm e Vermelho – 626 nm) e vários tipos de radiação de fundo. Foram realizadas medidas da resposta espectral e da resposta temporal da fotocorrente do dispositivo, em diferentes condições experimentais. Variou-se o comprimento de onda do canal e o comprimento de onda do fundo aplicado, mantendo-se constante a intensidade do canal e a frequência de transmissão.

Os resultados obtidos permitiram aferir sobre a influência da presença da radiação de fundo e da tensão aplicada ao dispositivo, usando diferentes sequências de dados transmitidos nos vários canais. Verificou-se, que sob polarização inversa, a radiação de fundo vermelho amplifica os valores de fotocorrente do canal azul e a radiação de fundo azul amplifica o canal vermelho e verde. Para polarização directa, apenas a radiação de fundo azul amplifica os valores de fotocorrente do canal vermelho. Enquanto para ambas as polarizações, a radiação de fundo verde, não tem uma grande influência nos restantes canais.

Foram implementados dois algoritmos para proceder ao reconhecimento da informação de cada canal. Na primeira abordagem usou-se a informação contida nas medidas de fotocorrente geradas pelo dispositivo sob polarização inversa e directa. Pela comparação das duas medidas desenvolveu-se e testou-se um algoritmo que permite o reconhecimento dos canais individuais.

Numa segunda abordagem procedeu-se ao reconhecimento da informação de cada canal mas com aplicação de radiação de fundo, tendo-se usado a informação contida nas medidas de fotocorrente geradas pelo dispositivo sob polarização inversa sem aplicação de radiação de fundo com a informação contida nas medidas de fotocorrente geradas pelo dispositivo sob polarização

inversa com aplicação de radiação de fundo. Pela comparação destas duas medidas desenvolveu-se e testou-se o segundo algoritmo que permite o reconhecimento dos canais individuais com base na aplicação de radiação de fundo.

Palavras-chave: Optoelectrónica, dispositivos semicondutores, multiplexagem/ demultiplexagem óptica.

Abstract

This thesis uses an stacked *pin* structure, based on hydrogenated amorphous carbon silicide alloys (a-Si:H and/or a-SiC:H), working as a optical filter in the visible zone of the electromagnetic spectrum. It is intended to use these devices to perform demuxing of optical signals and develop an algorithm that will allow the recognition independent of the transmitted signal on each channel.

The goal of this thesis is to implement an algorithm that allows the autonomous recognition of information transmitted by each channel by reading the photocurrent signal supplied by the device. The theme of this paper result of the findings of previous work, in which this device and other with identical configuration were analyzed, in order to explore their use on the implementation of WDM technology.

In this thesis we used three transmission channels (Blue– 470 nm, Green– 525 nm and Red– 626 nm) and several types of background radiation. Were measured spectral response and temporal response of the photocurrent of the device under different experimental conditions. The wavelength of the channel and the wavelength of the applied background has been varied, keeping constant the channel intensity and transmission frequency.

The results allowed to assess the influence of the presence of background radiation and the voltage applied to the device, using different data streams transmitted in several channels. It was found that under reverse polarization, the red background radiation amplifies the photocurrent values of the blue channel and the blue background radiation amplifies the red and green channels. For direct polarization, only the blue background polarization amplifies the photocurrent values of the red channel. For both polarizations, the green background polarization didn't have too much influence on the remaining channels.

Two algorithms were implemented to allow the recognition of the information of each channel. In the first approach we used the information contained in the photocurrent measurements generated by the device under direct and reversed polarization. By comparing two measures, an algorithm was developed and tested, allowing the recognition of individual channels. In a second approach, the recognition of the information in each channel has been made, but in this case applying a background radiation, having been used the information contained in the measures of the photocurrent generated by the device under reversed polarization with background radiation. By the comparison of these two measures, the second algorithm has been developed and tested, allowing the recognition of individual channels with based on the application of background radiation.

Keywords: Optoelectronics, semiconductor devices, optical multiplexing / demultiplexing.

Índice

Introdução	1
Enquadramento.....	2
Estrutura da Dissertação.....	4
Referências.....	5
Cap. 1 - Tecnologia WDM.....	7
1.1 - Introdução	7
1.2 - Princípios do WDM.....	11
1.3 - Características do WDM.....	12
1.4 - Dispositivos Multiplexer e Demultiplexer convencionais	13
1.4.1 - Dispositivos Multiplexer.....	14
i. Add/Drop-Multiplexer	14
1.4.2 - Dispositivos Demultiplexer.....	15
i. Prisma.....	15
ii. Grelha de Difracção	16
iii. <i>Arrayed Waveguide Grating</i> (AWG).....	17
iv. <i>Fiber Bragg Grating</i> (FBG).....	17
v. <i>Filtros Dielétricos (Filtros de interferência de múltiplas camadas)</i>	19
1.5 - Dispositivo WDM semiconductor.....	21
1.6 - Referências.....	40
Cap. 2 - Caracterização Optoelectrónica.....	41
2.1 - Demultiplexagem do sinal de fotocorrente	43
2.1.1 - Estudo dos canais R & G & B com e sem polarização óptica.....	44
2.1.2 - Estudo do Canal Azul (B).....	45
2.1.3 - Estudo do Canal Vermelho (R).....	48
2.1.4 - Estudo do Canal Verde (G)	50
2.1.5 - Estudo dos Canais combinados R&G&B.....	53
2.2 - Referências.....	58
Cap. 3 - Reconhecimento dos Canais.....	59
3.1 - Desenvolvimento do Algoritmo	59
3.2 - Caracterização dos Patamares da Fotocorrente	60
3.2.1 - Normalização dos Dados.....	60
3.2.2 - Cálculo da Duração do Bit	61
3.2.3 - Início do Bit.....	62
3.2.4 - Seleccionar os 8 Bits.....	64
3.2.5 - Moda mais intervalos	65

3.2.6 - Comparação dos valores da moda com base nos valores obtidos das simulações em laboratório. 68	
3.3 - Descrição do algoritmo - Sem aplicação de radiação de fundo.....	73
3.4 - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Vermelho.....	75
3.5 - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Verde.....	80
3.6 - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Azul.....	85
Cap. 4 - Funcionamento do Simulador	90
Cap. 5 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	96
Anexos - Paper publicado no CETC_2011	99
Anexo I - Descrição do algoritmo - Sem aplicação de radiação de fundo.	100
Anexo II - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Vermelho.	100
Anexo III - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Verde.....	100
Anexo IV - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Azul.....	100

Lista de Figuras

Figura 1 - Instalação de fibra óptica: a)Abertura de valas para tubagem; b)Passagem de tubagem e tamponamento da vala; c)Passagem e instalação da fibra óptica.	7
Figura 2 - Princípio de funcionamento do TDM.	8
Figura 3 - Princípio de funcionamento do WDM.	9
Figura 4 - Princípio de funcionamento do DWDM.	9
Figura 5 - Princípio de funcionamento do CWDM.....	10
Figura 6 - Princípio de funcionamento do WDM.	11
Figura 7 - Operação de multiplexação e demultiplexação.	14
Figura 8 - Multiplexador Óptico <i>Add/Drop</i> (OADM).	14
Figura 9 - Multiplexação através de um prisma.	15
Figura 10 - Demultiplexação através de um prisma.	15
Figura 11 - Esquema de uma Grelha de Difrração: a)Multiplexação; b)Demultiplexação.....	16
Figura 12 - Demultiplexação através de AWG.....	17
Figura 13 - Esquema de da constituição e resposta espectral de um <i>Fiber Bragg Grating</i>	18
Figura 14 - a)Estrutura da FBG variando o índice de refração; b)Resposta espectral do perfil do índice de refração.....	18
Figura 15 - Esquema de um <i>Optical Add-Drop Multiplexer</i> (OADM).....	19
Figura 16 - Esquema de um <i>Filtro Dielétrico</i>	20
Figura 17 - Dispositivo WDM a-SiC:H: a)Recombinação de perfis (linhas retas), sob vermelho ($\lambda_R = 650$ nm) verde ($\lambda_G = 550$ nm) e azul ($\lambda_B = 450$ nm) com aplicação de polarização óptica e a diferentes tensões aplicadas	

(6V<V<+1V); b)Configuração do dispositivo.	22
Figura 18 - Configuração do dispositivo WDM a)Modo de multiplexação b)Modo de demultiplexação.....	22
Figura 19 - Resposta espectral da fotocorrente: a)Diferentes tensões aplicadas e a uma frequência de 2000 Hz;	
b)Aplicação de uma tensão -5V com diferentes frequências.....	23
Figura 20 - a)Resposta espectral com aplicação de diferentes valores de polarização; b)Características da	
fotocorrente-tensão do dispositivo NC12 para diversos comprimentos de onda.....	25
Figura 21 - Variação da fotocorrente aplicada sob diferentes polarizações; (a, c)A sua tendência com a tensão	
aplicada, em diferentes comprimentos de onda; (b, d) Resposta do fotodíodo frontal, p-i '(a-SiC:H)-n, e	
fotodíodo posterior, pi (a-Si:H)-n.	27
Figura 22 – Leitura dos sinais multiplexados com diferentes tensões aplicadas e comprimentos de onda de	
entrada R&B ($\lambda_{R,B}$ =650nm, 450 nm); a) Com frequência de 1.5 kHz para o canal vermelho e 750 Hz para o	
canal azul; b)Combinação dos comprimentos de onda R&G&B ($\lambda_{R,G,B}$ =650 nm, 550 nm, 450 nm);	
c)Dependência do comprimento de onda do canal de entrada com a tensão aplicada.	28
Figura 23 - Multiplexação por divisão de comprimento de onda (linhas sólidas) em diferentes tensões	
aplicadas, obtidas usando o dispositivo WDM; a)Em regime de alta frequência. O azul (linha tracejada azul) e	
o vermelho (linha tracejada vermelha) guia os olhos para os canais de entrada; b)Em regime de baixa	
frequência.....	30
Figura 24 – Representação dos sinais multiplexados, obtidos sob polarização inversa (seta contínua) e directa	
(seta tracejada) sob diferentes polarizações óptica (R&G&B).....	31
Figura 25 – Representação dos sinais multiplexados sob polarização inversa e directa usando as sequências:	
a)R [00111100], G [01010010], B [00110011]; b)R [01111100], G [01010010], B [01010010].	32
Figura 26 - Multiplexação por divisão de comprimento de onda (linhas contínuas) a - 5 V sob diferentes	
valores da frequência de modulação.	33
Figura 27 - Variação da fotocorrente com a polarização óptica medida para cada canal óptico (R: 626 nm, G:	
524 nm e B: 470 nm) a -8 V (símbolos sólidos) e + 1V (símbolos abertos). As linhas sólidas correspondem a	
acessos lineares dos dados experimentais.	34
Figura 28 - Fotocorrente espectral sob polarização inversa e directa, aplicando as radiações ópticas fundo	
a)vermelho, b)verde, c)azul e d) sem aplicação de radiação de fundo.....	36
Figura 29 - Fotocorrente Espectral a uma frequência de 600 Hz; a)sob polarização inversa com e sem aplicação	
de radiação de fundo; b)sob polarização directa, com e sem aplicação de radiação de fundo.	36
Figura 30 – Razão entre a fotocorrente com e sem aplicação de radiação de fundo.....	37
Figura 31 - Comparação dos canais sob polarização inversa e directa com aplicação de várias radiações de	
fundo; a)Radiação de fundo vermelho; b)Radiação de fundo verde e c)Radiação de fundo azul.	38
Figura 32 - Sinais multiplexados a -8V / +1 V, com e sem polarização óptica dos canais RGB.	39
Figura 33 - Diagrama da secção transversa da estrutura NC5.....	42
Figura 34 - Diagrama da montagem para caracterizar o dispositivo.....	43
Figura 35 - Fotocorrente do canal azul com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.	45

Figura 36 - Fotocorrente do canal azul com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.....	46
Figura 37 - Fotocorrente do canal azul com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.....	46
Figura 38 - Fotocorrente do canal azul com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.....	47
Figura 39 - Fotocorrente do canal vermelho com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.....	48
Figura 40 - Fotocorrente do canal vermelho com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.....	48
Figura 41- Fotocorrente do canal vermelho com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.....	49
Figura 42- Fotocorrente do canal vermelho com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.....	50
Figura 43 - Fotocorrente do canal verde com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.....	50
Figura 44 - Fotocorrente do canal verde com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.....	51
Figura 45 - Fotocorrente do canal verde com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.....	52
Figura 46 - Fotocorrente do canal verde com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.....	52
Figura 47 - Fotocorrente dos canais combinados R&G&B sem radiação de fundo.....	53
Figura 48 - Fotocorrente dos canais R&G&B para uma tensão a -8V, considerando: a)fundo vermelho; b)fundo verde e c)fundo azul.....	55
Figura 49 - Fotocorrente dos canais R&G&B para uma tensão a +1V, considerando: a)fundo vermelho; b)fundo vermelho e c)fundo azul.....	57
Figura 50 – Representação da onda sinoidal, mostrando o seu ciclo, frequência e período de duração de um ciclo.....	61
Figura 51 – Sequência RGB com apresentação das 2500 amostras (dois períodos).....	62
Figura 52 - Apresentação da derivada dos valores da fotocorrente, com aplicação tensão inversa e sem fundo.....	63
Figura 53 – Comparação do sinal da fotocorrente com os valores da derivada.....	63
Figura 54 - Sequência RGB com apresentação da selecção dos 8 Bits.....	64
Figura 55 - Sequência RGB com aplicação de filtro para serem apresentadas apenas os 8 Bits pretendidos.....	64
Figura 56 - Sequência RGB com 160 amostras analisar por Bit.....	65
Figura 57 - Sequência RGB com 50 amostras analisar por Bit.....	66
Figura 58 - Representação dos agrupamentos dos vários níveis para a polarização inversa e directa.....	68

Figura 59 - Gráfico com apresentação da margem de erro.....	69
Figura 60 - Sem aplicação de radiação de fundo; a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.....	70
Figura 61 – Sem aplicação de radiação de fundo; a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.....	71
Figura 62 – Sequência RGB analisada pelo algoritmo sem aplicação de radiação de fundo.	73
Figura 63 – Aplicação de radiação de fundo vermelho a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.	75
Figura 64 – a) Aplicação de radiação de fundo vermelho a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.	76
Figura 65 - Sequência RGB analisada pelo algoritmo com aplicação radiação de fundo vermelho.....	78
Figura 66 – Aplicação de radiação de fundo verde a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.	80
Figura 67 – Aplicação de radiação de fundo verde a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.	81
Figura 68 - Sequência RGB analisada pelo algoritmo com aplicação radiação de fundo verde.	83
Figura 69 – Aplicação de radiação de fundo azul a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.	85
Figura 70 - Aplicação de radiação de fundo azul a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.	86
Figura 71 – Sequência RGB analisada pelo algoritmo com aplicação radiação de fundo azul.....	88
Figura 72 – Menu do simulador.....	90
Figura 73 – Seleccionar o ficheiro que o utilizador pretende analisar no simulador.	91
Figura 74 – Seleccionar o ficheiro com as medições analisar pelo algoritmo.....	91
Figura 75 – Copiar os dados do ficheiro seleccionado para o simulador.....	92
Figura 76 – Análise dos dados sem aplicação da polarização óptica.....	92
Figura 77 – Análise dos dados com aplicação da polarização óptica do canal Vermelho.	93
Figura 78 – Análise dos dados com aplicação da polarização óptica do canal Verde.	93
Figura 79 – Análise dos dados com aplicação da polarização óptica do canal Azul.	94
Figura 80 – Visualização da sequência binária INPUT de cada canal de transmissão obtida pelo algoritmo.	94
Figura 81 – Validação da sequência binária obtida pelo algoritmo com a sequência binária original.	95
Figura 82 – Análise dos dados com a possibilidade de Exportar Dados.....	95

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Ficheiro Excel com a normalização dos dados.	60
Tabela 2 - Tabela onde é calculada a MODA dos intervalos de cada nível.	66
Tabela 3 - Tabela com a variação dos intervalos da fotocorrente das 8 sequências Bits possíveis.	69
Tabela 4 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.	70
Tabela 5 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.	71
Tabela 6 - Tabela com os intervalos dos vários níveis, Sem aplicação de fundo.	72
Tabela 7 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.	74
Tabela 8 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo vermelho.	76
Tabela 9 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo vermelho.	77
Tabela 10 - Tabela com os intervalos dos vários patamares, Com aplicação de fundo Vermelho.	77
Tabela 11 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados. ...	78
Tabela 12 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo verde.	81
Tabela 13 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados. ...	82
Tabela 14 - Tabela com os intervalos dos vários níveis, Com aplicação de radiação de fundo Verde.	82
Tabela 15 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo verde.	83
Tabela 16 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo azul.	86
Tabela 17 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados. ...	87
Tabela 18 - Tabela com os intervalos dos vários níveis, Com aplicação de fundo azul.	87
Tabela 19 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação de radiação de fundo azul.	88

Lista de acrónimos e termos:

Acrónimo / termo	Designação
APD	Avalanche PhotoDiode
a-Si:H	Silício Amorfo Hidrogenado
a-SiC:H	Siliceto de Carbono Amorfo Hidrogenado
AWG	Arrayed Waveguide Grating
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DEMUX	Demultiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FBG	Fiber Bragg Grating
HDTV	High-Definition Television
IP	Internet Protocol
IP-TV	Internet Protocol Television
ITO	Indium Tin Oxide
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light Emitting Diodes
MUX	Multiplexer
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PIN	Positive-Intrinsic-Negative
POF	Plastic Optical Fiber ou Polymeric Optical Fiber
RGB	Red, Green, and Blue
TDM	Time-Division Multiplexing
VOIP	Voice Over Internet Protocol
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
WWDM	Wide Wavelength Division Multiplexing

Introdução

A evolução das tecnologias de comunicação, juntamente com a melhoria das infra-estruturas de redes tornou viável o aparecimento de diversos serviços que à pouco tempo estavam longe da nossa realidade como transmissões multimédia, onde se integram dados/voz/vídeo num único meio físico de transmissão de dados, HDTV (High Definition Television), streaming vídeo, VoD (Video on Demand), transmissão de voz utilizando a internet (VoIP), vídeo-conferência, de entre outros.

Todos estes serviços requerem uma largura de banda cada vez maior, a qual deve estar disponível não apenas para um utilizador, mas para milhares.

A utilização das fibras ópticas como meio de transmissão de dados foi um grande passo no processo de modernização dos sistemas de comunicação como um todo, devido ao facto de apresentarem um desempenho bastante superior em termos de taxas de transmissão de dados face aos sistemas tradicionais de cabos de cobre.

As fibras ópticas apresentam inúmeras vantagens, como, por exemplo, imunidade a ruídos externos, interferência electromagnética, baixa perda de propagação e baixos valores de dispersão. Para além disso, o facto de serem mais flexíveis na instalação, de terem um custo mais baixo, serem de fácil manuseamento e de se poderem facilmente ligar umas às outras, são normalmente usadas em comunicações entre edifícios, em aplicações na indústria automóvel, redes domésticas, controlo de tráfego, etc[1, 5].

Existem vários tipos de fibra óptica, as monomodais e as multimodais, em que ambas apresentam o seu núcleo e bainha em sílica e transmitem na gama espectral do infravermelho. Existe ainda uma variação das fibras multimodais, construída à base de polímeros/acrílicos (POF – *Polymer Optical Fiber*) que, apesar de ter um desempenho inferior à fibra de sílica (vidro), pode transmitir 1Gbps a uma distância até 100 m[5].

Para se obter uma melhor rentabilização do canal de transmissão do sinal, aumentando a capacidade de transmissão e permitindo a comunicação bidireccional, é possível recorrer a técnicas de multiplexagem, as quais permitem inserir numa só fibra óptica diversos sinais ópticos com diferentes comprimentos de onda. Naturalmente, no lado do receptor será necessário proceder-se à separação e recuperação dos sinais, utilizando dispositivos de demultiplexagem óptica, que separam os comprimentos de onda transportados e os disponibilizam aos receptores ópticos do sistema.

Neste trabalho a técnica de multiplexagem que irá ser abordada é a WDM (*Wavelength-Division-Multiplexing*), que é uma tecnologia de multiplexação por divisão de comprimentos de onda, que permite aumentar a capacidade da fibra já implantada, além de tornar possível a integração entre a actual e a próxima geração de tecnologias [2, 3].

Enquadramento

Neste trabalho foi utilizado como dispositivo demultiplexer uma estrutura semicondutora baseada em fotodíodos *pin* de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H e/ou a-SiC:H), que funciona como filtro de cor na região do visível, ou seja entre os 400 e os 700 nm. Ficou demonstrado, em trabalhos anteriores [4, 6, 7], que é possível multiplexar/demultiplexar sinais visíveis através da medida da fotocorrente gerada por este dispositivo. A caracterização do processo de WDM na região do visível, tem em vista, a utilização de vários canais para a transmissão de sinais a curta distância. O facto desta estrutura semicondutora funcionar como filtro de cor controlada por polarização óptica, permite controlar a selectividade espectral do dispositivo em relação ao canal de transmissão, o que regula a regeneração do sinal óptico. Este comportamento deve-se ao facto do dispositivo possuir duas zonas diferentes de coeficientes de absorção, podendo ser sintonizado através da variação de polarização eléctrica aplicada ou através da variação de polarização óptica [8].

Neste ponto convém definir os conceitos de multiplexagem e demultiplexagem: multiplexagem é a transmissão simultânea de dois ou mais sinais de luz com diferentes comprimentos de onda, provenientes de várias fontes ópticas emissoras, num só canal de transmissão (fibra óptica). O sinal combinado das várias fontes ópticas é convertido num sinal eléctrico através do dispositivo WDM, o multiplexador (MUX), o qual guarda em memória os canais de origem (comprimento de onda e *bit rate*). A demultiplexagem é o processo inverso à multiplexagem. Neste caso, um feixe de luz policromático (mistura de diferentes comprimentos de onda) atinge a superfície do sensor, e o sinal é medido a uma tensão aplicada apropriada. Aqui, a sensibilidade espectral do dispositivo pode ser controlada pela tensão, o que permite o reconhecimento dos canais transmitidos. Por outras palavras, quando o sinal multiplexado chega aos receptores, os sinais de cores diferentes são separados e entregues no respectivo receptor. Na recepção do sinal utilizam-se dispositivos fotodíodos que, por não serem selectivos em termos de comprimentos de onda, precisam de ser combinados com um dispositivo demultiplexador (DEMUX), o qual faz chegar a cada receptor o seu respectivo comprimento de onda [9].

Para a multiplexagem/demultiplexagem dos canais foram testados e caracterizados optoelectronicamente, em trabalhos anteriores [3, 4], vários tipos de estruturas heterogéneas semicondutoras de multicamadas, baseadas em fotodíodos *pin* de silício amorfo hidrogenado (a-SiC-H). Estes sensores foram estudados de forma a obter a variação dos valores de fotocorrente, para diferentes valores de tensão aplicada.

Os primeiros resultados obtidos [3] serviram para demonstrar que, sob polarização inversa a fotocorrente do dispositivo era mais elevada que sob polarização directa e que, através da medida de amplitude da fotocorrente, era possível detectar a excitação óptica que a originava. Este resultado permitiu implementar a demultiplexagem de sinais ópticos de comprimento de onda situados na zona espectral do vermelho, do verde e do azul. Mais tarde, outros dispositivos baseados também em ligas de a-SiC:H, mas com diferentes configurações, foram usados para a implementação do WDM.

Usando esta metodologia ficou demonstrado que com configuração *pin* constituída por dois fotodíodos empilhados (pin1 de a-SiC:H e pin2 de a-Si:H), se conseguiam obter melhores resultados na demultiplexagem dos sinais ópticos transmitidos. Da caracterização óptica deste sensor pode-se dizer que, para diferentes valores de tensão aplicados e para comprimentos de onda elevados, o valor da fotocorrente é independente do valor da tensão aplicada. Além disso, quando se variam os valores da fotocorrente em função do comprimento de onda, para uma tensão inversa, verificou-se que para frequências baixas a resposta aumenta com a frequência da luz visível [4].

Para complementar, a tecnologia de demultiplexagem ficou também demonstrado a aplicação de polarização óptica usando radiação de fundo. Verificou-se a influência da variação do comprimento de onda da radiação de fundo, na fotocorrente gerada no sensor. Sob polarização inversa, a radiação de fundo vermelha amplifica os valores de fotocorrente do canal azul, e a radiação de fundo azul amplifica o canal vermelho e verde. Para polarização directa, apenas a radiação de fundo azul amplifica os valores de fotocorrente do canal vermelho.

Desta forma, a fim de analisar os resultados medidos nas diversas condições experimentais, foi desenvolvido e implementado em Excel um algoritmo que permita a recuperação da informação de cada canal de transmissão. Foram analisados três canais de transmissão (vermelho, verde e azul), dois casos distintos de polarização do dispositivo (inversa e directa) e três tipos de polarização óptica para a radiação de fundo (vermelho, verde e azul). O algoritmo desenvolvido contempla a utilização das medidas de fotocorrente nas condições de polarização inversa e directa sem radiação de fundo aplicada e ainda como alternativa os sinais obtidos sob polarização inversa com e sem

aplicação de radiação de fundo.

Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 1 contém uma introdução à tecnologia de multiplexação WDM, a sua evolução, princípios e caracterização. São descritos também, alguns dispositivos de multiplexação, tais como o *Add/Drop-Multiplexer* e na demultiplexação, o prisma, a grelha de difracção ou as grelhas FBG e os filtros dieléctricos (filtros de interferência de múltiplas camadas). Este estudo foi importante na medida em que, permitiu compreender e consolidar os conhecimentos sobre esta tecnologia, tendo como base o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 2 efectuou-se a caracterização optoelectrónica do dispositivo semiconductor que vai ser utilizado como demultiplexador sob diferentes condições experimentais de iluminação de fundo e da taxa de transmissão do canal. É também apresentada a configuração experimental usada no laboratório e são descritas as várias experiências realizadas.

No Capítulo 3 é feita uma primeira abordagem ao algoritmo desenvolvido para o reconhecimento dos canais transmitidos, onde são apresentadas e explicadas as fases adoptadas para o desenvolvimento do algoritmo. Ainda neste capítulo é explicado o funcionamento geral do algoritmo e são apresentados os resultados experimentais e o resultado da classificação automática induzida pela aplicação do algoritmo de reconhecimento de canais.

No Capítulo 4, é apresentada a interface gráfica do utilizador, onde é feita uma explicação geral do seu funcionamento. Este capítulo é importante para o primeiro contacto entre o utilizador e o simulador, uma vez que explica desde a respectiva instalação até às funções dos principais comandos do simulador.

No Capítulo 5 resumem-se as principais conclusões deste trabalho e apresentam-se algumas indicações para delinear o trabalho futuro, que servirá para dar continuidade ao apresentado nesta dissertação.

Referências

- [1] http://www.gta.ufrj.br/grad/04_1/wdm/work.html, consultado em 30.08.2011.
- [2] D. Nolan K. O. Hill et all, Fiber Optics Handbook Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications McGraw Hill 2002
- [3] Agrawal, Govind P., “Fiber Optic Communications System”, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, Kai Chang – Series Editor, 1997.
- [4] Senior, John M., “Optical Fiber Communications – Principles and Practice – Second Edition”, Prentice Hall, 1992.
- [5] Leonid Kasovsky, Sergio Benedetto, Alan Willner, “Optical Fiber Communications System”, Artech House, 1996.
- [6] Jean-Pierre Laude, “DWDM, Fundamentals, Components and Applications”, Artech House, 2002.
- [7] William S. C. Chang, “Principles of Lasers and Optics” Cambridge 2007.
- [8] <http://www.rederio.br/downloads/pdf/nt00102.pdf>, consultado em 30.08.2011.
- [9] <http://pt.scribd.com/doc/60886269/3/Principio-do-WDM>, consultado em 30.08.2011.

Cap. 1 - Tecnologia WDM

Neste capítulo será apresentada a tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e as suas variantes, a sua evolução e características actuais. Serão também abordadas as diferentes técnicas de multiplexagem e demultiplexagem por divisão por comprimento de onda.

1.1 - Introdução

A tecnologia óptica tem sofrido uma enorme evolução e cada vez mais se desenvolvem novas tecnologias. A acompanhar esta evolução têm-se desenvolvido aplicações que exigem altas taxas de transferência, tais como a transmissão de vídeo, videoconferências, voz sobre IP (VOIP), entre outras. Esta é em grande parte uma resposta ao crescimento de 300 % por ano no tráfego de Internet, enquanto o tráfego de voz tradicional cresce a uma taxa anual, composta de apenas cerca de 13 %. Ao mesmo tempo que o volume de tráfego de rede aumenta, a natureza do tráfego está a tornar-se cada vez mais complexa. Confrontado com o desafio de aumentar dramaticamente a capacidade de transmissão de dados e de restringir os custos, as operadoras têm duas opções, instalar nova fibra ou aumentar a largura de banda efectiva da fibra existente.

A opção de instalar uma nova fibra para aumentar a capacidade de transmissão de dados, é o meio tradicional utilizado pelas operadoras, mas para expandir as suas redes ou ampliar as suas zonas de cobertura. No entanto, a implantação de nova fibra, representa uma proposta cara que envolve custos elevados e tempo de construção relativamente elevado.

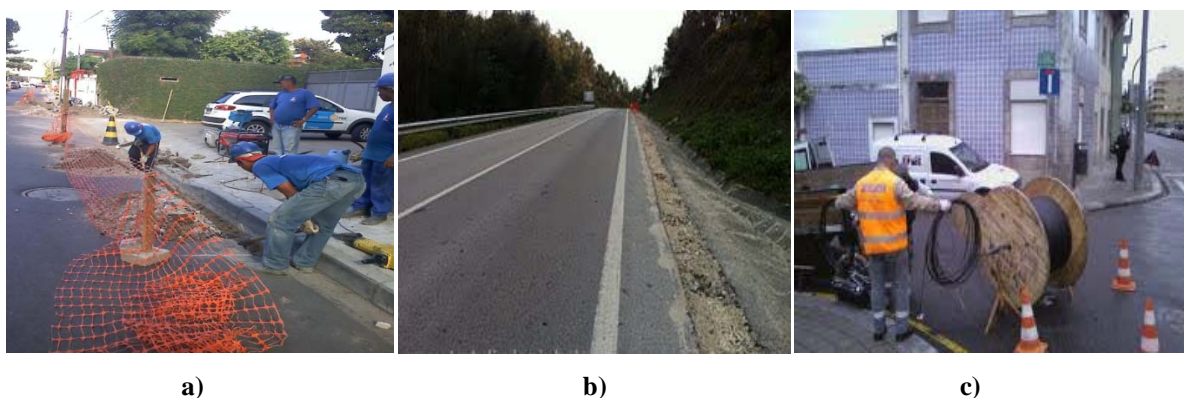


Figura 1 - Instalação de fibra óptica: a)Abertura de valas para tubagem; b)Passagem de tubagem e tamponamento da vala; c)Passagem e instalação da fibra óptica.

Por outro lado a opção de aumentar a largura de banda efectiva da fibra existente pode ser realizada através de vários métodos, dependendo das soluções que o operador pretenda implementar, que podem passar por aumentar a taxa de transmissão nos sistemas existentes ou incrementar o número de comprimentos de onda transmitido pela fibra.

Esta última solução pode ser implementada de diferentes formas, através das técnicas de: **TDM** (*Time Division Multiplexing*), **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*), **DWDM** (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) ou **CWDM** (*Coarse wavelength division multiplexing*).

-Método TDM: Este método faz a combinação de várias informações independentes numa única informação, aumentando assim a capacidade do meio de transmissão. Esta combinação é feita pela junção (multiplexação) dos sinais de acordo com uma sequência definida. Cada emissor só tem direito a uma “fatia” de tempo, Figura 2 a), e todos os utilizadores têm um tempo igual para transmitir. Após todos os emissores terem emitido, pela sequência definida, Figura 2 b), o primeiro emissor volta a poder enviar a sua informação e assim sucessivamente. Ao chegar ao receptor, cada informação independente é separada (demultiplexada), tendo sempre como base a sequência escolhida, no início da transmissão e o tempo, Figura 2 c). Outra característica do TDM é que atribui a totalidade da largura de banda durante o tempo que o emissor pode transmitir, mesmo que estes não possuam dados para enviar. Neste caso o TDM torna-se desvantajoso porque desperdiça largura de banda quando está ocupado com um emissor que nada tem para transmitir. Este tipo de transmissão permite que se atinjam débitos de 2.44 Gbps – 10 Gbps [1, 3, 8].

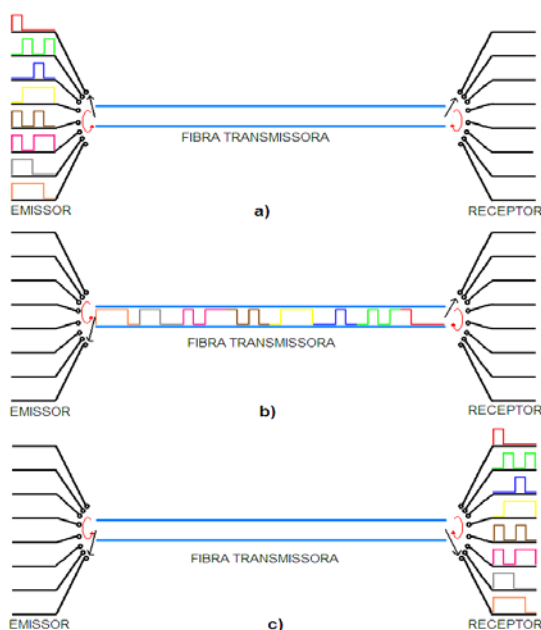


Figura 2 - Princípio de funcionamento do TDM.

-Método WDM: é uma tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda, o que permite aumentar a capacidade da fibra já instalada. O WDM consiste em reunir numa só fibra, vários sinais de luz de comprimentos de onda diferentes. Este conceito é semelhante ao já abordado no TDM mas, neste caso, com comprimentos de onda diferentes [1, 9]. De notar que, multiplexação é a capacidade de transmitir sobre um só suporte físico, dados que provêm de vários emissores. Chamamos multiplexador (MUX) ao equipamento de multiplexagem que permite combinar os sinais que provêm dos emissores para as fazer transmitir sobre o meio de transmissão. O demultiplexador (DEMUX) executa a tarefa inversa ao multiplexador. Alguma literatura denomina os emissores e os receptores como vias de baixa velocidade, e o meio de transmissão como via de alta velocidade. Este tipo de transmissão permite que se atinjam débitos de 10 Gbps [1, 3, 8].

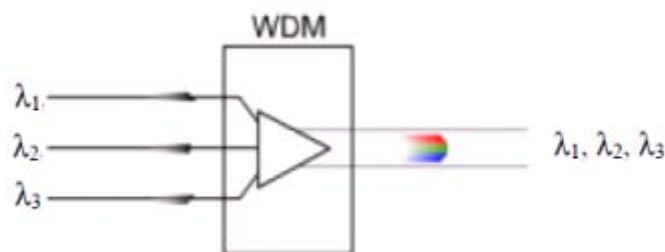


Figura 3 - Princípio de funcionamento do WDM.

-Método DWDM: a nova tecnologia DWDM nada mais é do que a tecnologia WDM diferenciando-se apenas no facto de o número de comprimentos de onda transmitidos ser superior (64) pois o espaçamento entre eles é menor. Atingiu-se a uma capacidade de 128 comprimentos de onda por fibra e ainda não se conhece o limite dessa tecnologia. Somadas as evoluções e os desenvolvimentos da tecnologia VoIP com a demanda cada vez maior para os transportes de dados, muitos acreditam que o protocolo IP directamente sobre DWDM será o futuro das telecomunicações no mundo. Este tipo de transmissão permite que se atinjam débitos de 100 Gbps [1, 3, 8].

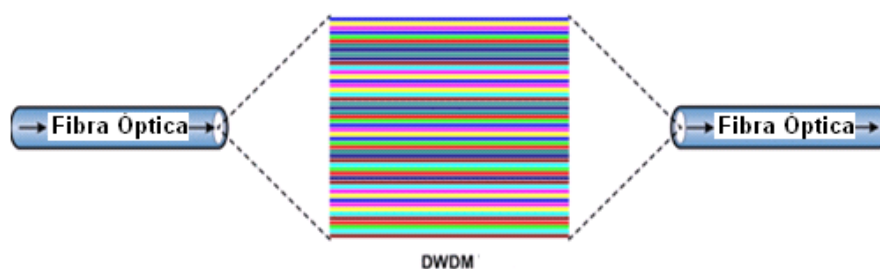


Figura 4 - Princípio de funcionamento do DWDM.

-Método CWDM: é uma tecnologia WDM de baixa densidade e o seu princípio de

funcionamento é o mesmo do WDM. Nesta técnica, a informação é agrupada em até 16 canais entre os comprimentos de onda de 1310 nm e 1610 nm, onde a distância entre os canais é de 20 nm (3000 GHz). Este sistema exige menos controlo do comprimento de onda e possui elevada qualidade de serviço. Além disso, esta tecnologia utiliza lasers como transmissores e é desnecessária a presença de amplificadores ópticos. Por este motivo é preferível o uso do CWDM em redes metropolitanas (LANs), devido ao seu custo acessível. Outra característica dos sistemas CWDM é o facto destes possuírem flexibilidade suficiente para serem empregues em conexões ponto-a-ponto. A taxa de transmissão suportada é de 1.25 Gb/s, cobrindo distâncias de até 40 km. Além disso, oferece suporte para taxas de 2.5 Gb/s, cobrindo distâncias de até 80 km.GHz [1, 3, 8]

Actualmente já existem equipamentos e operadoras de telecomunicações que adoptam soluções híbridas entre o CWDM e o DWDM. Na parte mais próxima da rede de acesso usa-se CWDM, enquanto no núcleo da rede metropolitana se usa o DWDM. Os equipamentos híbridos permitem economizar espaço ao re-alocar.

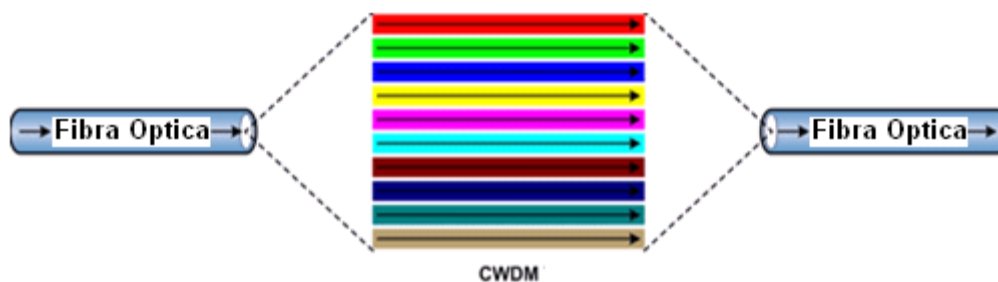


Figura 5 - Princípio de funcionamento do CWDM.

1.2 - Princípios do WDM

A tecnologia do WDM é uma técnica de multiplexação que surgiu por volta de 1990 com o objectivo de tornar mais eficiente a utilização das fibras ópticas, aumentando a capacidade de transmissão e consequentemente, usar a largura de banda de uma forma mais eficiente. Esta tecnologia consiste em juntar numa mesma fibra vários sinais de luz, de cores (comprimentos de onda) diferentes, cada um gerado por um dispositivo diferente. Quando o sinal multiplexado chega ao receptor, os sinais de cores diferentes serão novamente separados e entregues no respectivo receptor. A Figura 6 exemplifica o modo de funcionamento de um sistema de multiplexação WDM.

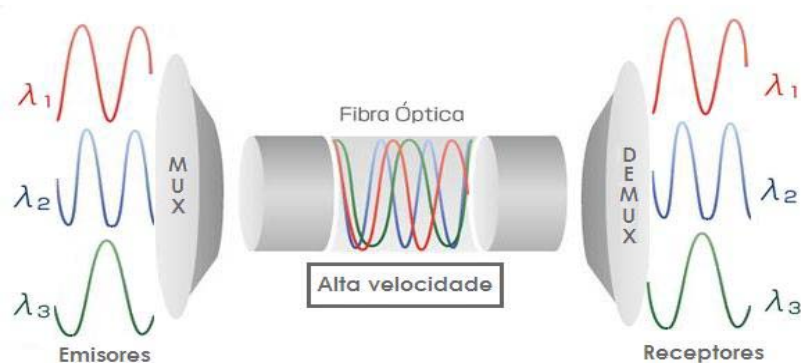


Figura 6 - Princípio de funcionamento do WDM.

Neste tipo de sistemas, cada emissor óptico emite um sinal num comprimento de onda bem definido e devidamente espaçado, de forma a reduzir a interferência com os emissores que emitem em comprimentos de onda adjacentes. Os dispositivos que se usam normalmente como emissores são os LASERS (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*) ou os LED (*Light-Emitting Diodes*).

Os LEDs são dispositivos lentos em relação aos lasers, além de serem adequados para a utilização em taxas de transmissão menores que 1 Gb/s. Além disso, apresentam uma largura espectral larga e são frequentemente usados em comunicações com fibras multimodo. Já os lasers semicondutores possuem características adequadas às aplicações com fibras monomodo. Além disso, os lasers são capazes de emitir feixes de luz com comprimento de onda precisa, a largura de espectral é muito inferior e a potência mais elevada. O custo dos lasers em relação aos LEDs é maior, mas é amplamente usado em enlaces DWDM, já que satisfazem a maior parte das exigências dessa tecnologia, nomeadamente o controle da variação da frequência no tempo. No entanto, os lasers não satisfazem esse requisito, que pode ser afectado pelo meio utilizado para a modulação do sinal [9, 10].

Na recepção do sinal utilizam-se normalmente para fotodetecção dispositivos fotodíodos que, por não serem selectivos em termos de comprimentos de onda, precisam de ser combinados com um dispositivo demultiplexador (DEMUX), o qual faz chegar a cada receptor o seu respectivo comprimento de onda. Os fotodetectores mais usados são o PIN (Positive-Intrinsic-Negative) e o APD (Avalanche PhotoDiode). Os fotodíodos PIN apresentam certas vantagens, tais como baixo custo e poderem trabalhar com larguras de banda da ordem dos 10 GHz ou superiores, enquanto os APDs demonstram maior sensibilidade e precisão e custo mais elevado para além de exigirem tensões de alimentação elevada e a necessidade de controlo de temperatura [9, 10].

1.3 - Características do WDM

As tecnologias WDM oferecem suporte a projectos de alto desempenho, tais como o ensino à distância, em laboratórios remotos, em telemedicina, ambientes colaborativos, etc. O WDM utiliza paralelamente, tecnologias de rede como *Multicast*, Engenharia de Tráfego (Traffic Engineering), QoS (Qualidade de Serviço), entre outras, oferecendo um serviço de qualidade, com novas tecnologias e alta capacidade de comunicação.

A principal razão para a utilização destes sistemas é o baixo custo e a possibilidade de se modular o aumento da capacidade de transmissão conforme o mercado e de acordo com as necessidades de tráfego. Possibilitam, ainda, o alcance de uma melhor relação entre custos e bits transmitidos. Algumas análises mostram que, para distâncias menores que 50Km, a solução de multi-fibra é menos dispendiosa e para distâncias superiores, o custo da solução WDM é mais vantajoso [1, 9].

Os sistemas WDM possuem algumas características básicas, que são apresentadas a seguir:

- **Flexibilidade no aumento da capacidade de acordo com a necessidade de tráfego:** migrações de 622 Mbps para 2,5 Gbps e, a seguir, para 10 Gbps. Estas migrações poderão ser realizadas sem a necessidade de se trocar os amplificadores e multiplexadores WDM, preservando os investimentos realizados;
- **Transparência a sinais transmitidos:** podem transmitir uma grande variedade de sinais (texto, voz, vídeo, etc.) de uma forma transparente. Como não há o envolvimento de processos eléctricos, diferentes taxas de transmissão e sinais poderão ser multiplexados e

transmitidos para o outro lado do sistema, sem a necessidade de uma conversão opto-eléctrica. Assim, o WDM carrega os sinais de maneira independente uns dos outros, o que quer dizer que cada canal possui sua própria banda dedicada;

- **Permite crescimento gradual de capacidade:** um sistema WDM pode ser projectado para multiplexar 16 canais, podendo iniciar a sua operação com um número menor de canais. A introdução de mais canais no sistema pode ser feita simplesmente adicionando novos equipamentos terminais;
- **Reutilização dos equipamentos terminais e da fibra:** permite o crescimento da capacidade, mantendo os mesmos equipamentos terminais e a mesma fibra já existente na rede;
- **Atendimento da procura inesperada:** geralmente, o tráfego aumenta mais rapidamente que o esperado e, neste caso, alguns sistemas podem não possuir uma infra-estrutura disponível para o suportar. Os sistemas WDM podem solucionar este problema, economizando tempo na expansão da rede.

Deste modo, existem algumas situações que favorecem a utilização do WDM, tais como na utilização de redes de longas distâncias (redes ponto-a-ponto e em cadeia), como no aumento da capacidade caso seja necessária a instalação de novos cabos, principalmente se não houver espaço na infra-estrutura existente e caso seja necessário aumentar a capacidade num curto período de tempo [1, 9].

1.4 - Dispositivos Multiplexer e Demultiplexer convencionais

Os sistemas WDM utilizados na faixa do infravermelho para comunicações ópticas a longas distâncias, necessitam de sistemas capazes de combinar múltiplos comprimentos de onda que provêm de várias fontes emissoras, para que sejam transmitidos numa única fibra. No WDM existem dois elementos-chave que são indispensáveis, sendo eles, o multiplexador (MUX) e o demultiplexador (DEMUX). Assim, os multiplexadores combinam os sinais das várias fontes emissoras, com diferentes comprimentos de onda e convergem num único feixe. Do lado dos receptores, os demultiplexadores separam os vários comprimentos de onda do feixe recebido e vão acopla-los às fibras individuais (Figura 7).

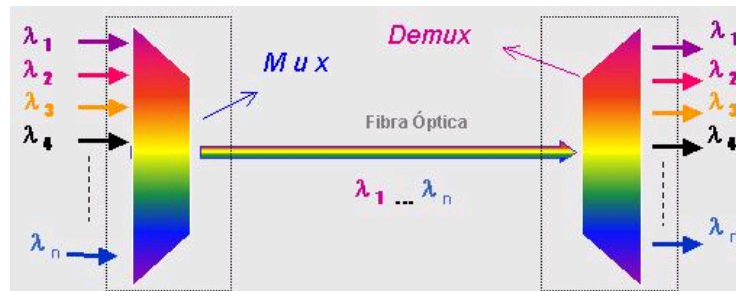


Figura 7 - Operação de multiplexação e demultiplexação.

A estrutura dos multiplexadores e dos demultiplexadores é, basicamente, a mesma mas os equipamentos colocados em direcções opostas.

Estes equipamentos podem ser classificados como passivos ou activos. Os passivos, baseiam-se na utilização de prismas, redes de difracção ou filtros. Se forem activos, baseiam-se na combinação de dispositivos passivos com filtros sintonizados. Nestes dispositivos é necessário minimizar a interferência entre canais (Cross-talk), aumentando a separação entre eles [6, 9]. Cross-talk é uma medida de separação dos canais, ou seja, serve para aferir a capacidade de distinguir cada comprimento de onda.

1.4.1 - Dispositivos Multiplexer

i. Add/Drop-Multiplexer

Existe um tipo especial de multiplexadores conhecido por *Add/Drop-Multiplexer*, que além de realizarem a função de um multiplexador comum, permite também, remover um sinal ou inserir um ou mais comprimentos de onda em algum ponto ao longo deste período, num nó de transmissão. A Figura 8 mostra o esquema de funcionamento de um multiplexador óptico *Add/Drop*.

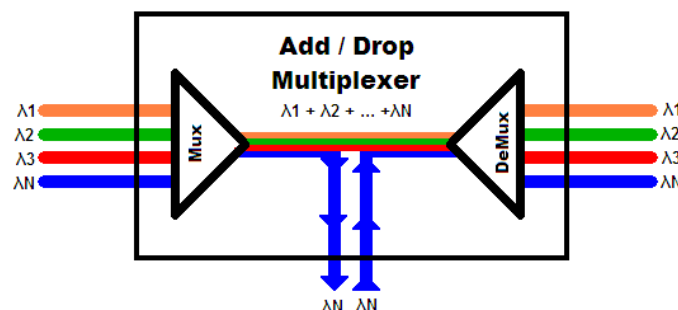


Figura 8 - Multiplexador Óptico *Add/Drop* (OADM).

Todos os outros comprimentos de onda passam pelo multiplexador *Add/Drop* com uma pequena perda de potência. Este dispositivo tem a vantagem de facilitar a evolução dos links ópticos DWDM ponto-a-ponto, visto que nem todos os canais de transmissão têm a mesma origem e o mesmo destino [5, 9].

1.4.2 - Dispositivos Demultiplexer

i. Prisma

Utilizando um prisma pode-se realizar, de uma forma simples, o processo de multiplexação e demultiplexação da luz. No processo de multiplexação, quando os sinais dos diferentes feixes luminosos, emitidos por cada fibra, incidem nos pontos AB (Figura 9) da superfície do prisma, este combina os feixes e transmite o sinal resultante, pelo cabo de fibra óptica.

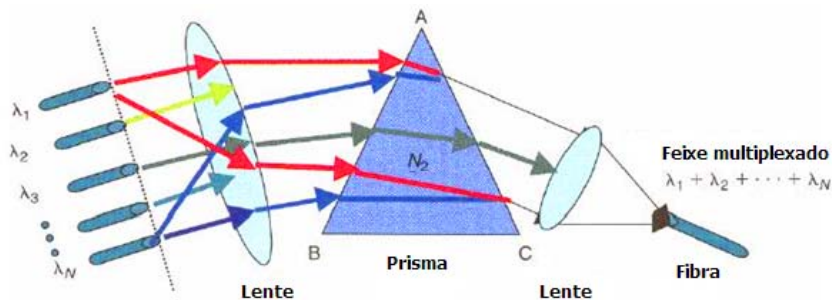


Figura 9 - Multiplexação através de um prisma.

De forma inversa, no processo de demultiplexação, quando o feixe de luz policromática incide na superfície AC do prisma (Figura 10), cada comprimento de onda é refractado de forma diferente. A luz que sai na outra superfície do prisma AB consiste nos componentes de frequência separados uns dos outros por pequenos ângulos. A lente foca cada comprimento de onda em pontos diferentes, onde as fibras receptoras estão colocadas, sendo uma fibra para cada canal (ou comprimento de onda) [1,5,9].

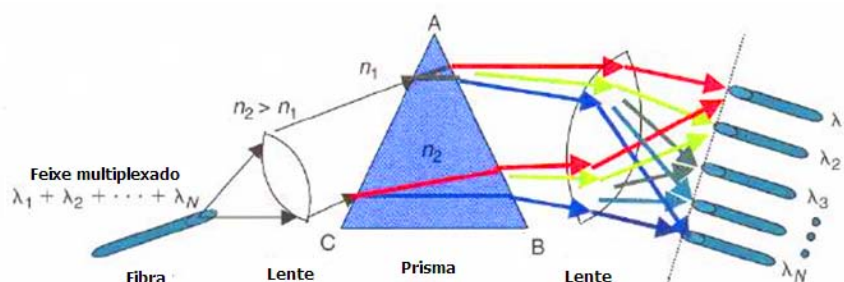


Figura 10 - Demultiplexação através de um prisma.

ii. Grelha de Difracção

O princípio básico da grelha de difracção é semelhante ao funcionamento do prisma, que separa a luz incidente de acordo com o comprimento de onda. No entanto, a sua capacidade de separação dos comprimentos de onda é superior. O efeito de funcionamento pode ser verificado olhando para a luz reflectida num CD; onde os pequenos sulcos onde os dados foram gravados funcionam como redes de difracção, espalhando espacialmente o espectro como um prisma. Este dispositivo permite, ainda, um número maior de portadoras pois é possível implementar um espaçamento de 50 GHz.

Tal como o nome indica, esta técnica tem como base os princípios de difracção e interferência óptica. Cada comprimento de onda que compõe o feixe de luz policromática, ao incidir numa grelha de difracção, é difratado em diferentes ângulos, e assim para pontos diferentes no espaço. Para focar estes feixes dentro da fibra, podem usar-se lentes [1, 3].

A Figura 11 mostra, esquematicamente, como se processa a multiplexagem e a demultiplexagem usando a grelha de difracção.

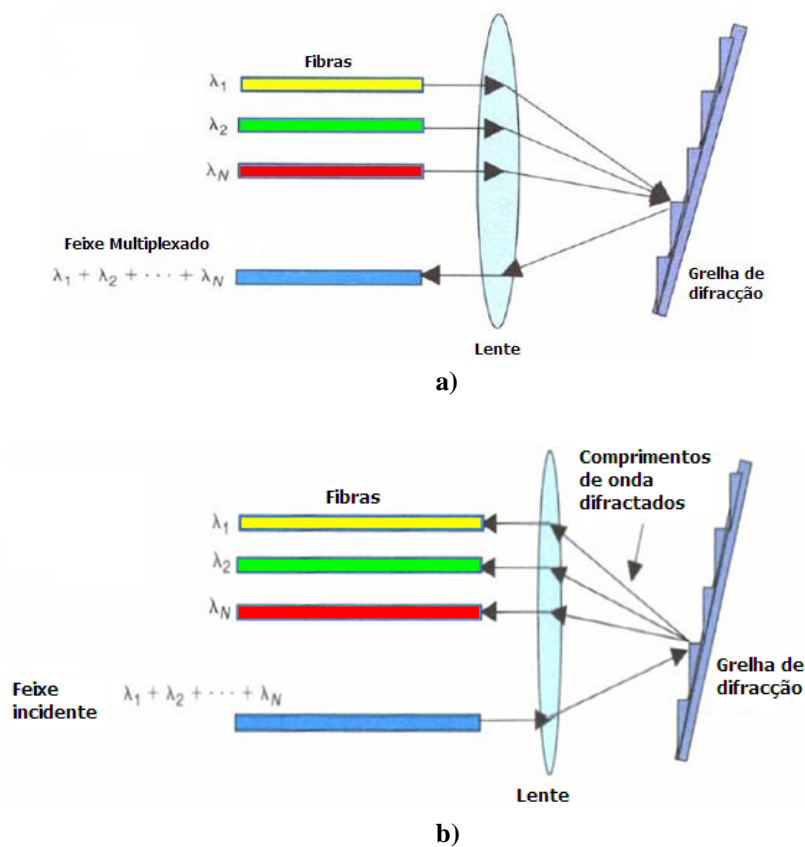


Figura 11 - Esquema de uma Grelha de Difracção: a) Multiplexação; b) Demultiplexação.

iii. *Arrayed Waveguide Grating (AWG)*

As matrizes de grelhas de guias de onda ou *Arrayed Waveguide Grating (AWG)* são dispositivos que também se baseiam nos princípios de difracção. O AWG consiste numa matriz de canais curvos, com uma diferença fixa no caminho entre os canais adjacentes. A Figura 12 mostra o esquema da demultiplexação utilizando um AWG. Os AWGs são conectados aos terminais de entrada e saída, na emissão e recepção. O feixe luminoso policromático, ao incidir no terminal de entrada do AWG, é difractado e divide a luz nos guias de ondas da matriz. Nesta matriz, os guias de onda curvos fazem com que a luz percorra distâncias diferentes, e a diferença de comprimento de onda óptico produz uma diferença de fase no terminal de saída, quando montado numa matriz de fibras colectoras. Isto resulta em diferentes comprimentos de onda possuindo máximos de interferência em diferentes lugares, que correspondem às portas de saída [1, 9].

Os AWGs são caros e têm uma perda considerável em relação a outras técnicas de DEMUX, mas tem a vantagem de poder demultiplexar um grande número de canais num só dispositivo, quando isso for necessário [7].

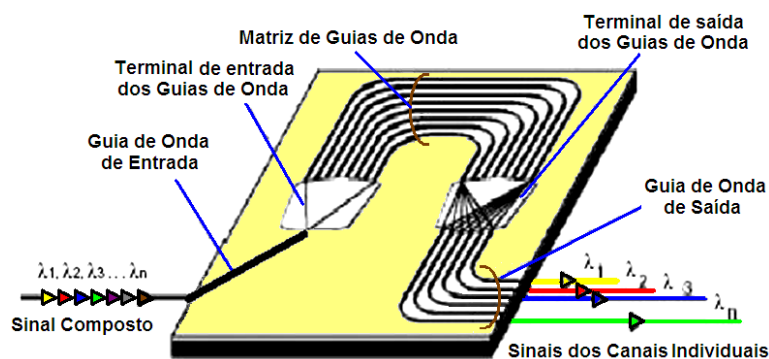


Figura 12 - Demultiplexação através de AWG.

iv. *Fiber Bragg Grating (FBG)*

As FBG (*Fiber Bragg Grating*) são um tipo de reflector distribuído de *Bragg* construído num pequeno segmento de uma fibra óptica que reflecte comprimentos de onda específicos e transmite todos os outros. Isto é alcançado pela adição de uma variação periódica no índice de refração do núcleo do segmento da fibra, o qual gera um comprimento de onda dielétrico. As fibras com grelha de *Bragg* podem consequentemente ser usadas como um filtro óptico para bloquear certos comprimentos de onda, ou como reflector de comprimentos de onda específicos. A Figura 13 mostra o esquema de funcionamento das FBG, dando ênfase à resposta espectral do sinal de entrada, à resposta espectral do sinal reflectido e à resposta espectral do sinal transmitido [3].

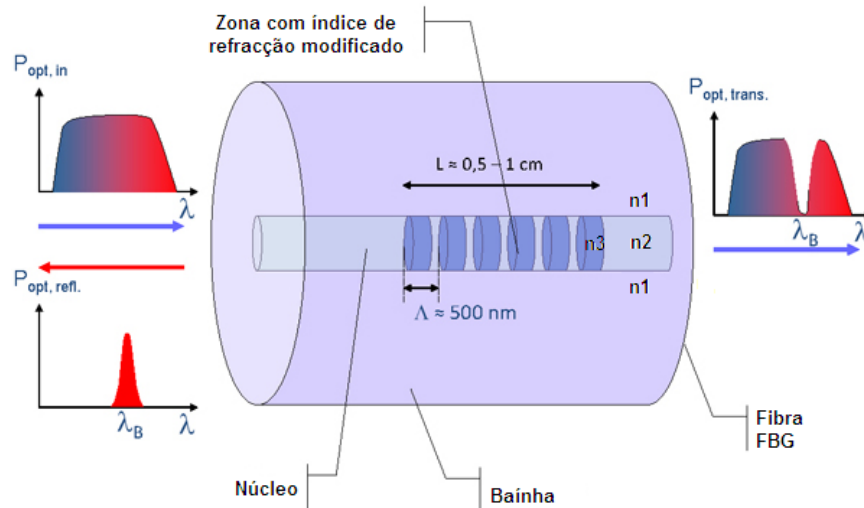


Figura 13 - Esquema de da constituição e resposta espectral de um *Fiber Bragg Grating*.

O comprimento de onda reflectido (λ_B) pode ser calculado através de $\lambda_B = 2n \cdot \Lambda$, onde n é o índice de refração efectivo da grelha e Λ é o período da grelha. O índice de refração efectivo da grelha pode ser calculado com $n = (n_2 + n_3)/2$, sendo n_2 o índice de refração do núcleo da fibra, e n_3 o índice de refração da grelha da fibra [6].

A estrutura das FBG pode variar com o índice de refração ou o período da grelha. A título de exemplo, a Figura 14 a) mostra a estrutura da fibra quando se varia o índice de refração e a Figura 14 b) mostra a resposta espectral do perfil do índice de refração.

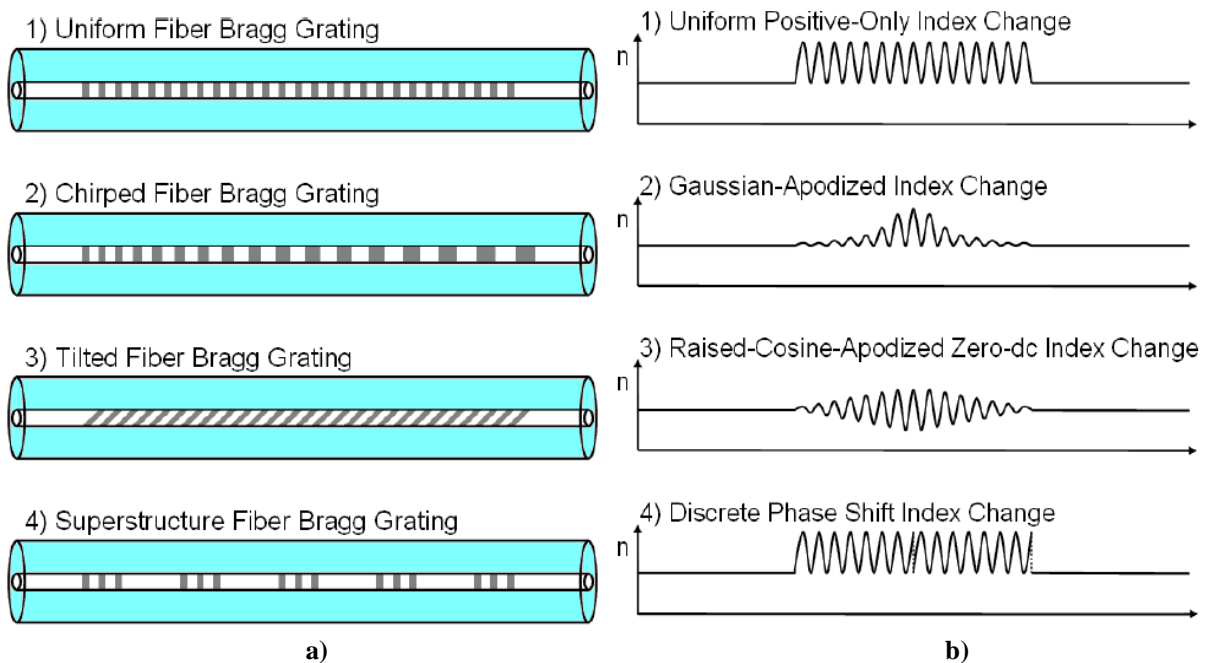


Figura 14 - a)Estrutura da FBG variando o índice de refração; b)Resposta espectral do perfil do índice de refração.

A principal aplicação das fibras FBG é em sistemas de comunicações ópticas. Elas são utilizadas especificamente como filtros *notch* (entalhe) e estes, por sua vez, são usados em multiplexadores ópticos e demultiplexadores com um circulador óptico, ou *Optical Add-Drop Multiplexer* (OADM). A Figura 15 mostra quatro canais, representados com quatro cores, que incidem sobre uma FBG através de um circulador óptico. A FBG é configurada em função de um dos canais. Neste exemplo o canal escolhido foi o 4. O sinal é reflectido de volta para o circulador, que o dirige para baixo e o retira do sistema. Uma vez que o canal foi removido, um outro sinal pode ser adicionado no mesmo ponto da rede, no canal 4.

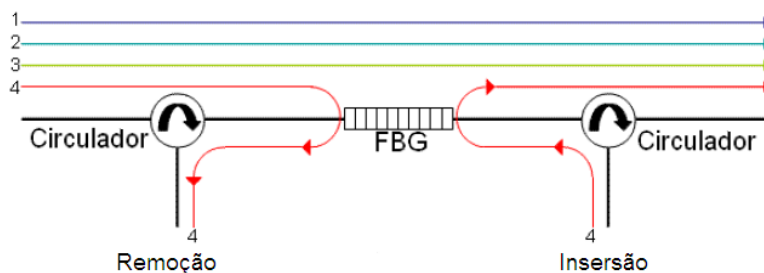


Figura 15 - Esquema de um *Optical Add-Drop Multiplexer* (OADM).

Pode-se elaborar um demultiplexador colocando em cascata várias secções de remoção de canal do OADM. Cada elemento de remoção usa a FBG configurada com o comprimento de onda a ser demultiplexado. Por outro lado, um multiplexador pode ser elaborado colocando em cascata várias secções de inserção de canal do OADM [5, 6].

v. *Filtros Dielétricos (Filtros de interferência de múltiplas camadas)*

Os Filtros Dielétricos, são filtros interferométricos que são construídos sobrepondo camadas finas de dois materiais (geralmente dielétricos, como filme fino) com índices de refração diferentes. As ondas transmitidas são as que não sofrem interferência destrutiva pelas camadas, o que depende da largura da camada, dos índices de refração dos materiais e do ângulo de incidência da luz. Quanto mais camadas, maior a resolução alcançada. Os comprimentos de onda que não são transmitidos são reflectidos, também por isso às vezes chamados filtros dicróicos. [10]

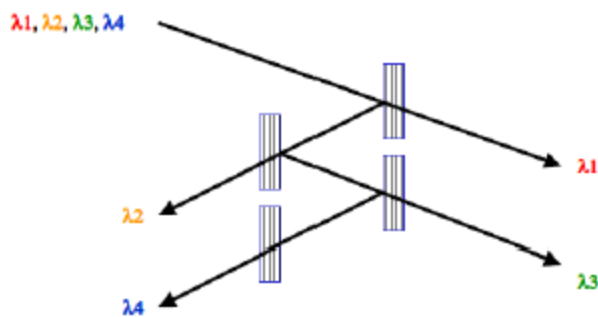


Figura 16 - Esquema de um *Filtro Dielétrico*.

Cada filme tem uma composição que permite a passagem de um determinado comprimento de onda reflectindo os restantes.

Pela disposição geométrica dos diversos componentes verifica-se que por cada comprimento de onda que se pretende extrair aumenta a complexidade do sistema e associado a esta complexidade há um incremento de atenuação em função do número de comprimentos de onda, a intensidade de λ_1 é superior à intensidade de λ_2 e assim sucessivamente.

Pode-se utilizar o mesmo dispositivo como MUX se invertermos o sentido das setas da Figura 16.

Esta tecnologia é aplicada nos sistemas de 100 GHz de espaçamento pelo que tem um limite de cerca de 16 portadoras.

Na aplicação prática de um sistema baseado nesta tecnologia a ordem com que se inserem os comprimentos de onda no MUX e a ordem de extracção no DEMUX deve ser inversa uma da outra para que haja equilíbrio de potência óptica entre os comprimentos de onda na recepção [10].

1.5 - Dispositivo WDM semiconductor

Nesta secção pretende-se mostrar o conhecimento que se detém actualmente sobre a utilização do dispositivo semiconductor para realizar a demultiplexagem na região do visível. Este domínio de investigação, está a ser desenvolvido no ISEL, no seio do grupo Giamos.

Deste modo vai ser descrito o estudo da arte relativo à utilização do dispositivo semiconductor para realizar a demultiplexagem na região visível do espectro electromagnético.

Neste âmbito foram analisados diversas estruturas semiconductoras baseadas em fotodíodos *pin* empilhados de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H e/ou a-SiC:H). Foram estudados vários dispositivos de forma a obter a variação dos valores de fotocorrente para diferentes valores de tensão aplicada. Estas estruturas são compostas por várias camadas: uma camada de vidro (substrato) onde incidem os múltiplos canais monocromados, um eléctrodo eléctrico transparente frontal (*ITO – Indium-Tin Oxide*), sendo o dispositivo escolhido (NC11, NC5 ou NC12) e por fim o eléctrodo eléctrico posterior transparente (ITO). Estes dispositivos foram fornecidos pelo Centro de Física Molecular do Instituto Superior Técnico e foram produzidos utilizando a técnica PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) [2,3].

A estrutura base deste estudo consiste num semiconductor com a configuração de duas zonas distintas, que se devem às diferentes características dos fotodíodos em série, os quais foram individualmente estudados na estrutura NC12. Assim, para o fotodíodo frontal baseado em a-SiC:H (pin1), observou-se um máximo de fotocorrente em torno dos 470 nm e que em torno dos 600 nm onde o dispositivo deixa de gerar fotocorrente. Este facto justifica-se pelas características do hiato energético do a-SiC:H. Em termos práticos, este fotodíodo absorve o azul (470 nm) e o verde (525 nm) e deixa passar, para o pin2, o vermelho (626 nm). Para o fotodíodo posterior baseado em a-Si:H (pin2), observou-se um máximo de fotocorrente em torno dos 600 nm, o que significa que absorve o vermelho (626 nm) que o pin1 deixa passar. O dispositivo deixa de gerar fotocorrente em torno dos 700 nm, o que é justificado pela sua característica do hiato energético do a-Si:H [2, 5, 8]. Em suma, ambas as estruturas empilhadas foram desenvolvidas de forma a alcançar uma grande absorção à luz azul e grande transparência à luz vermelha, no fotodíodo frontal (pin1), assim como grande absorção da luz vermelha no fotodíodo posterior (pin2) [9].

Concluindo, os fotodíodos agem como filtros ópticos, confinando respectivamente, o canal azul e o vermelho, enquanto o canal verde é absorvido em ambos. Na Figura 17a) é mostrado os perfis de recombinação (linhas rectas), sob influencia dos canais vermelho ($\lambda_R = 650$ nm), verde (λ_G

=550 nm) e azul ($\lambda_B = 450$ nm), aplicando diferentes tensões de polarização ($-6V < V < +1V$). São também demonstrados os perfis de geração (símbolos). Estes cálculos foram realizados com um programa dedicado à simulação: ASCA-2D.

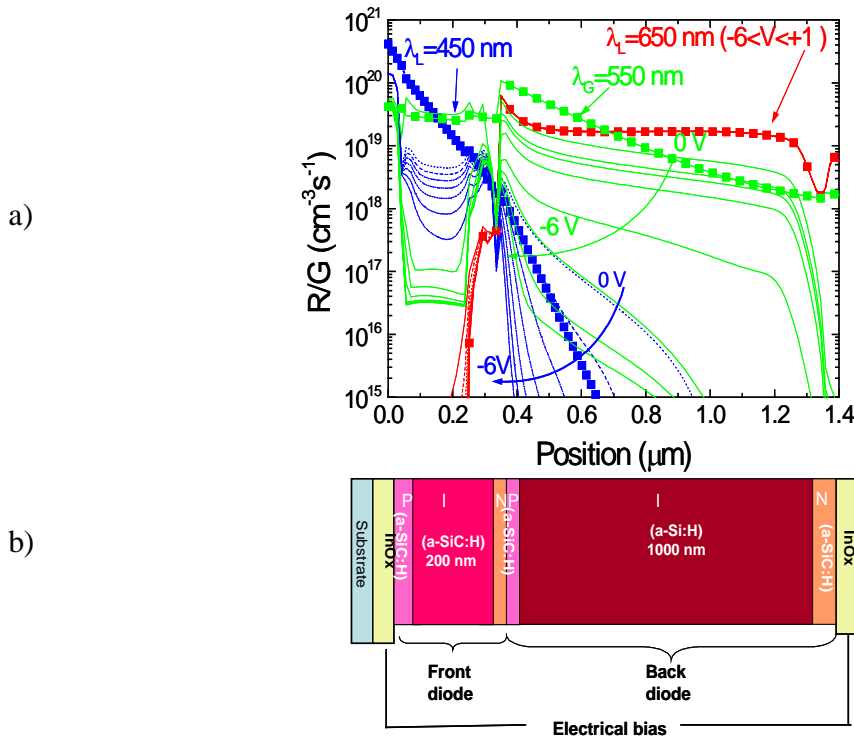


Figura 17 - Dispositivo WDM a-SiC:H: a) Recombinação de perfis (linhas retas), sob vermelho ($\lambda_R = 650$ nm) verde ($\lambda_G = 550$ nm) e azul ($\lambda_B = 450$ nm) com aplicação de polarização óptica e a diferentes tensões aplicadas ($6V < V < +1V$); b) Configuração do dispositivo.

A configuração do dispositivo permite que seja descrito em ambos os modos de multiplexagem e demultiplexagem (Figura 18). Assim, podem ser transmitidos vários feixes monocromáticos ou num único feixe policromático, que são dirigidos para o dispositivo onde são absorvidos, de acordo com cada comprimento de onda, dando origem a um tempo e modulação de comprimento de onda do campo elétrico.

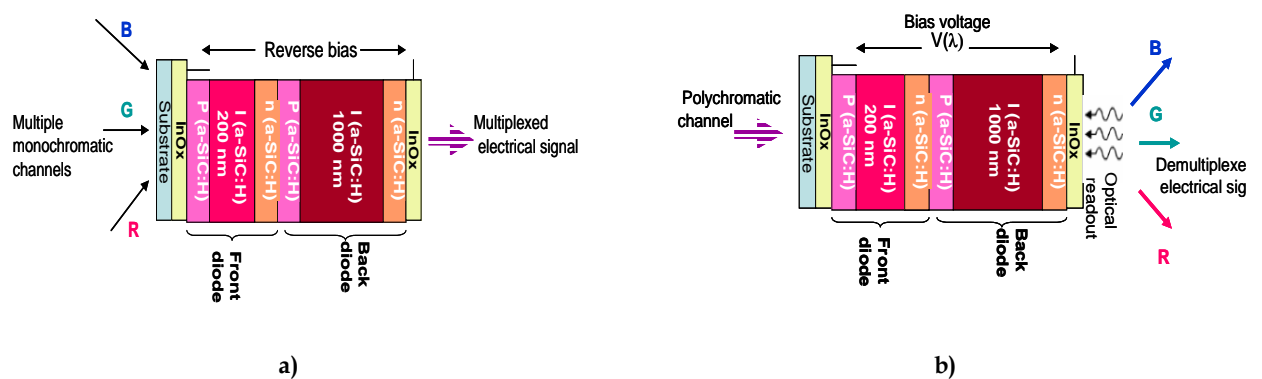


Figura 18 - Configuração do dispositivo WDM a) Modo de multiplexação b) Modo de demultiplexação.

No modo de multiplexagem o sensor recebe a luz modulada de entrada, cada uma com um comprimento de onda diferente (canais R, G, e B). O efeito combinado de cada canal de entrada é então convertido num sinal eléctrico através do dispositivo WDM, que mantém a memória dos canais de entrada (comprimento de onda e a taxa de transmissão) (Figura 18 a).

No modo de demultiplexagem um feixe de luz policromática (mistura de diferentes comprimentos de onda) é projectada sobre o dispositivo e o sinal medido é convertido em tensões aplicadas. Aqui, a sensibilidade espectral do dispositivo é controlado pela tensão permitindo o reconhecimento dos canais RGB (Figura 18 b).

1.5.1 - Influência da tensão aplicada na sensibilidade espectral

Em trabalhos anteriores, foi caracterizada a resposta espectral do dispositivo entre (400-800 nm) tendo-se para o efeito realizado as medidas da variação da fotocorrente com o comprimento de onda, sob diferentes condições experimentais: tensão de polarização (-10V a +2V) e a várias frequências (15 Hz a 2 KHz). Os diversos comprimentos de onda aplicados foram obtidos com recurso a um monocromador (grelha de difracção) e modulados através de um *chopper*.

A Figura 19 a), mostra para as diferentes tensões aplicadas (-10V a +2V) a fotocorrente medida a uma frequência modulada de 2 KHz e na Figura 19 b), mostra a resposta espectral da variação da fotocorrente, em função do comprimento de onda a -5V, obtida a diferentes frequências de modulação da luz (15 Hz a 2 KHz).

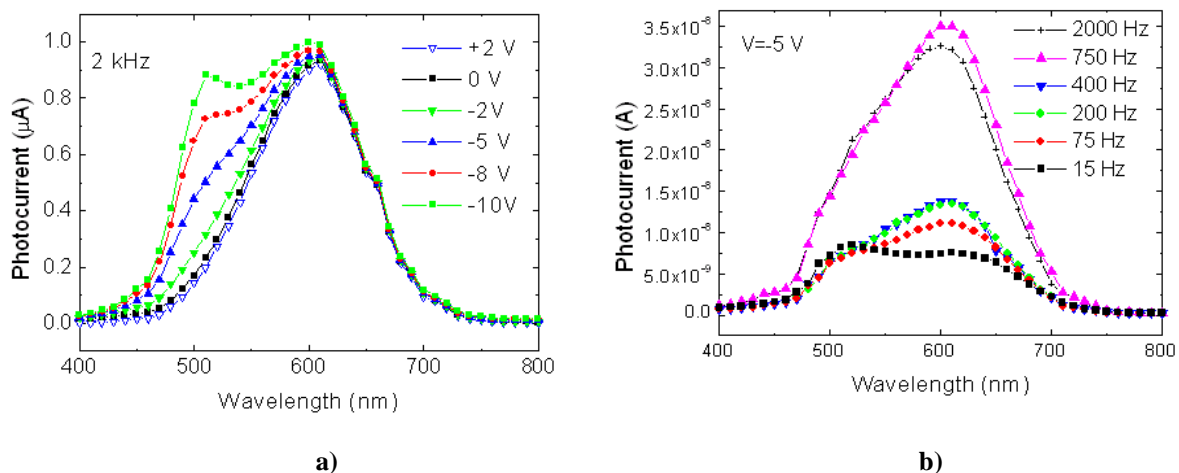


Figura 19 - Resposta espectral da fotocorrente: a)Diferentes tensões aplicadas e a uma frequência de 2000 Hz; b)Aplicação de uma tensão -5V com diferentes frequências.

Destes gráficos pode-se concluir que para frequências mais altas ($f > 400$ Hz) a resposta espectral não depende da frequência de luz modulada, o que para os comprimentos de onda menores, entre as regiões do espectro dos tons violetas (400 nm) e dos azuis (470 nm) observa-se um pequeno crescimento da fotocorrente, crescente com a tensão inversa aplicada, observando ainda que entre a região dos tons azuis (470 nm) e dos vermelhos (700 nm) temos um aumento progressivo da fotocorrente atingindo o seu máximo para o comprimento de onda na região dos vermelhos (626 nm), conforme se pode verificar na Figura 19 a).

Para polarização inversa e a baixas frequências ($f < 400$ Hz), a resposta espectral aumenta com a frequência da luz na região do espectro até aos tons vermelhos (626 nm), enquanto entre as regiões do espectro dos tons violetas (400 nm) e dos azuis (470 nm), a resposta espectral da fotocorrente permanece constante e entre a região dos verdes (520 nm) e dos vermelhos (626 nm) observa-se uma variação mais acentuada com a frequência da luz modulada, conforme se pode verificar na Figura 19b).

Contudo, à medida que a frequência ultrapassa um determinado valor limite (≈ 750 Hz) observa-se um decréscimo do sinal.

1.5.2 - Contribuição individual da cada fotodíodo do dispositivo NC12

Em estudos anteriores foi analisada a resposta espectral entre (400-800 nm) e as características optoelectrónicas da fotocorrente-tensão no dispositivo NC12, idêntico ao NC5 mas com um contacto transparente entre os dois fotodíodos, o que permite o estudo individual de cada estrutura. Medindo a corrente do fotodíodo frontal baseado em a-SiC:H (pin1), como no fotodíodo posterior baseado em a-Si:H (pin2), os diferentes valores de tensão de polarização aplicados (-10V a +3V) e sob diferentes condições de iluminação.

Estas condições de iluminação foram obtidas usando três luzes monocromáticas moduladas: R ($\lambda_R = 626$ nm); G ($\lambda_G = 520$ nm) e B ($\lambda_B = 470$ nm), e as suas combinações policromáticas; R & G (Amarelo); R & B (Magenta); G & B (Cyan) e R & G & B (Branco). As fontes de luz utilizadas foram LEDs de alto-brilho com uma largura de banda espectral de 20 nm. A potência óptica de saída foi ajustada para cada comprimento de onda a $19 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Os resultados relativos à sensibilidade espectral e características fotocorrente-tensão obtidos para o dispositivo NC12 estão representados na Figura 20[13, 14].

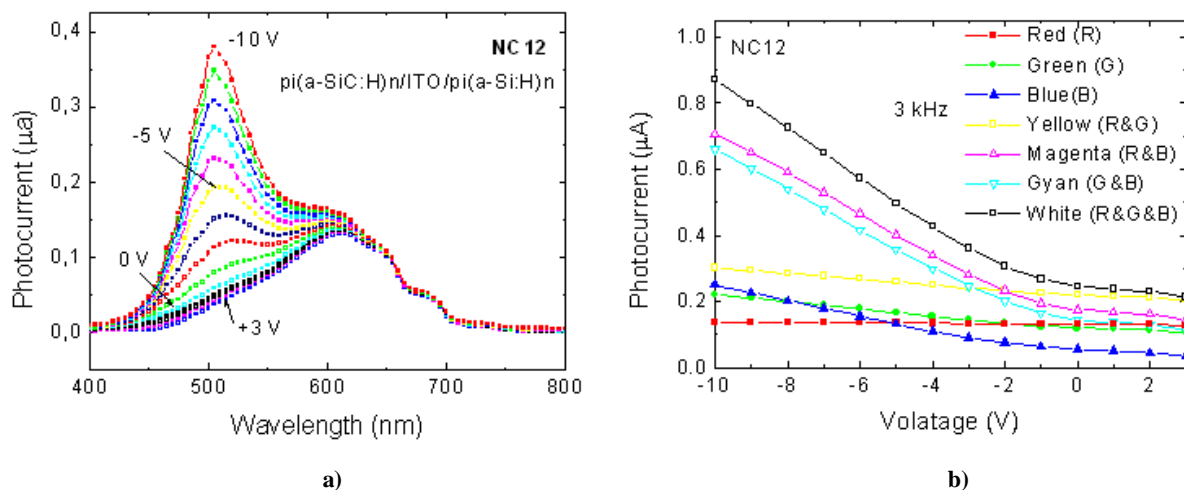


Figura 20 - a)Resposta espectral com aplicação de diferentes valores de polarização; b)Características da fotocorrente-tensão do dispositivo NC12 para diversos comprimentos de onda.

Dos resultados obtidos na Figura 20 a), podemos observar a resposta espectral com aplicação de diferentes valores de polarização no dispositivo NC12, onde a curva de fotocorrente do fotodíodo baseado em a-SiC:H (pin1) exhibe um máximo em torno dos 500 nm devido a ser nesta zona do espectro que o dispositivo produz uma quantidade elevada de portadores e para o fotodíodo a-Si:H (pin2) exhibe um máximo em torno dos 600 nm, o que o dispositivo deixa de gerar fotocorrente a partir de 700 nm devido à natureza do material intrínseco utilizado em que o seu

hiato ($\sim 1,8$ eV) impede a fotocorrente para comprimentos de onda superiores a este comprimento de onda.

Deste modo podemos ainda observar que em ambas as estruturas o volume de portadoras de carga aumenta à medida que aumenta o valor da tensão de polarização inversa, sob polarização directa os valores da fotocorrente são diminutos, o que revela maior sensibilidade dos dispositivos quando polarizados inversamente.

Podendo ainda observar-se que a componente de silício amorfo hidrogenado (pin2) gera um valor de portadoras de carga superior ao gerado pelo componente de silício/carbono (pin1), para um valor de tensão de polarização igual, ou seja, o contributo da componente a-Si:H é dez vezes superior ao contributo da componente a-SiC:H. Isto prende-se com o facto desta camada fotogeradora de a-Si:H ser mais espessa que a outra, permitindo assim a geração de mais portadoras de carga. Sendo o fotodíodo (pin1) baseado em a-SiC:H ter uma sensibilidade centrada predominantemente na gama do comprimento de onda da região azul/verde e o fotodíodo (pin2) na gama do vermelho.

Verifica-se ainda uma elevada dependência da fotocorrente com a tensão inversa de polarização na zona de comprimento de onda abaixo dos 620 nm aproximadamente, acima deste valor a fotocorrente é independente da tensão aplicada ao dispositivo.

Por último observa-se que os valores de fotocorrente, da ordem das décimas, são resultado da limitação imposta pela célula pin1 que tendo uma contribuição de fotocorrente baixa, Figura 20, condiciona a fotocorrente total. A topologia do fotodíodo é equivalente a duas resistências em série sendo o valor da corrente total da responsabilidade da resistência mais elevada, neste caso da célula pin1.

Os resultados obtidos na Figura 20 b) confirmam que, com a radiação monocromática o dispositivo exhibe dois tipos de comportamento: sob iluminação do vermelho, a fotocorrente é independente da tensão, enquanto sob a iluminação do verde/azul há variação com a tensão na região de polarização inversa, mais acentuada com a luz azul do que com a verde. Sob iluminação de dois comprimentos de onda a fotocorrente tem uma amplitude mais elevada, especialmente nas combinações em que o azul está presente. Na presença simultânea dos três comprimentos de onda obtêm-se o sinal mais elevado, o que resulta da contribuição dos vários sinais ópticos.

Se a componente azul do espectro se encontra presente (B&R, B&G, R&G&B), observa-se um aumento acentuado com a aplicação da tensão de polarização inversa. Sob polarização directa o sinal azul do espectro torna-se insignificante e o R&B, G&B e os sinais R&G&B multiplexados sobrepõem-se, respectivamente, com o R, o G e os sinais de R&G. Este comportamento observa-se, sob polarização directa, a baixa sensibilidade para o componente azul do sinal multiplexado. É interessante notar que, sob polarização inversa o sinal verde tem um comportamento semelhante ao azul, enquanto sob polarização directa o seu comportamento é semelhante ao vermelho confirmando a absorção de fótons verdes em ambos os fotodíodos.

Na Figura 21 (a, c) encontra-se representada a variação da fotocorrente com aplicação de diferentes valores de polarização e na Figura 21 (b, d) encontra-se representada a tendência da fotocorrente-tensão do dispositivo NC12 para diversos comprimentos de onda, ambos encontram-se separadamente representados de forma a demonstrar o comportamento do fotodíodo frontal baseado em p-i (a-SiC:H)-n e do fotodíodo posterior baseado em p-i (a-Si:H)-n. Aqui, o contacto interno transparente ITO foi usado para aplicar a tensão.

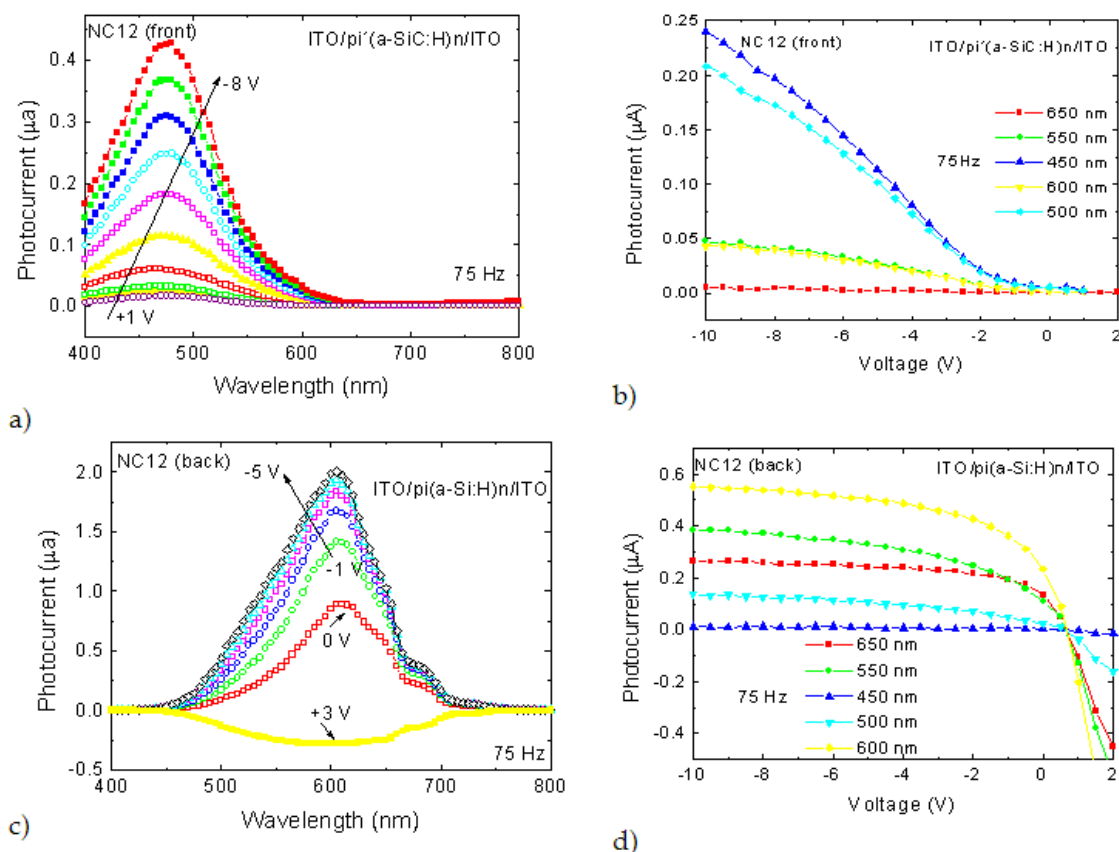


Figura 21 - Variação da fotocorrente aplicada sob diferentes polarizações; (a, c) A sua tendência com a tensão aplicada, em diferentes comprimentos de onda; (b, d) Resposta do fotodíodo frontal, p-i '(a-SiC:H)-n, e fotodíodo posterior, pi (a-Si:H)-n.

Os resultados obtidos confirmam, que tanto para o fotodíodo frontal como para o fotodíodo posterior, ambos funcionam como filtros ópticos, respectivamente nas regiões do espectro dos tons azul e vermelho. O fotodíodo frontal, baseado em a-SiC:H (pin1), corta a componente vermelha do espectro, enquanto que o fotodíodo posterior, baseado em um a-Si:H (pin2), corta o componente azul. Cada fotodíodo apresenta separadamente as respostas típicas como uma única estrutura p-i-n enquanto a configuração empilhada (Figura 20a) mostra a influência de ambos para além da sua interligação através de uma junção n-p interna.

1.5.3 - Dispositivo WDM controlado por tensão

Em estudos anteriores, foi analisado o efeito das diferentes tensões aplicadas ($-5V < V < +2V$) sobre o sinal de saída multiplexado, sendo a base de funcionamento do dispositivo como demultiplexador. Na Figura 22 mostra-se a leitura dos sinais da fotocorrente gerada devido ao efeito simultâneo de um, dois ou três canais monocromáticos (vermelho, verde e azul), medida, sob diferentes tensões aplicadas.

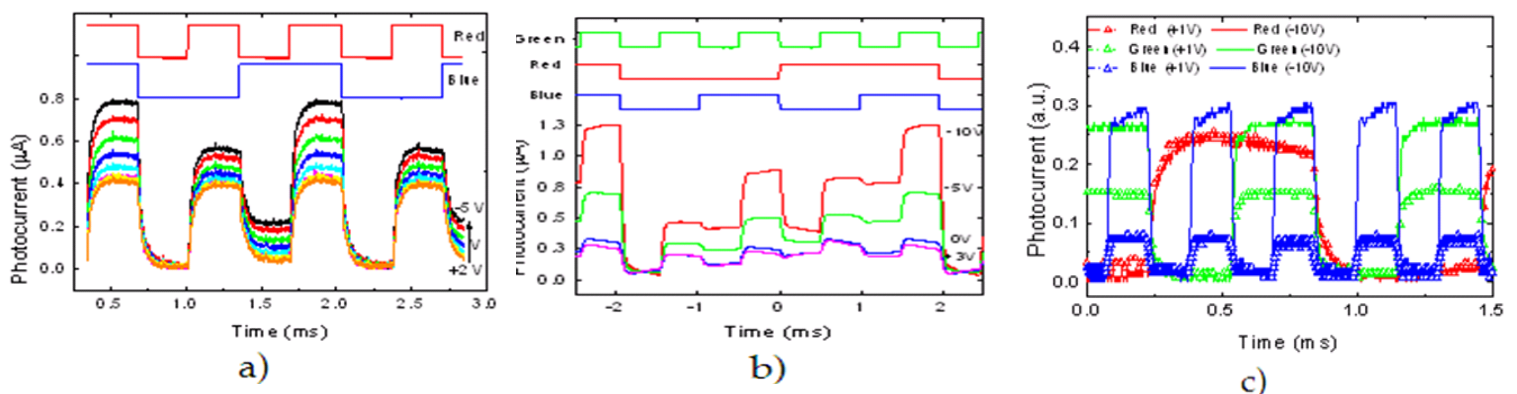


Figura 22 – Leitura dos sinais multiplexados com diferentes tensões aplicadas e comprimentos de onda de entrada R&B ($\lambda_{R,B}$ =650nm, 450 nm); a) Com frequência de 1.5 kHz para o canal vermelho e 750 Hz para o canal azul; b)Combinação dos comprimentos de onda R&G&B ($\lambda_{R,G,B}$ =650 nm, 550 nm, 450 nm); c)Dependência do comprimento de onda do canal de entrada com a tensão aplicada.

No topo das Figuras 22 a) e b) mostra-se o estudo da polarização dos LEDs de cada canal para que se possa compreender melhor o sinal obtido pelo dispositivo. Observa-se que as tensões de polarização directa correspondem aos valores de fotocorrente mais baixos. O nível de referência do sinal correspondente à situação em que todos os canais de entrada estão OFF (nível de escuro).

Na Figura 22 a), encontra-se representada a combinação de dois canais, vermelho e azul, aplicando duas frequências diferentes tendo sido usadas no canal vermelho a frequência de 1,5 KHz e no canal azul metade do valor da frequência vermelha (750Hz). Em ambas as figuras ilustram que o sinal multiplexado depende da tensão e da frequência escolhida para o canal de entrada. Existindo sempre quatro níveis presentes, o nível mais alto ocorre quando temos em simultâneo o sinal óptico azul e vermelho ON e o nível mais baixo é quando temos os dois sinais OFF. Quando só temos o nível do sinal óptico vermelho, sendo que este é comparativamente superior ao azul em fotocorrente. Deste modo conclui-se que os níveis de fotocorrente dependem da tensão aplicada e pode-se observar que para tensões inversas foram obtidos valores superiores de fotocorrente.

Na Figura 22 b) encontra-se representado a combinação dos três canais: R&G&B para as diferentes gamas de tensão aplicadas de -10V e +3V. Verifica-se que ao aplicar uma tensão de polarização de -10V, se observam oito níveis distintos de fotocorrente consoante o estado da luz incidente, o que corresponde cada um a um canal diferente. À medida que a tensão aplicada baixa, a amplitude do sinal também baixa. Ao aplicar uma tensão de polarização a +3V, observa-se a supressão da componente azul e para além do sinal deixar de ter os oito níveis de fotocorrente distintos.

Ao aplicar uma luz monocromática, os valores de fotocorrente são superiores para o canal Azul depois o Verde e por fim o Vermelho. Os valores de maior fotocorrente sob iluminação de duas luzes monocromática são obtidos para o Verde & Azul, seguidos pelo Vermelho & Azul e por fim Vermelho & Verde.

O sinal multiplexado obtido pelas combinações de luz do Vermelho & Verde & Azul, corresponde a oito níveis de amplitude de fotocorrente diferentes

Na Figura 22 c) encontra-se representado a combinação dos três canais: R&G&B para as diferentes gamas de tensão aplicadas de -10V a +1V. Como esperado a partir das Figuras 19 e 20, o sinal do canal vermelho mantém-se constante, enquanto para o canal azul e verde, diminui as variações de tensão de negativo para positivo. A menor redução no canal verde, quando comparado com o azul está relacionado com a menor dependência, da polarização do fotodíodo posterior (pin2), onde uma parte dos fotões verde é absorvida.

Em suma, os dados mostram que o sinal multiplexado depende da tensão aplicada, da taxa de comprimento de onda e de cada transmissão de dados de cada canal de entrada. Sob polarização inversa, poderá existir quatro ou oito níveis distintos, dependendo do número de canais de entrada. O nível mais alto aparece quando todos os canais estão ON e a menor quando aparecem a OFF.

Além disso, os níveis atribuídos à mistura de dois canais de entrada (R&B, R&G, G&B) são mais elevados do que devido à presença de apenas um (R, G, B). A etapa entre eles depende da tensão aplicada e do comprimento de onda do canal. Como esperado a partir da Figura 22 e Figura 23, como a polarização inversa aumenta o sinal apresenta um aumento acentuado se a componente azul estiver presente. Sob polarização directa do sinal azul, este desce para zero, de modo a que os níveis separados são reduzidos a metade.

Na Figura 23 a) é mostrado os sinais multiplexados (linhas sólidas) devido a dois canais de entrada em regimes de frequência diferentes. Os sinais transientes foram adquiridos sob diferentes tensões aplicadas ($-5V < V < 2V$). As linhas a tracejado azul e vermelho sobrepostas no gráfico, ilustram os estados ON/OFF de cada canal. A frequência do sinal vermelho foi de 1,5 KHz e a do sinal azul metade deste valor (750Hz). Na Figura 23 b) mostra-se os sinais de saída nas mesmas condições, mas utilizando frequências de entrada das duas ordens de grandeza menor.

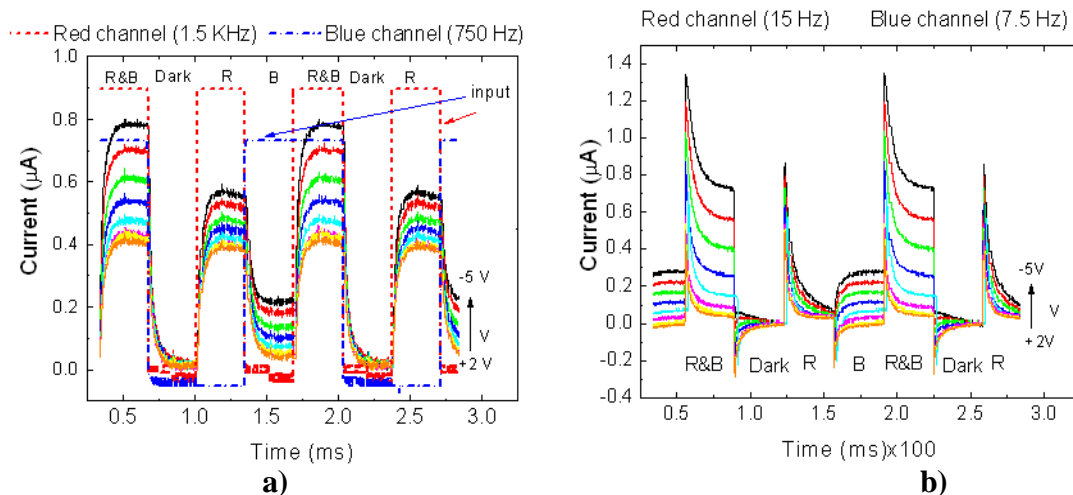


Figura 23 - Multiplexação por divisão de comprimento de onda (linhas sólidas) em diferentes tensões aplicadas, obtidas usando o dispositivo WDM; a)Em regime de alta frequência. O azul (linha tracejada azul) e o vermelho (linha tracejada vermelha) guia os olhos para os canais de entrada; b)Em regime de baixa frequência.

Ambas as figuras mostram que o sinal multiplexado depende da tensão aplicada. No regime de alta frequência (Figura 23) o dispositivo funciona como um dispositivo integrador de carga, enquanto em regime de baixa frequência funciona como um diferenciador. No regime de altas frequências, os sinais de saída (sinais multiplexados) mostram a potencialidade do uso de dispositivos para aplicações em WDM, uma vez que integra todos os comprimentos em um único sinal, mantendo as informações relativas à entrada.

Na Figura 24 exibe o sinal da fotocorrente obtida sob polarização inversa (-8V) e directa (+1V), usando três fontes ópticas diferentes em simultâneo, para simular cada canal de transmissão. A frequência de modulação de luz de cada canal foi escolhida para ser múltipla das outras, para garantir uma relação síncrona de ON-OFF dos estados ao longo de cada ciclo. Para cada comprimento de onda independente, os valores de saída óptica foram ajustados para terem sinal de amplitudes diferente em -8V (setas continuas). Os sinais correspondentes a uma fotocorrente a +1V são também exibidos (setas tracejadas). O nível de referência foi assumido quando todos os canais de entrada estão OFF.

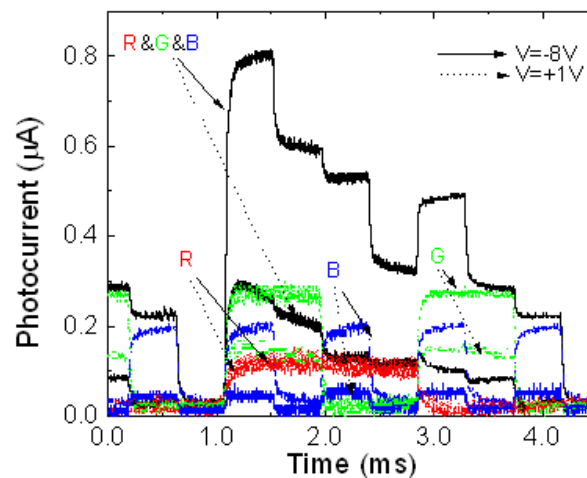


Figura 24 – Representação dos sinais multiplexados, obtidos sob polarização inversa (seta contínua) e directa (seta tracejada) sob diferentes polarizações óptica (R&G&B).

Como era esperado a partir da Figura 23b), sob polarização inversa, existem oito níveis distintos, enquanto para a polarização directa, foram reduzidos para metade. Além disso, o nível mais alto aparece quando todos os canais são ON e a menor se forem OFF. Sob polarização directa o dispositivo torna-se “cego” na parte frontal do fotodíodo e a componente azul dos sinais combinados decresce para o nível escuro, permitindo o ajuste dos canais de entrada vermelho e verde.

Na Figura 25 é mostrado os sinais multiplexados, sob polarização inversa e directa, obtida com duas sequências bit RGB e com a mesma taxa de bits (2000 bps).

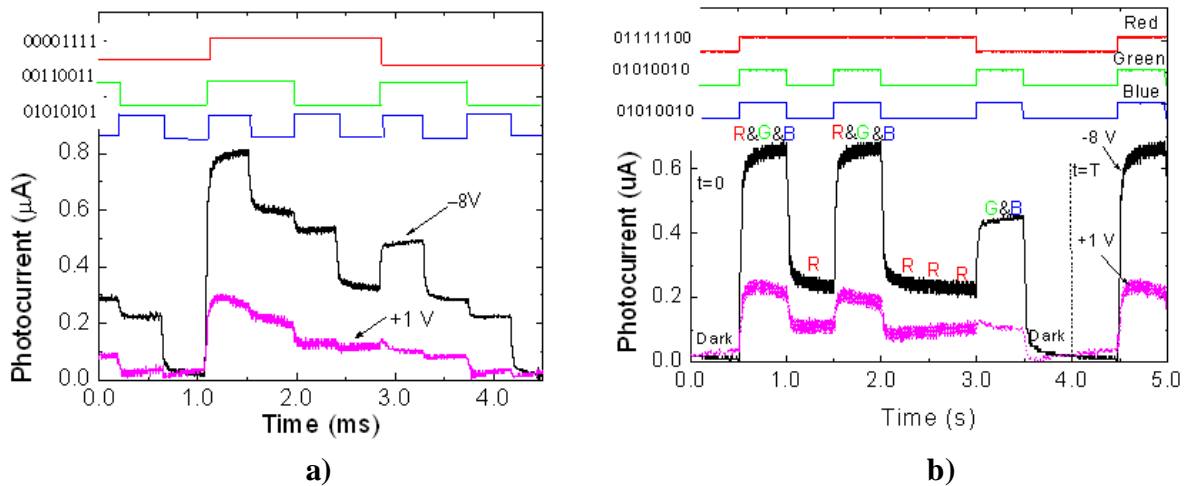


Figura 25 – Representação dos sinais multiplexados sob polarização inversa e directa usando as sequências: a)R [00111100], G [01010010], B [00110011]; b)R [01111100], G [01010010], B [01010010].

Na sequência de bits da Figura 25 a) existe uma relação síncrona de ON-OFF nos estados ao longo de cada ciclo. A fotocorrente sob polarização inversa, exibe o esperado dos oito níveis diferentes que correspondem a diferentes estados de cada polarização óptica. Como a polarização eléctrica vai reverter e transmitir o sinal que diminui amplitude e os níveis da fotocorrente do limiar associado a cada estado óptico tornam-se mais próximos e menos definidos mostrando a extinção da fotocorrente, causado pelos sinais ópticos de ondas curtas. Este mecanismo pode ser utilizado para a identificação dos canais de entrada usando o sinal de fotocorrente obtida sob os sinais do fotodíodo frontal e posterior e comparando a amplitude da variação em cada estado óptico. Na sequência de entrada da Figura 25 b) os canais azuis e verdes transmitem a mesma informação, portanto, os limites atribuídos ao único canal verde ou azul ON (G ou B) e sua combinação com o vermelho (R & G, R & B) não aparecem no sinal multiplexado que contém apenas quatro níveis de fotocorrente: R & G & B, G & B, R e escuro (OFF).

1.5.3.1 - Influência da Taxa Transmissão

Na Figura 26 são representados os sinais adquiridos (linhas contínuas) devido à presença simultânea de dois canais de entrada R e G, respectivamente ($\lambda_R = 650$ e $\lambda_G = 550$ nm), sob diferentes valores de frequências de modulação (1kHz, 10 kHz e 100 kHz) e aplicando uma tensão de polarização de -5 V. No topo das figuras as linhas a tracejado vermelho e verde correspondem aos diferentes canais de entrada, e são exibidos apenas para ilustrar os diferentes estados ON-OFF de polarização dos LEDs, onde se pode observar a influência na definição dos patamares para os diferentes níveis.

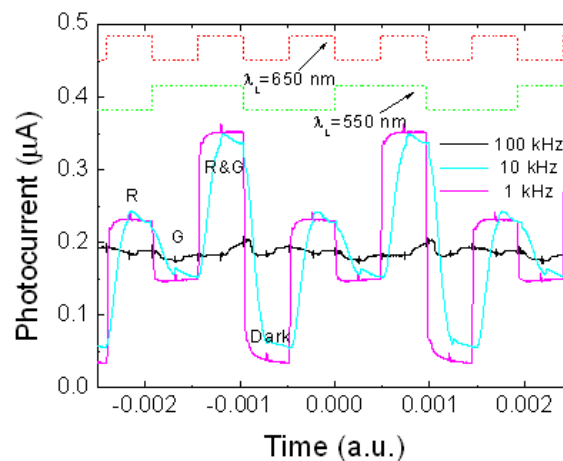


Figura 26 - Multiplexação por divisão de comprimento de onda (linhas contínuas) a - 5 V sob diferentes valores da frequência de modulação.

Observando o gráfico da Figura 26, podemos constatar que para a frequência de modulação de 100KHz o sinal aparece distorcido, ou seja os níveis de fotocorrente não se encontram bem definidos, logo não sendo possível identificar cada canal, no entanto para a frequência de modulação de 1 KHz, os níveis de fotocorrente são bem notórios. Dando assim a percepção dos diferentes quatro níveis existentes [1], [2].

Esta análise foi bastante importante pois consegue-se definir limites das frequências para as quais o dispositivo tem um comportamento indesejado. No entanto foi verificado para a frequência de 1KHz e 2KHz obtêm-se patamares bem definidos.

Existe no entanto outra grande conclusão a tirar. Quando o sinal se encontra na presença de outro, o nível de fotocorrente aumenta. Assim pode-se estabelecer níveis de fotocorrente para as diferentes combinações, por exemplo quando temos dois sinais ópticos iguais (verde & verde) o nível de fotocorrente é de $0,1 \mu A$ e quando temos (azul & verde) o nível de fotocorrente é de $0,35 \mu A$.

Esta análise possibilita identificar qual o sinal que temos no emissor. Para tal é necessário recolher todos os níveis de fotocorrente para as diferentes combinações.

Em suma, o sinal multiplexado mostra que em cada ciclo ao aplicar frequências diferentes, é possível verificar a presença dos quatro níveis de fotocorrente. O nível mais alto ocorre quando ambos os canais vermelhos e verdes estão ON (R & G) e o menor quando ambos estão OFF (escuro). O nível de verde (G) aparece se o canal vermelho está OFF e é menor do que o nível vermelho (R), que ocorre quando o canal verde está OFF. Este comportamento é observado mesmo para as altas frequências, embora a amplitude medida seja de facto reduzida. Assim, a sensibilidade do dispositivo diminui com o aumento da taxa de transmissão.

1.5.3.2 - Influência da intensidade do canal óptico

A identificação dos diferentes canais de entrada, requer uma calibração do sinal de transmissão a fim de saber a resposta do dispositivo WDM para cada canal individual. Como a atenuação do sinal ao longo do meio de transmissão causam uma redução da intensidade óptica no final de recepção (dispositivo WDM) é necessário analisar esta influência deste efeito. Assim o sinal multiplexado foi adquirido com sinais de entrada de intensidades ópticas diferentes, a -8V e a +1V. As medições foram feitas com diferentes níveis de aumento de potência óptica, até 140 μWcm^2 .

Na Figura 27 é apresentada a saída da variação da densidade da fotocorrente com a polarização óptica medida para cada canal óptico (R: 626 nm, G: 524 nm e B: 470 nm) a -8 V e +1V.

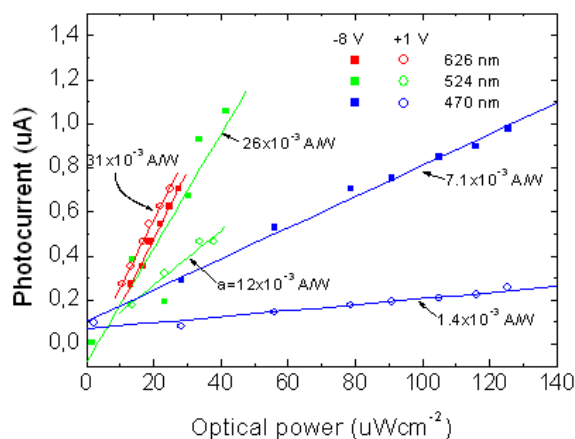


Figura 27 - Variação da fotocorrente com a polarização óptica medida para cada canal óptico (R: 626 nm, G: 524 nm e B: 470 nm) a -8 V (símbolos sólidos) e + 1V (símbolos abertos). As linhas sólidas correspondem a acessos lineares dos dados experimentais.

Os resultados mostram que sob iluminação vermelha a amplitude do sinal multiplexado nas condições da mesma intensidade é quase independente da polarização aplicada. A sua amplitude aumenta com a intensidade de potência óptica, exibindo um comportamento linear com uma taxa de crescimento de cerca de 31×10^{-3} A/W. Sob luz verde e azul, a dependência da amplitude da fotocorrente é fortemente dependente da polaridade da tensão aplicada como já demonstrado antes. A fotocorrente aumenta com a intensidade óptica de cada canal, quer para a polarização inversa e directa e a taxa de crescimento depende da tensão aplicada, sendo maior sob polarização inversa. Com luz azul (470 nm) a taxa de crescimento é de 5 vezes maior sob polarização inversa do que sob polarização directa, enquanto sob iluminação verde (524 nm) esse factor é apenas um factor de 2, o que se deve à forte redução da sensibilidade do dispositivo para os comprimentos de onda mais curtos sob polarização directa.

1.5.4 - Influência da polarização óptica na sensibilidade espectral

Na Figura 28, encontra-se representada a variação da fotocorrente com os vários comprimentos de onda aplicada sob polarização inversa e directa com aplicação das seguintes polarizações ópticas no sensor: vermelho (a), verde (b), azul (c) e sem aplicação de fundo (d). Os resultados mostram que com fundo azul a sensibilidade espectral aumenta na faixa de comprimentos de onda longos. Com a polarização do fundo vermelho observa-se um comportamento oposto uma vez que a sensibilidade espectral só aumenta na faixa de comprimento de onda curtos. Sob o fundo verde a fotocorrente espectral aumenta com a tensão aplicada em todos os comprimentos de onda.

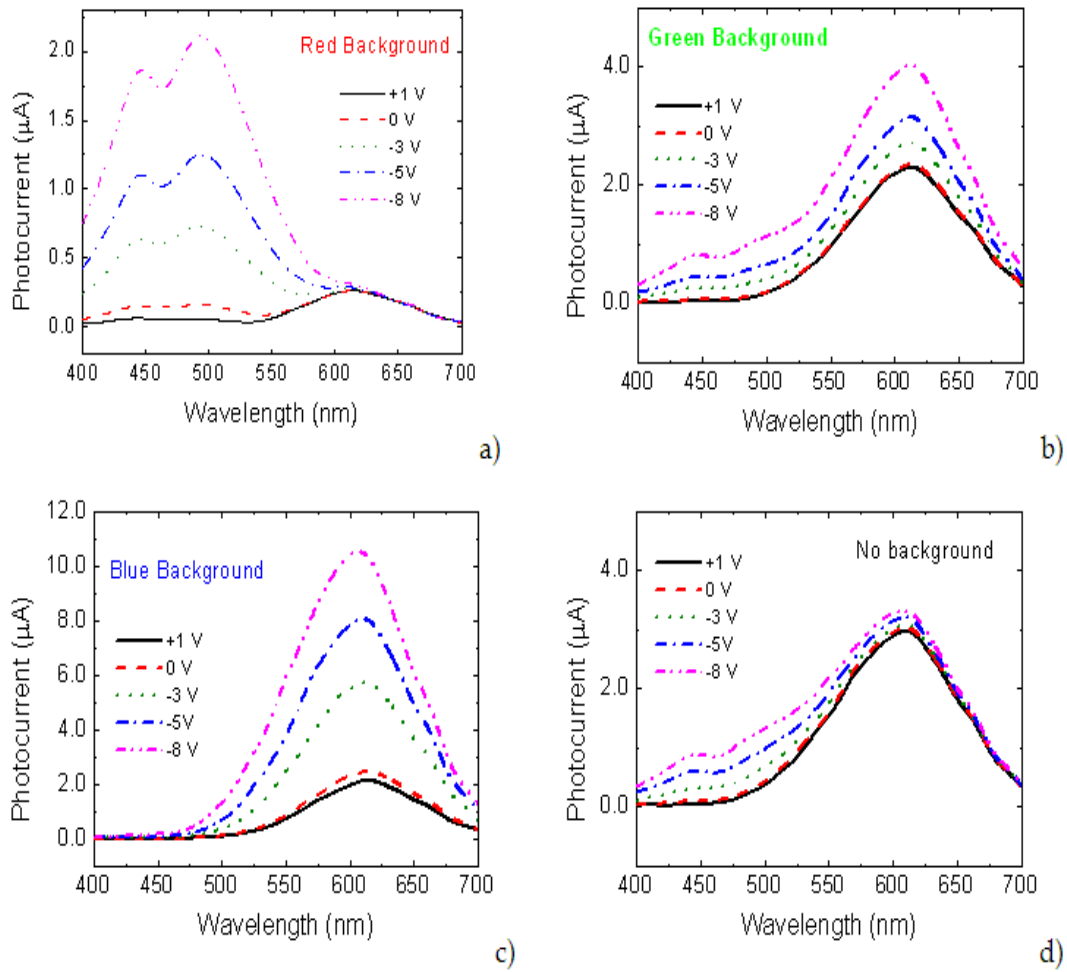


Figura 28 - Fotocorrente espectral sob polarização inversa e directa, aplicando as radiações ópticas fundo a)vermelho, b)verde, c)azul e d) sem aplicação de radiação de fundo

Na Figura 29, é apresentado o sinal da fotocorrente em função do comprimento de onda medido sob polarização eléctrica inversa e directa, com e sem radiação de fundo: vermelha (626 nm), verde (524 nm) e azul (470 nm).

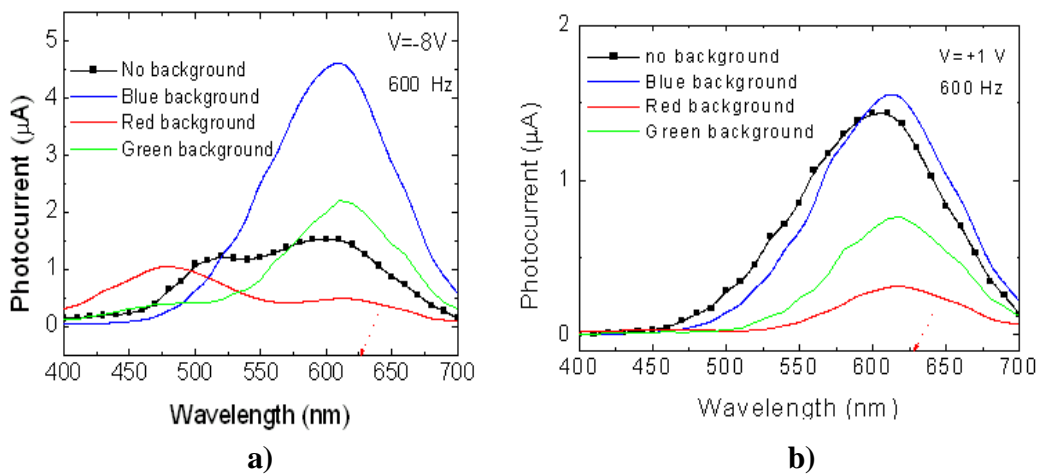


Figura 29 - Fotocorrente Espectral a uma frequência de 600 Hz; a)sob polarização inversa com e sem aplicação de radiação de fundo; b)sob polarização directa, com e sem aplicação de radiação de fundo.

Resultados confirmam que, sob polarização óptica do canal azul, observa-se um aumento da sensibilidade espectral nas faixas de comprimento de onda longo e uma redução na zona de comprimento de onda curto. Ao aplicar a polarização óptica do canal vermelho, esta tem um efeito oposto: reduz a corrente na região do vermelho / verde e amplifica na faixa do azul. Aplicando a polarização óptica do canal verde esta só reduz a fotocorrente na faixa de comprimentos de onda intermédios mantendo os outros dois quase inalterados. Esta dependência da tensão de polarização aplicada e da polarização óptica através da radiação de fundo, controla a luz e permite variar a sensibilidade espectral do dispositivo.

Na Figura 30 encontra-se representada a razão entre a fotocorrente com e sem radiação de fundo do canal vermelho, verde e azul.

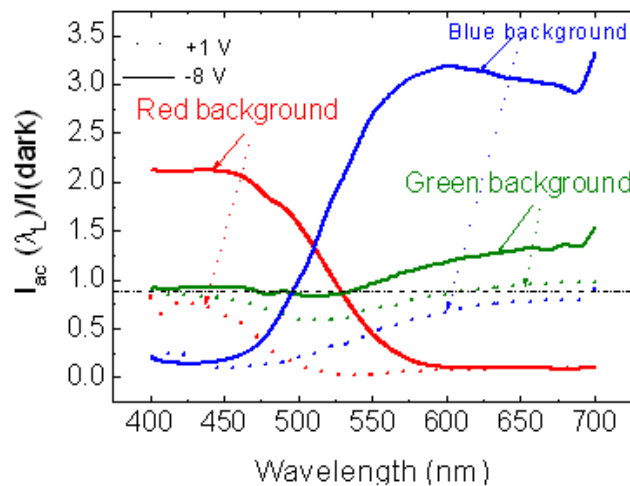


Figura 30 – Razão entre a fotocorrente com e sem aplicação de radiação de fundo.

Assim, podemos verificar que para polarização inversa, abaixo dos 500 nm, o sinal é amplificado pelo fundo vermelho. Para comprimentos de onda superiores, o sinal passa a ser amplificado pelo fundo azul e atenuado pelo fundo vermelho. A razão de amplificação do fundo vermelho, para comprimentos de onda curtos, é inferior à razão de amplificação do fundo azul, para comprimentos de onda longos. O fundo verde para comprimentos de onda curtos, não influencia, mas para comprimentos de onda longos amplifica ligeiramente.

Para polarização directa, o fundo vermelho atenua qualquer comprimento de onda, mais relevante nos comprimentos de onda longa, a partir dos 500 nm. Para comprimentos de onda superiores a 600 nm, o sinal é ligeiramente amplificado pelos fundos verde e azul.

1.5.5 - Dispositivo WDM controlado pela polarização óptica

A Figura 31 mostra o tempo do sinal da fotocorrente, utilizando sinais ópticos de entrada diferentes (sem polarização óptica) e com polarização óptica: vermelho (626nm), verde (524nm) e azul (470 nm). Ambos os sinais ópticos foram direccionados para o dispositivo para o fotodíodo frontal baseado em a-SiC:H (pin1). Onde se regulou a corrente de polarização dos LEDs, através de um sinal de onda quadrada e foram aplicadas as seguintes potências ópticas nos canais: vermelho (51 μ W/cm²), verde (90 μ W/cm²) e azul (150 μ W/cm²), respectivamente. A potência óptica aplicada nos LEDs emissores foi para o canal vermelho (290 μ W/cm²), para o canal verde (150 μ W/cm²) e para o canal azul (390 μ W/cm²).

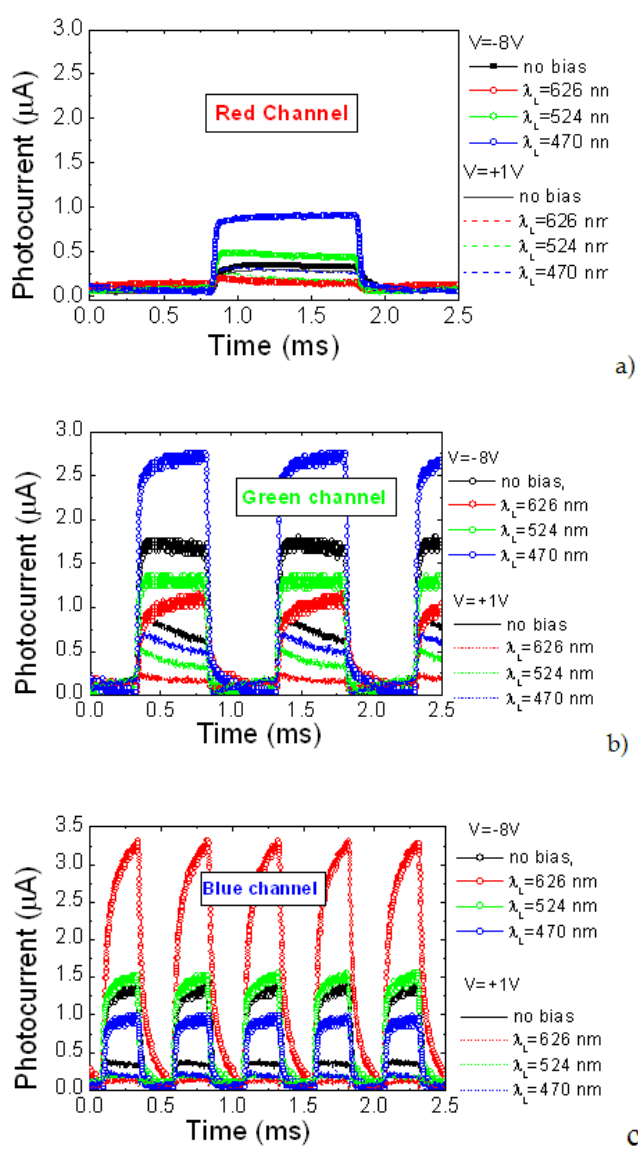


Figura 31 - Comparação dos canais sob polarização inversa e directa com aplicação de várias radiações de fundo; a)Radiação de fundo vermelho; b)Radiação de fundo verde e c)Radiação de fundo azul.

Os resultados obtidos mostram que ao aplicar a polarização óptica do canal azul, amplifica os sinais do canal vermelho (Figura 31 a) e do canal verde (Figura 31 b), reduzindo o sinal da fotocorrente do canal de azul (Figura 31 c). O que ao se aplicar a polarização óptica do canal vermelho, este tem um comportamento oposto, reforçando o sinal do canal azul e diminuindo os sinais dos canais azul e verde. Aplicando a polarização óptica do canal verde, este vai afectar principalmente o canal verde, enquanto nos canais dos sinais vermelho e azul, este não mostra alterações significantes.

Na Figura 32, encontra-se representada o sinal da fotocorrente obtido com os diferentes canais ópticos ligados, além da aplicação de radiação de fundo vermelho, verde e azul.

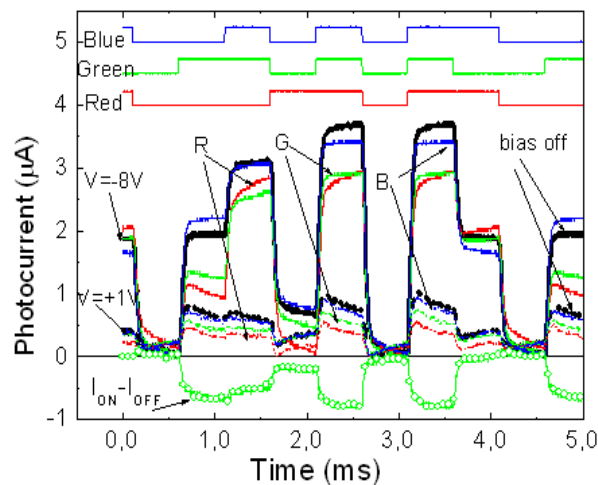


Figura 32 - Sinais multiplexados a -8V / +1 V, com e sem polarização óptica dos canais RGB.

Resultados confirmam que a iluminação com radiação estacionária de comprimento de onda apropriado, permite seleccionar ou suprimir um canal de cor.

1.6 - Referências

- [1] http://www.gta.ufrj.br/grad/04_1/wdm/work.html, consultado em 30.08.2011.
- [2] D. Nolan K. O. Hill et all, Fiber Optics Handbook Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications McGraw Hill 2002
- [3] Agrawal, Govind P., “Fiber Optic Communications System”, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, Kai Chang – Series Editor, 1997.
- [4] Senior, John M., “Optical Fiber Communications – Principles and Practice – Second Edition”, Prentice Hall, 1992.
- [5] Leonid Kasovsky, Sergio Benedetto, Alan Willner, “Optical Fiber Communications System”, Artech House, 1996.
- [6] Jean-Pierre Laude, “DWDM, Fundamentals, Components and Applications”, Artech House, 2002.
- [7] William S. C. Chang, “Principles of Lasers and Optics” Cambridge 2007.
- [8] <http://www.rederio.br/downloads/pdf/nt00102.pdf>, consultado em 30.08.2011.
- [9] <http://pt.scribd.com/doc/60886269/3/Principio-do-WDM>, consultado em 30.08.2011.
- [10] <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18152/tde-10052011-152506/publico/Andre.pdf>
Concepção dos Filtros de Filmes Finos, consultado em 30.08.2011
- [11] M. Bas, Fiber Optics Handbook, Fiber, Dev. and Syst. for Opt. Comm., Chap, 13, Mc Graw-Hill, 2002.
- [12] M. Vieira, M. Fernandes, P. Louro, A. Fantoni, Y. Vygranenko, G. Lavareda, C. Nunes de Carvalho, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 862 (2005) A13.4.
- [13] P. Louro, M. Vieira, M.A. Vieira, M. Fernandes, A. Fantoni, C. Francisco, M. Barata, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 41 (2009) 1082-1085.
- [14] P. Louro, M. Vieira, M. Fernandes, J. Costa, M. A. Vieira, J. Caeiro, N. Neves, M. Barata, Phys. Status Solidi C 7, No. 3–4, 1188– 1191 (2010).

Cap. 2 - Caracterização Optoelectrónica

Tal como referido anteriormente, nos sistemas de transmissão de dados por fibra óptica podemos utilizar dois tipos de fontes, os LEDs (*Light-Emitting Diodes*) ou os LASERS (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*) de estado sólido como emissores, fibras ópticas como canais de transmissão [1] e dispositivos de multiplexagem/demultiplexagem para obter melhores desempenhos no tratamento dos sinais emitidos. Nas experiências realizadas neste trabalho e em trabalhos anteriores, foram usados três LEDs de cores diferentes ou seja de três comprimentos de onda diferentes: o vermelho de 626 nm, o verde de 525 nm e o azul de 470 nm, e foram aplicados outros três LEDs semelhantes aos dos canais emissores (vermelho, verde e azul), para estudar a influência da variação do comprimento de onda na radiação de fundo.

Para a demultiplexagem dos canais foram testados e caracterizados optoelectronicamente, em trabalhos anteriores [2, 3], vários tipos de estruturas heterogêneas semicondutoras baseadas em fotodíodos *pin* de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H e/ou a-SiC:H). Foram estudados vários dispositivos que apresentam espessuras diferentes na camada intrínseca do fotodiodo *pin* baseado em a-Si:H, tendo-se concluído que o dispositivo que melhor permitia a descrição dos três canais R&G&B era o dispositivo com 200 nm de espessura na camada do pin 1 baseada em a-SiC:H e de 1000 nm de espessura na camada do pin 2 baseada em a-Si:H (Figura 33). Estas estruturas semicondutoras são fabricadas sobre um substrato de vidro onde se deposita previamente um eléctrodo eléctrico transparente baseado em (*ITO – Indium-Tin Oxide*). Depois de depositar a estrutura multicamada (*pin1/pin2*), posteriormente é aplicado outro eléctrodo eléctrico transparente (ITO). Estes dois contactos eléctricos servem para medir a fotocorrente gerada pelo dispositivo e também para permitir a sua polarização eléctrica, são transparentes para permitirem a passagem dos sinais ópticos. Estes dispositivos foram fornecidos pelo Centro de Física Molecular do Instituto Superior Técnico, e foram produzidos utilizando a técnica PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) [2,3,11].

Através dos estudos anteriores, ficou provado [2] que com a estrutura NC5 se conseguiam obter melhores resultados na demultiplexagem WDM dos sinais luminosos enviados, na gama do visível, sendo por isso, o dispositivo escolhido para desenvolver este trabalho.

A estrutura NC5 é constituída por dois fotodíodos *pin* empilhados, como se pode verificar na Figura 33. Diz-se que estes dois fotodíodos são empilhados porque existe uma grande interacção entre os dois. O primeiro fotodíodo (pin1) tem uma camada intrínseca muito fina (200 nm) baseada em a-SiC:H, e o segundo (pin2) tem uma camada intrínseca espessa (1000 nm) baseada em a-Si:H [2, 6, 11].

Optical
channels

Electric bias

Figura 33 - Diagrama da secção transversa da estrutura NC5.

Nesta estrutura observam-se duas áreas distintas de geração de fotocorrente, uma na zona dos 500 nm e outra na zona dos 625 nm, dependentes das tensões de polarização aplicadas. Acima dos 625 nm o valor da fotocorrente é independente da tensão de polarização directa ou indirecta [2].

Estas duas zonas distintas devem-se às diferentes características de cada fotodíodo. Do estudo de cada um concluiu-se que para o fotodíodo frontal baseado em a-SiC:H (pin1), se observa um máximo de fotocorrente em torno dos 470 nm e que em torno dos 600 nm o dispositivo deixa de gerar fotocorrente. Este facto justifica-se pelo valor de 2.1 eV do hiato energético do a-SiC:H. Em termos práticos, este fotodíodo absorve o azul (470 nm) e o verde (525 nm) e deixa passar, para o pin2, o vermelho (626 nm). Para o fotodíodo posterior baseado em a-Si:H (pin2), observou-se um máximo de fotocorrente em torno dos 600 nm, o que significa que absorve o vermelho (626 nm) que o pin1 deixa passar. O dispositivo deixa de gerar fotocorrente em torno dos 700 nm, o que é justificado pelo valor de 1,8 eV do hiato energético do a-Si:H [2, 5, 8].

Em suma, ambas as estruturas empilhadas foram desenvolvidas de forma a alcançar uma grande absorção à luz azul e grande transparência à luz vermelha, no fotodíodo frontal (pin1), assim como grande absorção da luz vermelha no fotodíodo posterior (pin2) [9].

Em trabalhos anteriores, também se chegou à conclusão que o valor da fotocorrente para o sinal vermelho (626 nm) é sempre constante qualquer que seja a tensão aplicada, e que para os sinais verde (525 nm) e azul (470 nm) a fotocorrente varia com a tensão sendo este valor tanto maior quanto maior for a tensão inversa aplicada. [3, 4, 11]

No caso das experiências anteriores, onde se tinha como objectivo a caracterização optoelectrónica do dispositivo NC5, sob diferentes condições de iluminação, ou seja, com ou sem radiação de fundo, verificou-se a influência da variação do comprimento de onda na radiação de fundo, na influência da potência óptica dos canais de emissão e sobre a variação da frequência de

transmissão. Foram aplicados outros três LEDs semelhantes aos dos canais emissores (vermelho, verde e azul), para estudar a influencia da variação do comprimento de onda na radiação de fundo para os valores de tensão de polarização de -8V e +1V e concluindo-se que, considerando a polarização inversa, a radiação de fundo vermelha amplifica os valores de fotocorrente do canal azul, e a radiação de fundo azul amplifica o canal vermelho e verde. No caso da polarização directa, apenas a radiação de fundo azul amplifica os valores da fotocorrente do canal vermelho. De forma geral, foi concluído que à medida que a intensidade do canal aumenta também aumenta a amplitude da fotocorrente, qualquer que seja a radiação de fundo aplicada. Sendo mais notória para a polarização inversa do que para a polarização directa [11].

2.1 - Demultiplexagem do sinal de fotocorrente

O objectivo da primeira fase deste trabalho consiste na caracterização optoelectrónica do dispositivo NC5 como demultiplexador, sob diferentes condições de iluminação, nomeadamente do comprimento de onda dos LEDs geradores do sinal óptico e a radiação de fundo. Este estudo teve como intuito de avaliar o desempenho do dispositivo em função da polarização óptica aplicada, a fim de verificar os resultados e conclusões obtidos nos trabalhos anteriores que foram descritos na Capítulo 1.

Para se caracterizar a estrutura semicondutora como dispositivo demultiplexador mediu-se, com um osciloscópio, a fotocorrente gerada sob diferentes valores de tensão aplicada, usando fontes de luz visível de diferentes comprimentos de onda, moduladas à mesma frequência e com radiação de fundo para realizar a polarização óptica. Esta abordagem teve como principal objectivo aferir sobre a influência do comprimento de onda da iluminação de fundo. A montagem experimental está esquematizada na Figura 34.

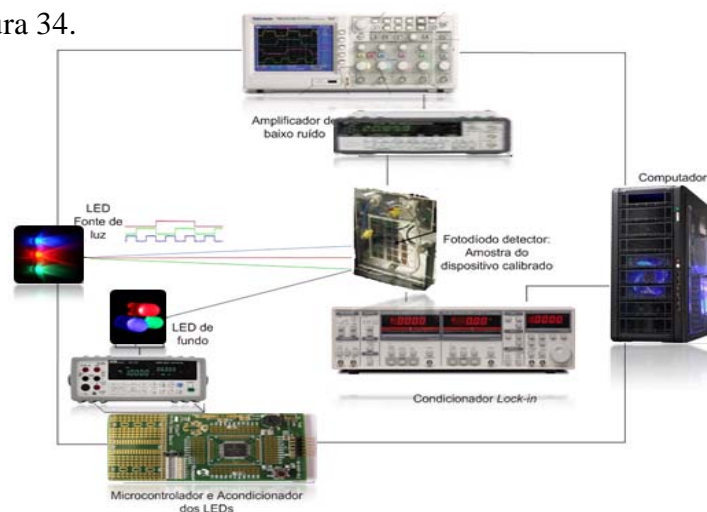


Figura 34 - Diagrama da montagem para caracterizar o dispositivo.

As fontes de luz usadas nesta experiência, para simular os diferentes canais de transmissão, foram LEDs com comprimentos de onda que cobrem a região do espectro visível: LED de luz vermelha (626 nm), verde (525 nm) e azul (470 nm). Uma vez que se pretende que cada LED represente um canal óptico diferente, regulou-se a corrente de polarização dos LEDs, através de um sinal quadrado. A figura mostra, ainda, um amplificador de *Lock-in* cuja principal função, nesta montagem, é controlar a tensão de polarização do fotodíodo *pin*.

Usando um microcontrolador gerador de sequências binárias individuais nos três canais, foi possível controlar a intensidade luminosa dos LEDs emissores, ligados a esses canais de forma individual. Este microcontrolador controlou também o ritmo binário, o qual é igual para todos os canais. Para se controlar a tensão de polarização do fotodíodo recorreu-se a um amplificador de *Lock-in*. Para ler os sinais de polarização óptica dos LEDs e a fotocorrente gerada pelo dispositivo utilizou-se um osciloscópio digital de 4 canais. Para amplificar o sinal de corrente do dispositivo foi necessário utilizar-se um pré-amplificador de baixo ruído.

De salientar que todos os gráficos apresentados neste projecto estão normalizados, isto é, o sinal a normalizar é decomposto nas suas duas componentes tempo e amplitude. Na componente das amplitudes soma-se ao sinal o mínimo do sinal e este é por sua vez dividido pela diferença entre o máximo e o mínimo de modo a obter o sinal normalizado. A forma de onda do sinal é reconstruída juntando a amplitude normalizada com o domínio do tempo [8, 11].

2.1.1 - Estudo dos canais R & G & B com e sem polarização óptica

Para esta primeira experiência efectuada, tínhamos como objectivo o estudo dos canais separadamente e com isto configurámos as intensidades luminosas dos vários LEDs num valor fixo para ambos os canais, de $1,56\mu\text{A}$ (para o LED azul (470nm), o LED vermelho (626nm) e para o LED verde (525nm)). Variámos o Bit Rate de 2000bps a 6000bps nos três LEDs. Foi aplicada uma tensão de polarização óptica a variar de -8V a +1V, e não foi usada radiação de fundo nas primeiras experiências. A combinação de bits escolhida foi 10101010 para os três LEDs (azul, vermelho e verde). Foi realizado o estudo individual de cada canal.

Nas experiências onde foram aplicadas a radiação de fundo, só foi aplicada a radiação do LED vermelho, visto que em trabalhos anteriores e conforme verificado no capítulo anterior, foi verificado que para polarização inversa, abaixo dos 500 nm, o sinal é amplificado pelo fundo vermelho. Para comprimentos de onda superiores, o sinal passa a ser amplificado pelo fundo azul e atenuado pelo fundo vermelho. A razão de amplificação do fundo vermelho, para comprimentos de

onda curtos, é superior à razão de amplificação do fundo azul, para comprimentos de onda longos. O fundo verde atenua qualquer comprimento de onda. [11] Assim passou-se ao estudo de cada canal individual.

2.1.2 - Estudo do Canal Azul (B)

Os resultados obtidos para o canal azul, com Bit Rate 2000bps, não considerando radiação de fundo e para uma tensão de polarização de -8V e +1V, estão mostrados na Figura 35.

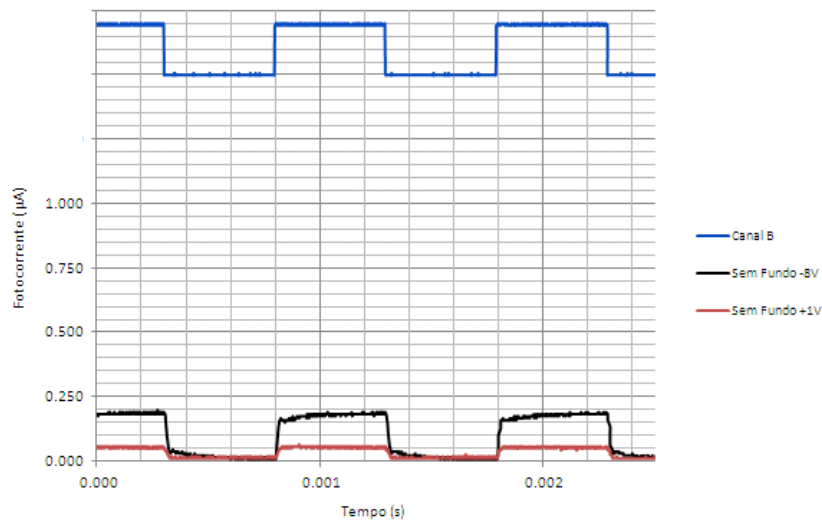


Figura 35 - Fotocorrente do canal azul com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

No topo da figura está representada a forma temporal do sinal transmitido pelo canal azul. Observa-se que os dois sinais de fotocorrente medidos acompanham a forma do sinal óptico transmitido. Verifica-se no entanto que, a amplitude dos valores da fotocorrente para uma tensão de polarização de -8V é cerca de três vezes superior aos valores da fotocorrente para uma tensão de +1V, o que ilustra a elevada dependência do sinal azul com a tensão aplicada, conforme já indicado em resultados anteriores [2, 3, 7, 9, 11], onde se previa uma grande variação nos valores da amplitude da fotocorrente.

A Figura 36 mostra a fotocorrente medida para o canal azul, com Bit Rate 2000bps a uma tensão de -8V e a +1V, na presença de uma polarização óptica imposta pela radiação do LED vermelho de fundo, conforme visto em trabalhos anteriores, o LED vermelho é o que atenua mais[11].

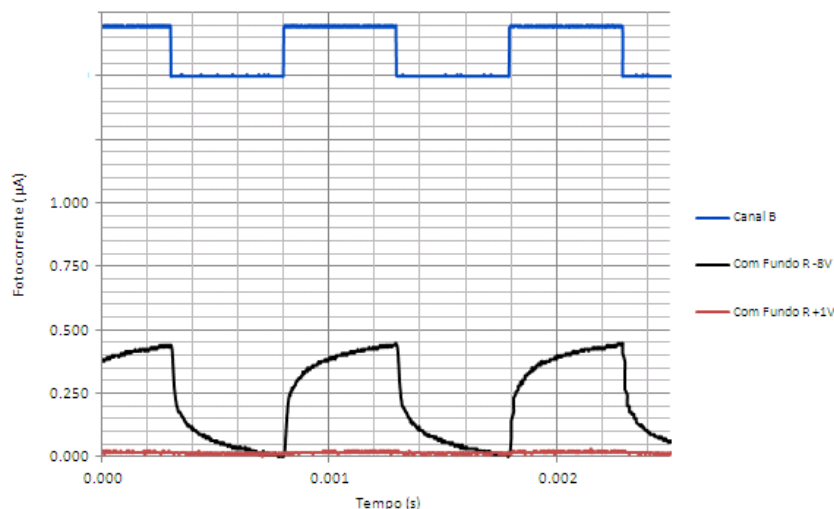


Figura 36 - Fotocorrente do canal azul com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.

Destes resultados comprova-se, mais uma vez, a influência da radiação de fundo na resposta do dispositivo. Pode-se observar que, para o canal azul, a presença do fundo vermelho gera uma fotocorrente quase duas vezes superior à fotocorrente medida na ausência de fundo para uma tensão de -8V. Isto significa que o canal azul é muito sensível à luz vermelha, o que está de acordo com os resultados obtidos em trabalhos anteriores [11], onde se observava que, a 470 nm, ocorria uma amplificação do sinal sob iluminação de fundo vermelho. De notar que, a forma de onda da fotocorrente medida sob fundo vermelho deixou de ser uma onda quadrada para passar a ser um “dente de serra” arredondado.

A Figura 37 mostra, novamente, a curva da fotocorrente do canal azul mas para Bit Rate 6000bps, sem aplicação de fundo, para uma tensão de -8V e +1V.

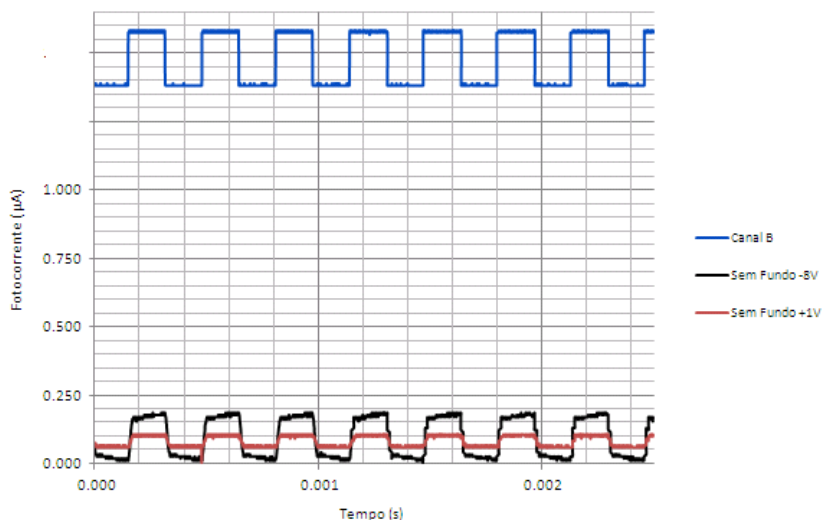


Figura 37 - Fotocorrente do canal azul com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Tal como era de se esperar, os valores da fotocorrente para uma tensão de +1V são muito inferiores aos valores obtidos para -8V. Verificamos também que, ao aumentar o Bit Rate, a amplitude do sinal -8V foi praticamente inalterada, o mesmo não se pode dizer a +1V, onde o seu valor máximo e o mínimo passou a ser o dobro, relativamente ao sinal com o Bit Rate a 2000bps.

A Figura 38 mostra, novamente, a curva da fotocorrente do canal azul mas para Bit Rate 6000bps, agora com aplicação de fundo, para uma tensão de -8V e +1V.

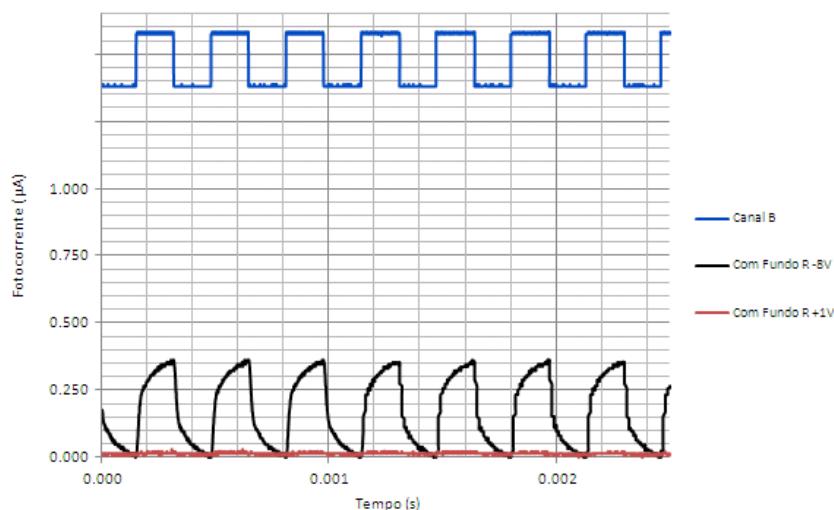


Figura 38 - Fotocorrente do canal azul com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.

Ao comparar as Figuras 36 e 38, com Bits Rates de 2000bps e 6000bps sem aplicação de fundo, podemos verificar que a grande diferença encontra-se no tempo de amostragem, quando se aplica um Bit Rate de 6000bps passamos para quase metade do período do Bit Rate a 2000bps, outra grande diferença é a influência da radiação de fundo na resposta do dispositivo com Bit Rate a 6000bps, onde o valor da fotocorrente para uma tensão de +1V tem um subida relativa em comparação com a Figura 36 com Bit Rate a 2000bps, onde o valor mínimo da fotocorrente a uma tensão a +1V, passou a ser o máximo de quando aplicado um Bit Rate a 2000 bps.

Quando da aplicação do fundo vermelho, verifica-se que ao variar o Bit Rate não existe nenhuma diferença relevante no sinal da fotocorrente quando aplicada uma tensão a -8V ou a +1V.

2.1.3 - Estudo do Canal Vermelho (R)

Esta série de medidas foi repetida usando agora o LED vermelho no canal de transmissão e manteve-se a mesma forma do sinal transmitido pelo canal, mas para o Bit Rate 2000bps. Na Figura 39 mostra a fotocorrente medida sem radiação de fundo para uma tensão de -8V e +1V, para o sinal transmitido pelo LED vermelho (a sua forma está representada no topo da figura).

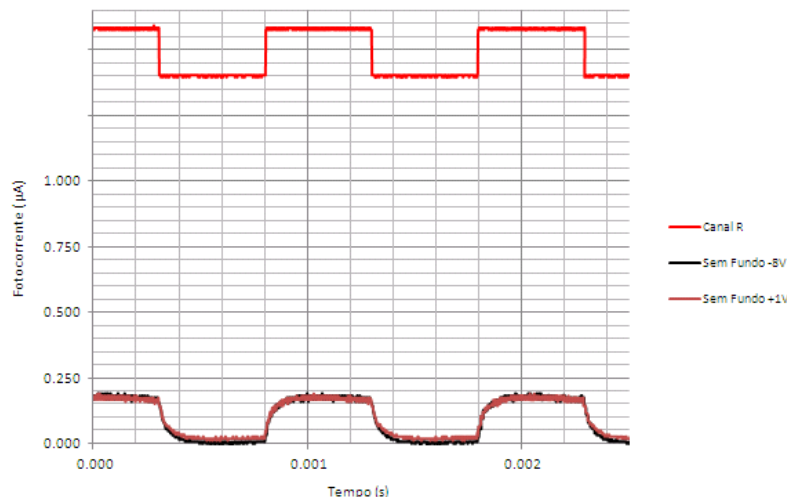


Figura 39 - Fotocorrente do canal vermelho com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Para este caso, e na ausência da radiação de fundo, os valores da fotocorrente são idênticos quer para uma tensão de polarização de -8V quer para uma tensão de +1V. Este resultado está em concordância com as medidas da resposta espectral, como se pode verificar em trabalhos anteriores. [11]

A Figura 40 mostra a curva da fotocorrente do canal vermelho, para Bit Rate 2000bps, com aplicação do fundo vermelho, para uma tensão de -8V e +1V.

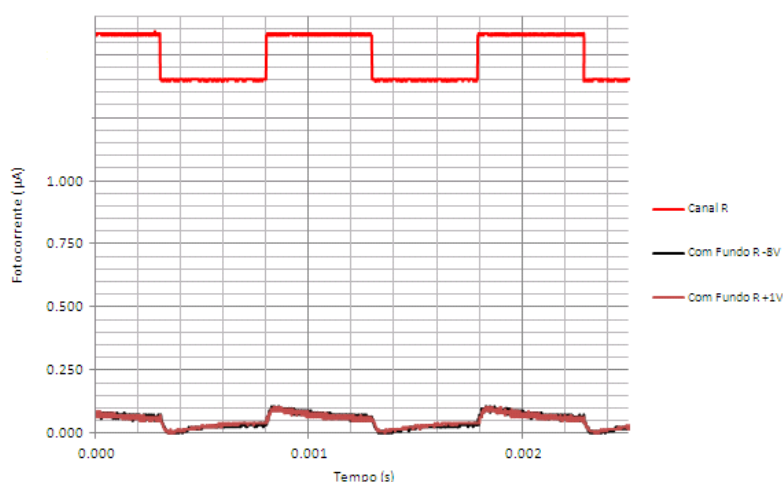


Figura 40 - Fotocorrente do canal vermelho com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.

Para as condições da figura acima, pode verificar-se, que ao aplicar a radiação de fundo do LED vermelho, com uma aplicação de um Bit Rate 2000bps, para uma tensão de polarização -8V e +1V, verificámos que este não varia com a tensão de polarização, onde os sinais estão sobrepostos, mas o valor da amplitude, só é máximo quando existe a transição do Bit para “1” e depois o sinal vai decaindo para metade do seu valor como se tivesse um comportamento de um condensador a descarregar. De notar também, que sempre que o Bit passa a “1” o valor da amplitude tem tendência a ser crescente e quando o bit passa a “0”, tem a tendência para ser decrescente.

A Figura 41 mostra os valores da fotocorrente do canal vermelho com um Bit Rate 6000bps, para uma tensão de -8V e +1V sem fundo.

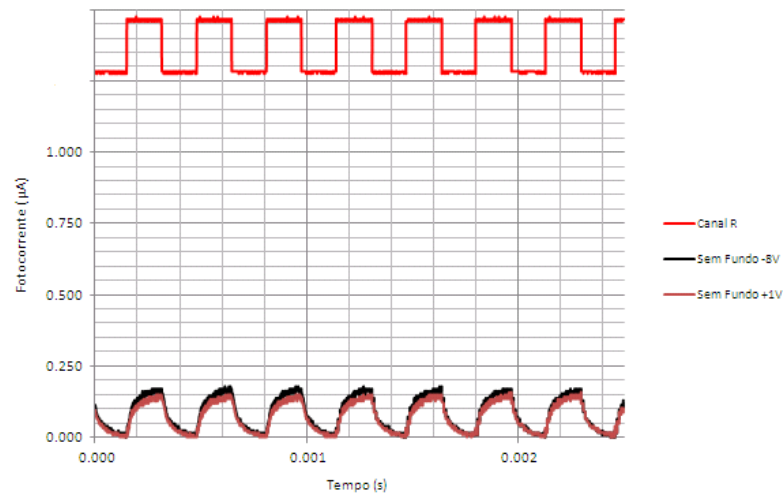


Figura 41- Fotocorrente do canal vermelho com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Na experiência anterior foi aplicado um Bit Rate 6000bps para uma tensão de -8V e +1V, sem aplicação de fundo e mais uma vez verifica-se que em ambas as polarizações os sinais são idênticos, ficando sobrepostos.

A Figura 42, mostra os valores da fotocorrente do canal vermelho com um Bit Rate 6000bps, para uma tensão de -8V e +1V, com aplicação da polarização de fundo do LED vermelho.

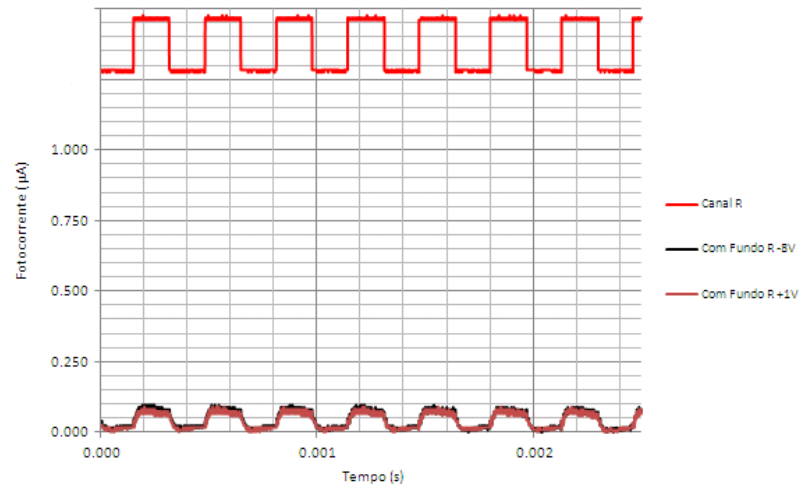


Figura 42- Fotocorrente do canal vermelho com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.

Tanto nesta experiência com nas anteriores, podemos verificar que sem a polarização de fundo do LED vermelho e com a aplicação da radiação de fundo do LED vermelho, os valores dos sinais são sempre muito próximos, desta forma podemos concluir que, quando se aplica a polarização de fundo a amplitude do sinal da fotocorrente tem a tendência a diminuir logo após a transição do Bit a “1”, comportando-se como um condensador a descarregar.

2.1.4 - Estudo do Canal Verde (G)

Os resultados obtidos agora para o LED verde, com Bit Rate 2000bps, não considerando nenhuma radiação de fundo e para uma tensão de -8V e +1V, estão mostrados na Figura 43. Mais uma vez a forma de onda do sinal transmitido é mostrada no topo da figura.

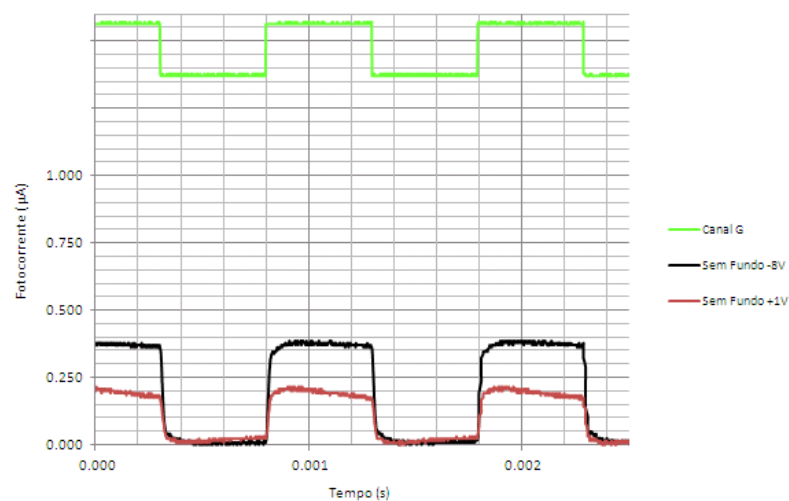


Figura 43 - Fotocorrente do canal verde com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Verifica-se que ao aplicar o LED verde com um Bit Rate a 2000bps para uma tensão a -8V e a +1V sem aplicação da polarização de fundo, verificámos que o sinal do canal verde é influenciado pelos valores da polarização, sendo os valores da fotocorrente para -8V o dobro dos valores medidos para +1V.

A Figura 44 mostra o canal verde com Bit Rate 2000bps, com aplicação da polarização de fundo do LED vermelho, para uma tensão de -8V e +1V.

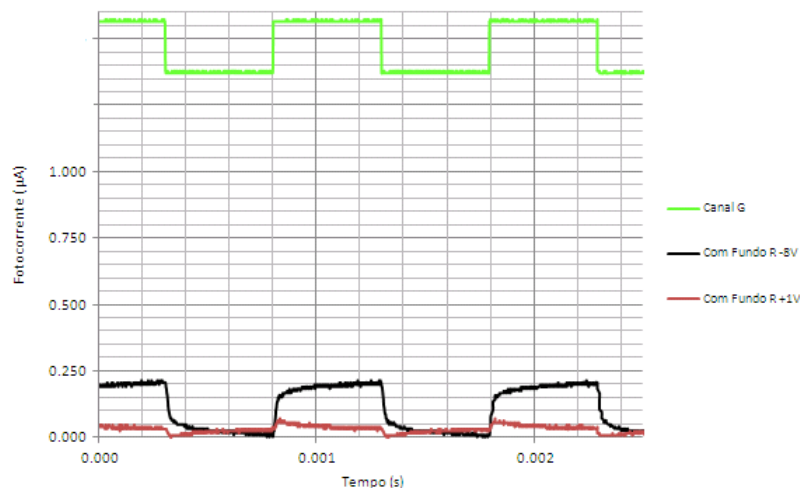


Figura 44 - Fotocorrente do canal verde com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.

Nesta experiência podemos verificar a mesma situação que na figura anterior, em que o canal verde é influenciado pelos valores de polarização e ainda quando se aplica a polarização de fundo com o LED vermelho, constata-se que a amplitude, para quando aplicada uma tensão de -8V tem um comportamento contrário do canal vermelho, quando o Bit transita para “1” o canal verde comporta-se como um condensador a carregar e quando transita para o Bit “0” tem o comportamento contrário, de descarregar. O que quando aplicada uma tensão de +1V tem o comportamento inverso ao da aplicação da tensão a -8V.

A Figura 45 mostra o canal verde, com Bit Rate 6000bps, sem aplicação da polarização de fundo, para uma tensão de -8V e +1V.

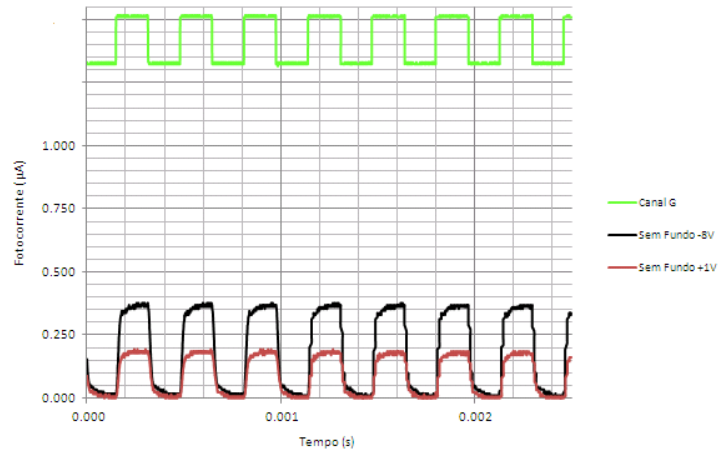


Figura 45 - Fotocorrente do canal verde com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Da figura anterior pode-se concluir, que ao aumentarmos o Bit Rate para 6000bps, constata-se que o valor da amplitude da fotocorrente sem aplicação da radiação de fundo, é igual á amplitude do valor da fotocorrente para quando se aplica um Bit Rate 2000bps, com uma pequena diferença, quando aplicado o Bit Rate a 2000bps o valor da amplitude a uma tensão +1V tem um comportamento decrescente, quando existe a transição para o Bit “1”, enquanto aplicado um Bit Rate a 6000bps, na transição para o Bit “1” o comportamento do valor da amplitude a uma tensão de +1V é crescente, assim verificamos mais uma vez que o LED verde é influenciado pela polarização do LED vermelho.

A Figura 46 mostra o canal verde, com Bit Rate 6000bps, com aplicação da polarização de fundo vermelho, para uma tensão de -8V e +1V.

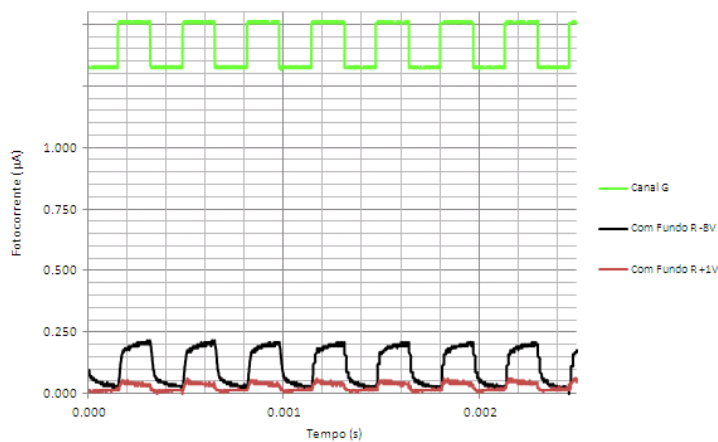


Figura 46 - Fotocorrente do canal verde com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.

Da figura anterior pode-se concluir, para além de tudo o que já foi referido anteriormente, podemos verificar com maior rigor, que com a variação da polarização a -8V pode-se verificar que o valor da fotocorrente vai decaindo lentamente quando o bit passa a “0”, enquanto a +1V o valor da fotocorrente tem um decréscimo mais “brusco” chegando quase ao valor de zero.

2.1.5 - Estudo dos Canais combinados R&G&B

A transmissão simultânea dos três canais ópticos diferentes foi simulada através da combinação dos três LEDs R & G & B a um Bit Rate de 6000bps. A fotocorrente medida na ausência de radiação de fundo, e para uma tensão de polarização de -8V e +1V. A combinação de bits escolhida para o LED vermelho foi R[11110000], para o LED verde G[11001100] e para o LED azul B[10101010], desta forma foi feito o estudo dos canais combinados R & G & B, como está mostrada na Figura 47.

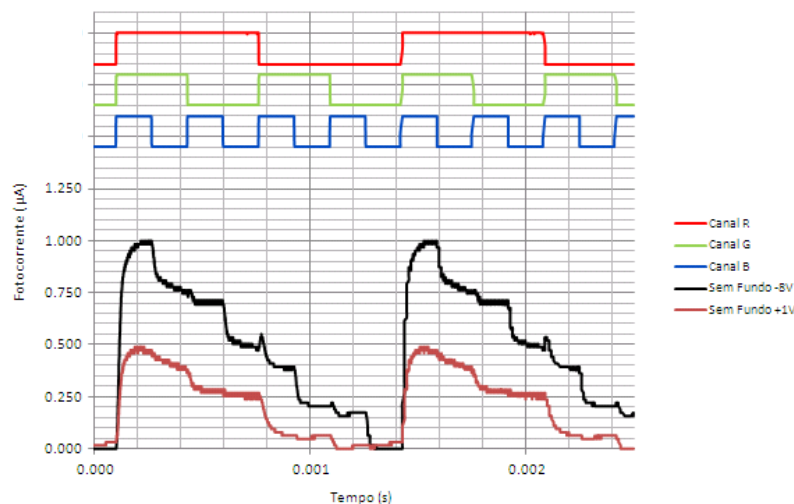


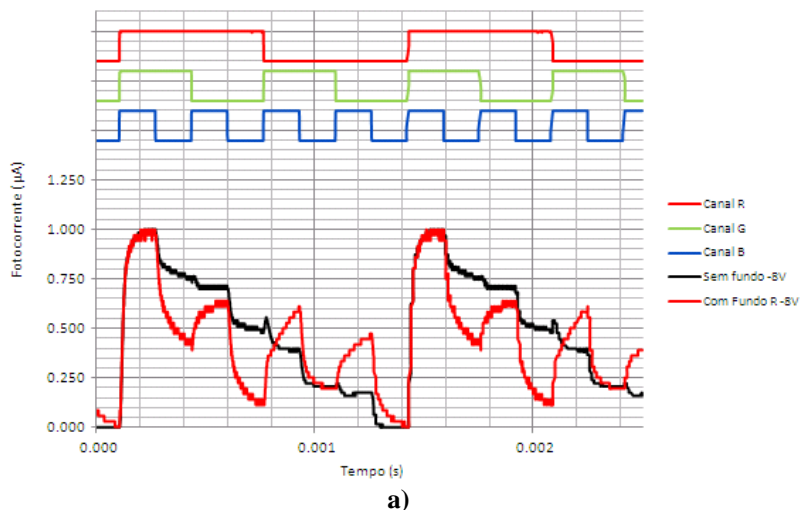
Figura 47 - Fotocorrente dos canais combinados R&G&B sem radiação de fundo.

Da figura acima, podemos verificar que a sequência se repete em dois ciclos e para uma tensão de -8V, conseguimos distinguir 8 níveis da fotocorrente. O patamar mais baixo corresponde à situação em que todos os canais estão desligados (situação OFF da Figura 47). Depois surgem os níveis associados à contribuição de cada canal, e das suas combinações dois a dois. Por fim, o nível mais alto corresponde à transmissão simultânea dos três canais. A separação entre estes níveis possibilita a recuperação dos sinais de entrada [2]. Estes 8 níveis surgem da combinação a 0 ou a 1 dos três LEDs ($2^3 = 8$).

Para uma tensão de polarização de +1V, os níveis também se encontram definidos e com separação entre eles, mas com muito menor amplitude, tornando mais difícil a identificação dos sinais de entrada.

Para recuperar a informação dos sinais enviados (8 bits por canal), durante um ciclo completo ($0 < t < T$), o sinal multiplexado foi dividido em oito intervalos de tempo, cada um correspondendo a um bit de cada canal, onde cada um deles pode tomar os valores ON (1) ou OFF(0). Como para polarização directa o dispositivo não tem sensibilidade ao canal azul, a informação emitida pelos canais vermelho e verde pode ser identificada pelo sinal multiplexado a +1V. O nível mais alto corresponde a ambos os canais estarem ligados ON (R&G: R=1, G=1), e o nível mais baixo corresponde a ambos os canais estarem desligados OFF (R=0, G=0). Os dois níveis intermédios estão relacionados com a presença de apenas um canal a ON, ou o canal vermelho (R=1, G=0) ou o canal verde (R=0, G=1). Para distinguir entre estas duas situações e decodificar o canal azul, terá de se analisar o sinal multiplexado com polarização inversa. Como o sinal verde é mais sensível a alterações na tensão aplicada do que o vermelho, então o incremento mais alto a -8 V corresponde ao canal azul ligado (B=1), o incremento mais baixo corresponde ao canal vermelho ligado (R=1) e o incremento intermédio corresponde ao canal verde ligado (G=1). Usando este algoritmo [10], os canais vermelho, verde e azul podem ser decodificados assim: R[00111100], G[11001100] e B[10101010].

A Figura 48 ilustra o sinal multiplexado considerando as três radiações de fundo, a -8 V.



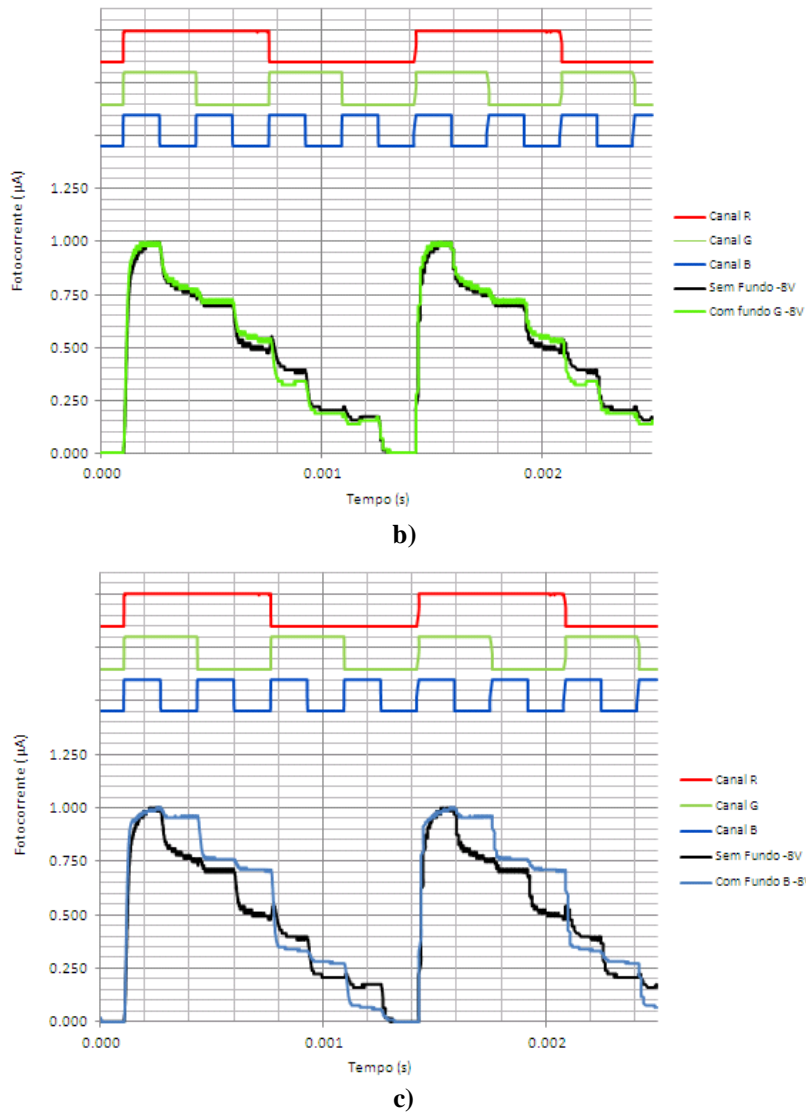


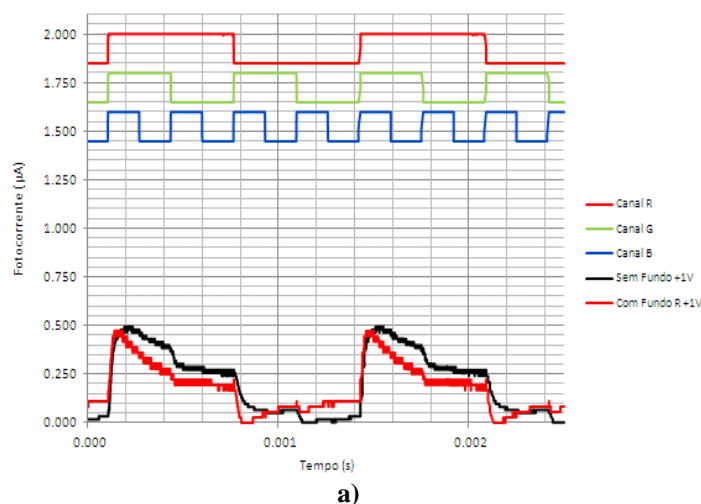
Figura 48 - Fotocorrente dos canais R&G&B para uma tensão a -8V, considerando: a) fundo vermelho; b) fundo verde e c) fundo azul.

Na (Figura 48 a) podemos verificar que, quando aplicado o fundo vermelho, o sinal passa a ter a forma de onda de um “dente de serra” arredondado e segue a forma de onda do canal azul. Neste caso, o sinal apresenta 8 níveis, dos quais apenas 5 são possíveis de diferenciar dos restantes, devido estarem muito próximos sendo difíceis de os distinguir. Onde o primeiro nível inferior é quando os três canais estão OFF, o segundo nível quando só o canal vermelho esta ON e os restantes a OFF ou quando só temos o canal verde ON, o terceiro nível intermédio, quando temos os canais vermelho e verde ON ou quando temos só o canal azul ON, o quarto nível quando temos os canais vermelho e azul ON ou quando os canais verde e azul ON e o quinto nível mais alto sempre que os canais vermelho, verde e azul estão ON ao mesmo tempo.

Na presença de fundo verde (Figura 48 b), podemos verificar que com a aplicação deste fundo, não influencia muito no sinal, visto seguir a forma de onda do sinal RGB, influenciado apenas numa atenuação do sinal na combinação quando o canal verde e azul estão ON, passando a ter 6 níveis distintos, seguido em 5 deles, nomeadamente quando todos os canais estão OFF, quando só está ON o canal azul, quando só está ON o canal verde, ou quando estes dois canais estão ON em simultâneo. Os outros 2 níveis sofrem sempre uma atenuação em relação ao sinal RGB.

Sob radiação de fundo azul (Figura 48 c) podemos verificar que, com fundo azul, o sinal segue a forma de onda do sinal RGB na ausência de fundo, mas com amplitudes ligeiramente diferentes, o que provoca, em alguns casos, a eliminação de níveis. Assim, o sinal RGB sob radiação de fundo azul passa a ter 4 níveis. Onde com aplicação deste fundo vai influenciar significativamente na amplitude do sinal quando temos só o canal verde ON, canal vermelho ON ou quando temos os canais vermelho e verde ON e podemos verificar também que sempre que o canal azul está ON, com a presença do fundo azul verifica-se sempre uma atenuação na amplitude do sinal e quando o canal azul se encontra a OFF temos sempre uma amplificação da amplitude do sinal.

Os resultados obtidos para a combinação dos três canais RGB, considerando as três radiações de fundo e para uma tensão de polarização de +1V, estão mostrados na Figura 49.



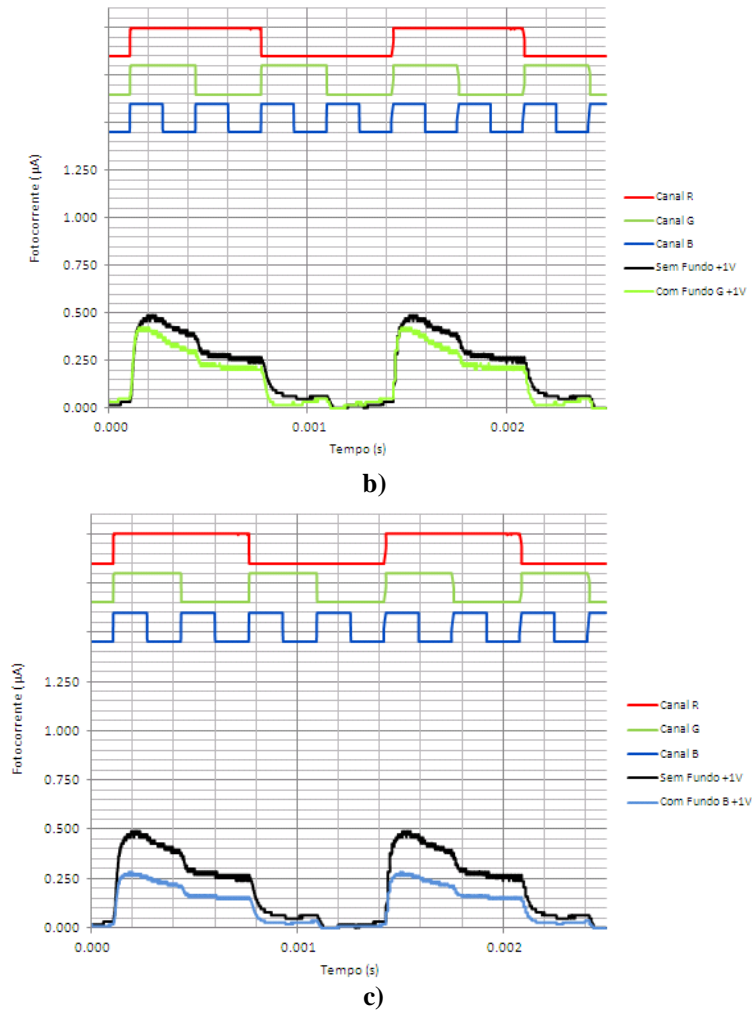


Figura 49 - Fotocorrente dos canais R&G&B para uma tensão a +1V, considerando: a) fundo vermelho; b) fundo vermelho e c) fundo azul.

Sob radiação de fundo vermelho (Figura 49 a), o sinal segue exactamente a forma de onda do sinal RGB, na ausência de fundo, com excepção quando temos só o canal azul ON e quando temos os três canais a OFF, onde o sinal é amplificado, quando este é zero sem aplicação de fundo a +1V, desta forma só é possível distinguir apenas três níveis necessários para a demultiplexagem.

Sob radiação de fundo verde (Figura 49 b) o sinal segue a forma de onda do sinal RGB mas com uma pequena atenuação, mais significativa quando temos os canais vermelho e verde ON e quando temos os canais verde e azul ON. Sendo possível distinguir apenas quatro níveis necessários para a demultiplexagem.

Sob radiação de fundo azul (Figura 49 c), o sinal segue exactamente a forma de onda do sinal RGB, na ausência de fundo, mas é mais atenuado em quase todas as combinações dos canais, comparativamente sob a radiação de fundo vermelho e verde, mas mesmo assim é possível distinguir três níveis necessários para a demultiplexagem.

2.2 - Referências

- [1] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, A. Fantoni, C. Francisco, M. Barata, “Optical multiplexer for short range communications”, *Physica E* (2008), doi: 10.1016/j.physe.2008.08.029.
- [2] José Manuel Espadinha Caeiro, tese de dissertação de Mestrado em “Dispositivos semicondutores em sistemas de multiplexagem por divisão em comprimento de onda”, ISEL, Novembro de 2009.
- [3] Cátia Susana Gonçalves Francisco, tese de dissertação de Mestrado em “Demultiplexagem óptica controlada por tensão (DOV), ISEL, Novembro de 2008.
- [4] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, S. Amaral, J. Costa, M. Fernandes, “Optical Demultiplexer Device Operating in the Visible Spectrum” ” in print in *Sensors & Actuators: A. Physical* (2010).
- [5] M. Vieira, M. Fernandes, P. Louro, M. A. Vieira, M. Barata, A. Fantoni, “Multilayered a-SiC:H device for Wavelength-Division (de)Multiplexing applications in the visible spectrum”, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1066* (2008), Materials Research Society, 1066-A08-01.
- [6] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, J. Costa, M. Fernandes, M. Barata, “Demultiplexer/photodetector Integrated system based on a-SiC:H multilayered structures”, (2010) simp A_754796.
- [7] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, S. Amaral, J. Costa, M. Fernandes, “Optical Demultiplexer Device Operating in the Visible Spectrum”, *Procedia Engineering* 5 (2010) 657–660.
- [8] C. Francisco, P. Louro, M. Barata, “Demultiplexagem óptica controlada por tensão (DOV)”, *Jornadas de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores - JETC08*, 20 e 21 de Novembro de 2008.
- [9] P. Louro, M. A. Vieira, S. Amaral, M. Fernandes, J. Costa, M. Vieira “Integrated demultiplexer and photodetector for short range transmission in the visible range”, *Phys. Status Solidi C*, 1– 5 (2010) / DOI 10.1002/pssc.201000169.
- [10] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, J. Costa, A. Fantoni, “Use of a-SiC:H photodiodes in optical communications applications”, 2010.
- [11] Susana Amaral, tese de dissertação de Mestrado em “Óptica Transparente : Wavelength Division Multiplexer” , ISEL, Dezembro de 2010.

Cap. 3 - Reconhecimento dos Canais

O objectivo desta fase do trabalho e após o estudo da caracterização optoelectrónica do dispositivo NC5 como demultiplexador de sinais transmitidos na zona do visível, sob diferentes condições de iluminação, variando o comprimento de onda dos LEDs geradores do sinal e da radiação dos LEDs de fundo, ficou provado que ao se aplicar uma radiação de fundo se podia amplificar o sinal enviado pelo canal de transmissão, ficou também demonstrado que a influência do comprimento de onda na radiação de fundo, considerando aplicação da polarização inversa, todos os canais são visíveis pelo sensor, ao aplicar radiação de fundo vermelha amplifica os valores de fotocorrente do canal azul e a radiação de fundo azul amplifica o canal vermelho e verde. Para uma polarização directa o canal azul fica “cego” para o sensor, apenas a radiação de fundo azul amplifica os valores de fotocorrente do canal vermelho, após este estudo desenvolveu-se e implementou-se um algoritmo que permitiu fazer a recuperação da informação de cada canal transmitido no multiplexador, tirando partido das propriedades de filtragem óptica do dispositivo.

3.1 - Desenvolvimento do Algoritmo

O desenvolvimento do algoritmo foi projectado em quatro fases distintas: Análise, Projecto, Implementação e Teste.

A análise iniciou-se com um estudo da caracterização optoelectrónica do dispositivo NC5 sob diferentes condições de iluminação, variando o Bit Rate, o comprimento de onda dos LEDs e da radiação de fundo, conforme descrito nos capítulos anteriores. Desta forma, foi possível tirar algumas conclusões do comportamento do dispositivo NC5, face aos comprimentos de onda dos LEDs utilizados, bem como as variáveis a utilizar, gráficos e opções a aplicar na simulação que o utilizador poderia manipular. Houve ainda que apurar qual o tipo de interface gráfica mais adequada, de modo a que o simulador se tornasse funcional e simultaneamente, atractivo e de fácil manuseamento.

De seguida iniciou-se a fase do projecto, onde a estrutura central do simulador foi desenhada. Nesta fase foram planeados e desenvolvidos os algoritmos necessários para executar o software requerido.

Na fase da implementação foi escolhido o tipo de linguagem a utilizar e foi feita a codificação dos algoritmos obtidos na fase anterior. O simulador foi desenvolvido em linguagem: Excel / Visual Basic, por ser uma linguagem simples e de uso frequente.

Por fim, a fase de teste em que, a partir de resultados esperados, foram efectuadas várias simulações com o objectivo de verificar a robustez do algoritmo e se o simulador estava a funcionar correctamente. Claro que, o desenvolvimento do simulador, é um processo iterativo, no qual, quando algo não corre conforme o esperado, é necessário voltar às fases anteriores para proceder às respectivas alterações. Assim, as fases de desenvolvimento do simulador expostas tiveram várias iterações até à obtenção do produto final apresentado.

De realçar que foram construídos dois algoritmos, das quais permite efectuar a recuperação da informação de cada canal de transmissão, sem e com aplicação de radiação de fundo.

3.2 - Caracterização dos Patamares da Fotocorrente

Ao desenvolver o algoritmo foi necessário proceder algumas análises e tratamentos dos dados experimentais em causa, o que serão descritos nas secções seguintes.

3.2.1 - Normalização dos Dados

Conforme a montagem experimental descrita na Secção 2.1, os dados dos diferentes canais de transmissão foram medidos com um osciloscópio digital de 4 canais e “transferidos” para o computador através do software *OpenChoice* (do fabricante Tektronix). Seguidamente foram tratados numa folha Excel, a fim de normalizar os valores da fotocorrente, isto é, o sinal a normalizar é decomposto nas suas duas componentes, tempo e amplitude. Na componente das amplitudes soma-se ao sinal, o mínimo do sinal e este é por sua vez dividido pela diferença entre o máximo e o mínimo de modo a obter o sinal normalizado, conforme se pode verificar na Tabela 1.

Dados retirados do osciloscópio											Dados Normalizados												
Tempo	R	G	B	dark -8V	dark -1V	R bck -8V	R bck -1V	G bck -8V	G bck -1V	B bck -8V	B bck -1V	Tempo	R	G	B	dark -8V	dark -1V	R bck -8V	R bck -1V	G bck -8V	G bck -1V	B bck -8V	B bck -1V
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.146	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.018	-0.02	-0.01	-0.034	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.111	0.268	0.146	0.224	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.018	-0.02	-0.01	-0.034	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.111	0.268	0.146	0.224	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.02	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.048
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.018	-0.02	-0.01	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.111	0.268	0.146	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.01	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.146	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.018	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.111	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.018	-0.02	-0.01	-0.034	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.111	0.268	0.146	0.224	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.048
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.018	-0.02	-0.01	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.111	0.268	0.146	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.018	-0.02	-0.01	-0.034	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.111	0.268	0.146	0.224	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.018	-0.02	-0.01	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.111	0.268	0.146	0.207	0.086	0.260	0.058
-2E-04	-2.2	2.4	-2.4	-0.036	-0.02	-0.02	-0.012	-0.036	-0.016	-0.052	-0.018	0.0000	0	5	0	0.238	0.095	0.268	0.122	0.207	0.086	0.260	0.058

Tabela 1 - Ficheiro Excel com a normalização dos dados.

3.2.2 - Cálculo da Duração do Bit

Após a normalização dos dados, de forma a reduzir a redundância e garantir a consistência dos valores obtidos da fotocorrente das 2500 amostras, sendo estes os valores obtidos pelo osciloscópio em cada simulação, o que são aproximados a dois períodos de tempo do sinal obtido, pretendendo-se analisar apenas um período de tempo, de forma a verificar a partir de onde a sequência se repete (Figura 50).

Como referido anteriormente um dos objectivos no desenvolvimento do algoritmo era utilizar o Bit Rate máximo permitido pelo sensor utilizado neste trabalho de 6000bps.

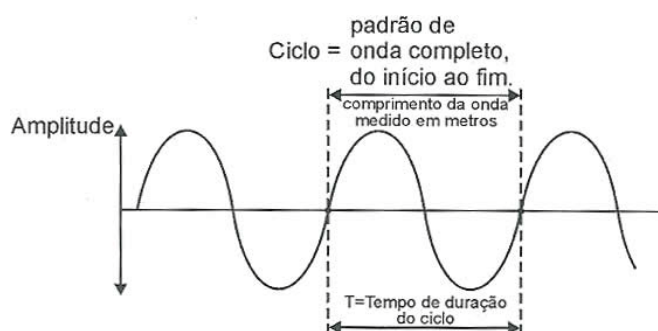


Figura 50 – Representação da onda sinoidal, mostrando o seu ciclo, frequência e período de duração de um ciclo.

De forma a verificar onde a sequência transmitida se repetiria, foi necessário saber quantas amostras seriam necessárias para obtermos 1 Bit. Sabendo que temos 2500 amostras de tempo e que o valor máximo de tempo é de 0,0025 seg e que o Bit Rate utilizado foi de 6000bps, é possível calcular a duração de 1 Bit, através da seguinte expressão:

$$\text{Tempo Bit} = \frac{1 \text{ bit}}{\text{Bit Rate}} = \frac{1}{6000} = 167 \text{ ms}$$

Sendo assim, 1 Bit tem a duração de 167 ms, pretendemos então calcular quantas amostras serão necessárias por Bit, o que se obtêm a partir da seguinte expressão:

$$\text{Amostras/Bit} = \frac{n^{\circ} \text{ amostras} \times \text{tempo Bit}}{\text{tempo maximo das amostras}} = \frac{2500 \times 0,000167}{0,0025} = 166,666$$

Neste exemplo resulta que serão necessárias 167 amostras por cada Bit e como um período é constituído por 8 Bits serão então necessárias 1336 amostras.

3.2.3 - Início do Bit

Ao sabermos que cada Bit é composto por 167 amostras, onde a primeira amostra nem sempre começa no início do Bit, conforme assinalado na Figura 51, foi assim necessário encontrar uma forma de resolver este problema, ou seja, de descobrir onde tem início o primeiro Bit no total das 2500 amostras.

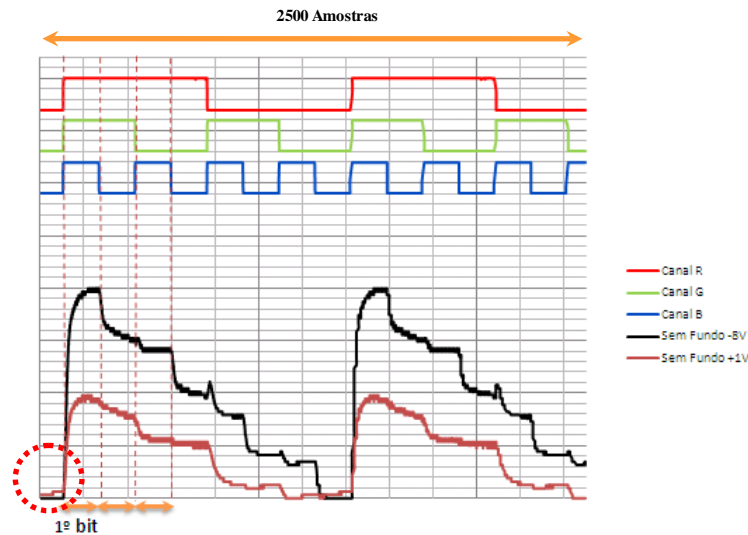


Figura 51 – Sequência RGB com apresentação das 2500 amostras (dois períodos).

A fim de resolver o problema de encontrar o início do primeiro Bit, foi necessário seleccionar os valores da fotocorrente das 2500 amostras do sinal sem fundo com polarização inversa e calcular a derivada dos valores da fotocorrente onde esta representa a taxa de variação instantânea da função, ou seja, as variações que ocorrem, segundo a seguinte função:

$$Diff(i) = [i(10) - i(1); i(11) - i(2); \dots; i(2500) - i(2490)]$$

Obteve-se o gráfico da Figura 52, onde se encontram representadas as variações de um valor da fotocorrente de uma amostra em relação ao valor da fotocorrente da 10ª amostra anterior, onde se pretende verificar as maiores variações. A partir do qual vai ser utilizado para encontrar o início do primeiro Bit, início esse, que será quando existe a maior transição do último valor, mais próximo de zero.

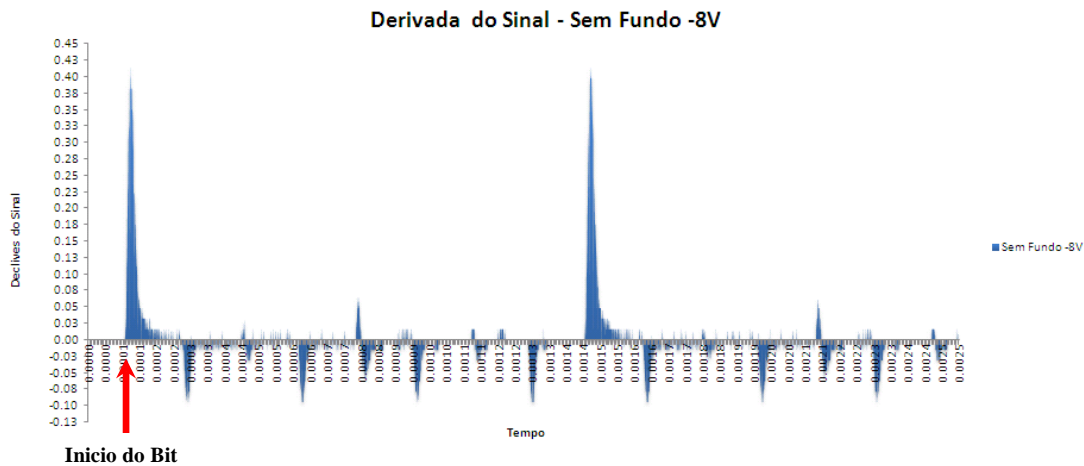


Figura 52 - Apresentação da derivada dos valores da fotocorrente, com aplicação tensão inversa e sem fundo.

Na Figura acima representada, podemos observar os valores da derivada da fotocorrente do sinal composto RGB com aplicação da tensão inversa, sem aplicação de fundo. Verifica-se que nos instantes de tempo em que existe maior taxa de variação da fotocorrente correspondem às transições nos patamares da fotocorrente. É desta forma que vamos encontrar o valor da amostra do primeiro Bit, sendo este o início onde ocorre a primeira variação e a partir desse ponto que vamos somar mais 167 amostras para obtermos um Bit completo.

Para melhor percepção da Figura 53, foi representado a comparação do sinal da fotocorrente do sinal composto RGB com os valores da derivada.

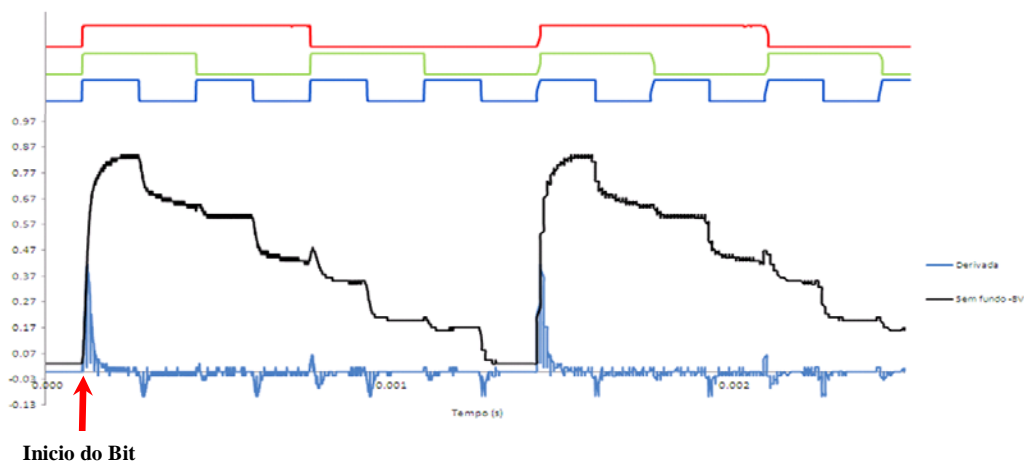


Figura 53 – Comparação do sinal da fotocorrente com os valores da derivada.

Conforme podemos verificar ao comparar os sinais da fotocorrente do sinal composto RGB com os valores obtidos pela derivada, as transições correspondem exactamente às variações da fotocorrente, sendo desta forma possível de identificar a partir de que valor das amostra tem início o primeiro Bit, sendo também possível a partir desse ponto a identificação dos 8 Bits.

3.2.4 - Seleccionar os 8 Bits

Após sabermos que cada Bit é composto por 167 amostras e onde tem início o primeiro Bit, pretendemos então nesta fase seleccionar os 8 Bits correspondentes a um período completo, Sabemos que a partir do 8º Bit a sequência se repete, conforme se pode verificar na Figura 54.

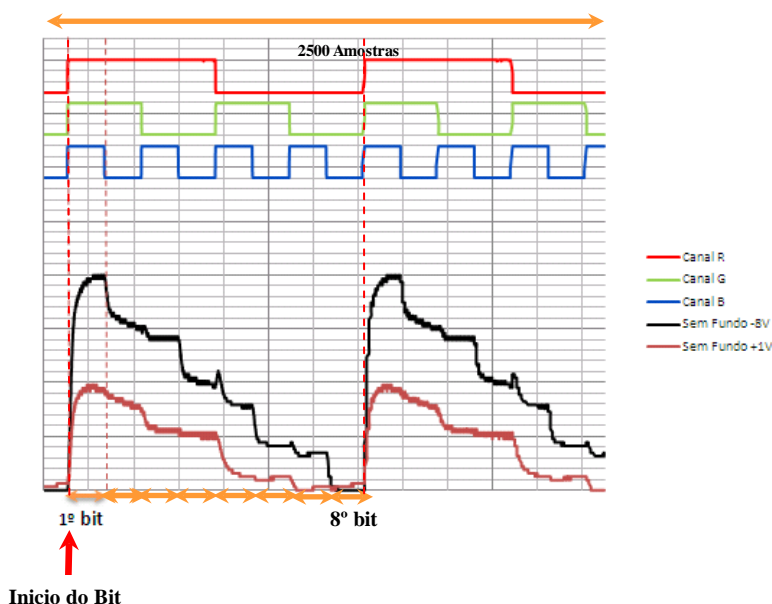


Figura 54 - Sequência RGB com apresentação da selecção dos 8 Bits.

Após a selecção dos 8 Bits é então efectuado um filtro para só serem visíveis apenas os 8 Bits, conforme se pode verificar na Figura 55, para que se possa fazer a demultiplexação dos canais.

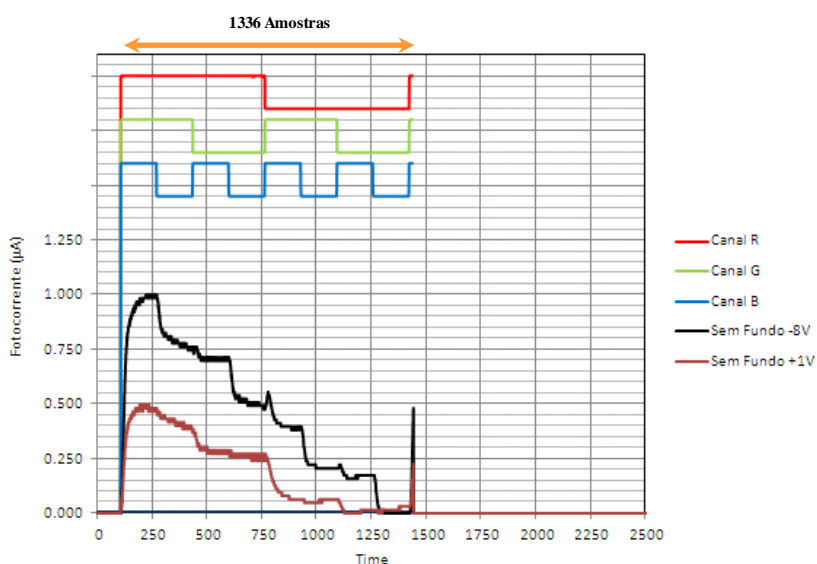


Figura 55 - Sequência RGB com aplicação de filtro para serem apresentadas apenas os 8 Bits pretendidos.

3.2.5 - Moda mais intervalos

Como já observado, o sinal da fotocorrente obtido nem sempre é uma onda quadrada perfeita, devido ao comportamento do sensor. Por isso foi escolhida a função “MODA” do Excel, para determinar o valor mais frequente no conjunto das 167 amostras por Bit. Para que os valores sejam mais precisos, foi desenvolvida uma opção que permite a selecção da quantidade de amostras que pretendemos analisar dentro do total das 167 amostras por Bit, tanto para a polarização inversa como para a directa, valor este que pode variar entre (0 e 167), segundo a seguinte função aplicada:

$$N^{\circ} \text{ Amostra analisar} = \frac{1^{\circ} \text{ valor da amostra} + 167^{\circ} \text{ valor da amostra}}{2} - \frac{\text{Valor a escolher}}{2}$$

Na Figura 56, vamos mostrar o efeito desta função. Neste exemplo foram aplicadas 160 amostras a analisar, no qual podemos observar no gráfico a tracejado amarelo.

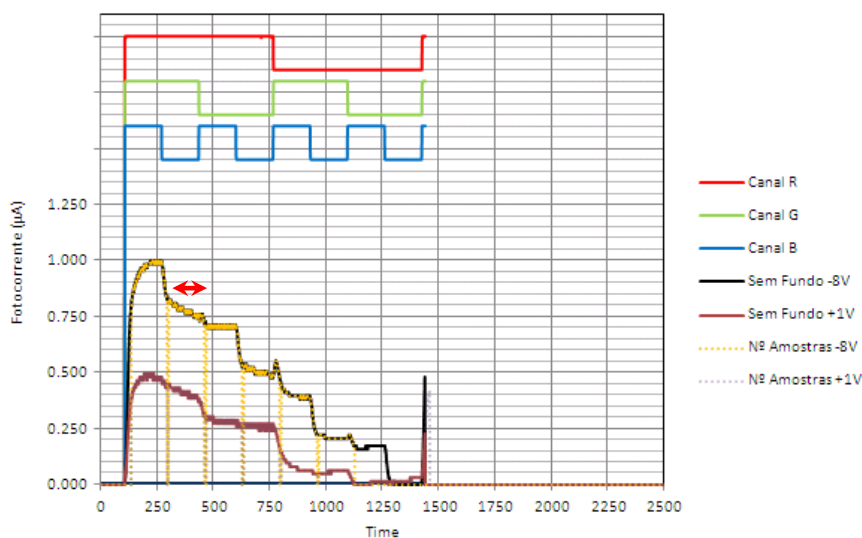


Figura 56 - Sequência RGB com 160 amostras analisar por Bit.

Ao seleccionar o número muito próximo do número total de amostras, com aplicação da função “MODA”, vamos ter uma grande margem de erro, devido a muitas das vezes os valores seleccionados conterem valores dos Bits vizinhos. Isto deve-se ao facto de nas transições de uma sequência de Bit para outra, o sensor pode ter um comportamento de um condensador a carregar ou descarregar, dando origem a variações nos patamares de cada nível o que influencia os valores obtidos pela “MODA”.

Na Figura 57, vamos demonstrar o efeito desta função, neste caso foram aplicadas 50 amostras a analisar, no qual podemos observar no gráfico a tracejado amarelo.

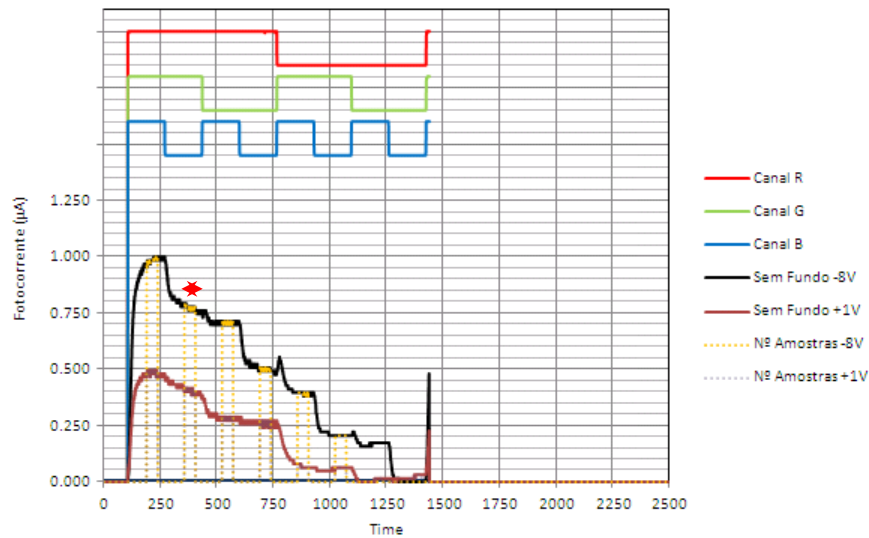


Figura 57 - Sequência RGB com 50 amostras analisar por Bit.

Ao seleccionar apenas 50 amostras por Bit, conseguimos garantir que os valores dos Bits vizinhos não influenciam e a margem de erro é menor o que garante que estamos analisar os valores das amostras no centro de cada Bit.

Assim, após sabermos que cada Bit é composto por 167 amostras e onde tem início o primeiro Bit, ao seleccionar os 8 Bits correspondentes a um período completo e utilizando o número de amostras pretendidas a analisar das 167 disponíveis por Bit, passamos então para o cálculo da “MODA” desse conjunto de amostras. Deste modo para calcular no conjunto de amostras pretendido o valor que ocorre com mais frequência, foi desenvolvida a seguinte tabela:

Bits	intervalos			INPUT			OUTPUT s/bck		
	1º	2º	3º	R MED	G MED	B MED	RGB -8V MODA	RGB +1V MODA	INPUT
1º	106	189	239	5	5	5	0.984	0.476	
2º	273	356	406	5	5	0	0.778	0.397	
3º	440	523	573	5	0	5	0.698	0.286	
4º	607	690	740	773	5	0	0.492	0.254	
5º	774	857	907	940	0	5	0.397	0.063	
6º	941	1024	1074	1107	0	5	0.206	0.063	
7º	1108	1191	1241	1274	0	0	0.175	0.016	
8º	1275	1358	1408	1441	0	0	0.000	0.032	

Tabela 2 - Tabela onde é calculada a MODA dos intervalos de cada nível.

Na Tabela 2, podemos observar onde são efectuados os cálculos da “MODA” dos patamares de cada nível de conjunto de amostras, que a partir destes, o algoritmo vai analisar os dados. Assim encontram-se numerados os campos da tabela de 1 a 9 para mais facilmente serem referenciados:

- 1 Referência das posições dos 8 Bits.
- 2 Foi colocada uma barra de deslocamento para que se possa ajustar/calibrar com maior rigor no gráfico os dados a analisar após a indicação do número de amostras analisadas por Bit.
- 3 Referência dos valores de INPUT, isto é, a sequência binária introduzida na emissão dos LED, na qual se pretende obter com o algoritmo.
- 4 Contêm o início dos intervalos dos patamares de cada nível a partir do início do primeiro Bit.
- 5 Referência aos intervalos dos patamares de cada nível, após selecção do número de amostras a analisar.
- 6 Contêm as posições finais dos intervalos dos patamares de cada nível das 167 amostras.
- 7 Efectuado o cálculo da “MODA” dos intervalos dos patamares de cada nível com aplicação de polarização inversa.
- 8 Efectuado o cálculo da “MODA” dos intervalos dos patamares de cada nível com aplicação de polarização directa.
- 9 Representação dos resultados da demultiplexagem do algoritmo para cada conjunto de intervalos.
- 10 Representação da sequência binária correspondente a cada Bit.

3.2.6 - Comparação dos valores da moda com base nos valores obtidos das simulações em laboratório.

Analisando o sinal RGB composto por 8 sequências possíveis, RGB; RG; RB; R; GB; G; B; OFF, verificou-se então que algumas das sequências tinham valores muito próximos, que em muitos casos seriam quase impossível de descobrir a sequência. Desta forma para colmatar este problema, foi feito um agrupamento das sequências para os valores que se encontram muito próximos, para a tensão de polarização inversa (-8V), ficando apenas com 5 sequências possíveis: RGB; RG&RB; R&GB; G&B; OFF. Como no caso da tensão de polarização directa (+1V), o Canal Azul não é detectado, ficando “cego” pelo sensor, só temos as seguintes sequências: RG; R; G; OFF. É então desta forma, em conjunto com as sequências de tensão de polarização inversa, que vamos conseguir descobrir a sequência transmitida, conforme se pode verificar na Figura 58.

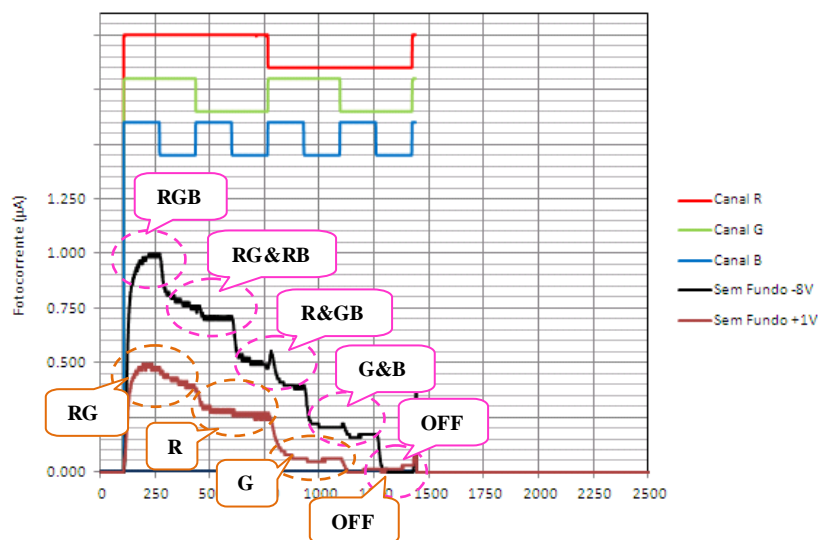


Figura 58 - Representação dos agrupamentos dos vários níveis para a polarização inversa e directa.

Assim, de forma a verificar se o valor da fotocorrente se manteve estável para cada combinação dos Bits, o primeiro ponto de partida, foi a repetição de 20 vezes, da mesma sequência de Bits, R [0001110], G [01100110] e B [10101010], para a verificação da margem de erro e o desvio padrão de cada Bit, conforme se pode verificar na Figura 59.

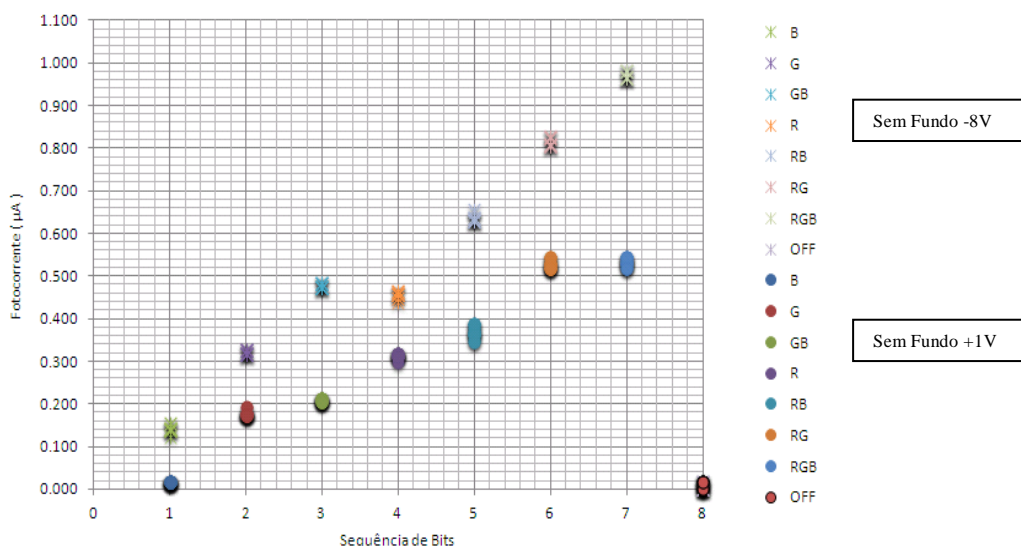


Figura 59 - Gráfico com apresentação da margem de erro.

Chegou-se à conclusão, conforme se pode verificar na Figura 59, que não era suficiente a repetição 20 vezes da mesma sequência, visto a margem de erro e o desvio padrão serem inconclusivas, ou seja, inferior a 1%, conforme os valores obtidos na tabela abaixo.

	RGB -8V			RGB +1V		
	Intervalo	Moda	Desvio Padrão	Intervalo	Moda	Desvio Padrão
zero	[0 - 0.017]	0.007	0.009	[0 - 0.018]	0.013	0.008
B	[0.123 - 0.155]	0.141	0.007			
G	[0.315 - 0.328]	0.321	0.006			
GB	[0.474 - 0.483]	0.478	0.005	[0.173 - 0.210]	0.193	0.017
R	[0.439 - 0.466]	0.456	0.007			
RB	[0.632 - 0.656]	0.637	0.008	[0.299 - 0.386]	0.341	0.030
RG	[0.807 - 0.828]	0.816	0.009			
RGB	[0.965 - 0.983]	0.972	0.009	[0.518 - 0.545]	0.530	0.010

Tabela 3 - Tabela com a variação dos intervalos da fotocorrente das 8 sequências Bits possíveis.

Quando aplicadas a outras sequências diferentes os valores da fotocorrente nem sempre se compreendiam nos intervalos da tabela acima. De forma a colmatar este problema e tornar mais robusto o algoritmo, foram geradas várias sequências com o intuito de se conseguir chegar a um intervalo onde os valores da fotocorrente variam. Deste modo foram realizadas várias medidas experimentais que contemplaram diferentes combinações das sequências transmitidas por cada LED.

Assim, mostra-se a título ilustrativo a implementação detalhada desta análise para dois exemplos diferentes. Os restantes resultados associados às medidas experimentais e respectivo tratamento pelo algoritmo encontram-se compilados no Anexo I (Versão digital no CD).

O primeiro exemplo analisado sem aplicação de radiação de fundo, foi a conhecida sequência standard: R[11110000], G[11001100], B[10101010], com objectivo de verificar os 8 estados distintos possíveis [RGB/RG/RB/R/GB/G/B/OFF]. Na Figura 60 a), encontra-se representada a sequência completa onde são demonstrados os dois períodos dos valores das 2500 amostras obtidas, com o objectivo de analisar apenas um período com 8 Bits pretendidos. Na Figura 60 b) é representado apenas um período da sequência com apenas os 8 Bits, onde cada Bit é composto por 167 amostras.

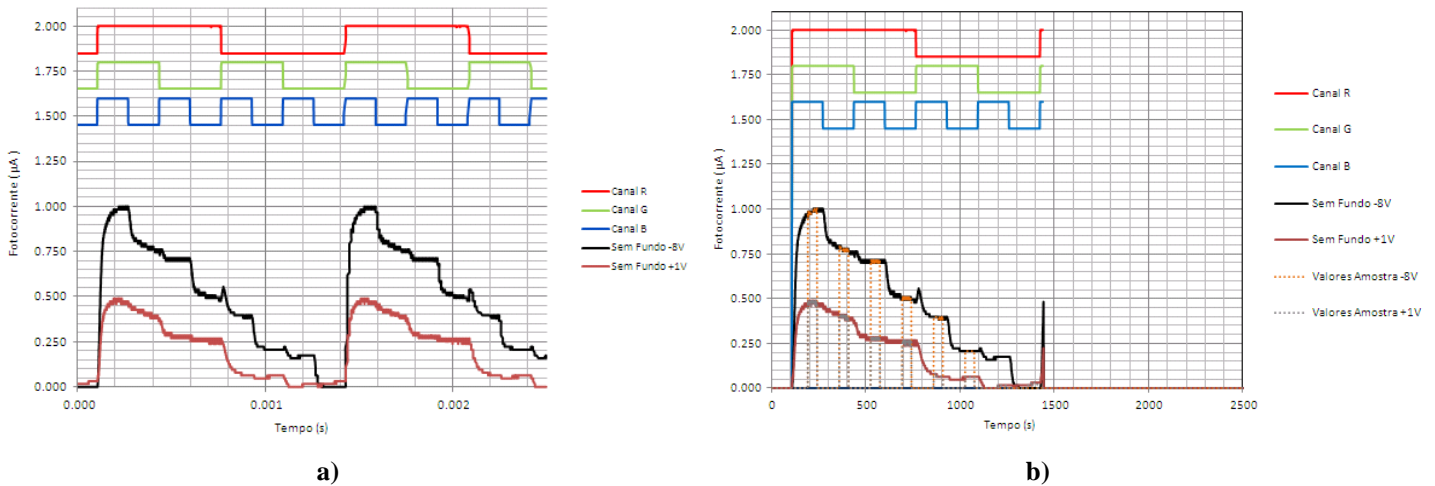


Figura 60 - Sem aplicação de radiação de fundo; a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.

Após analisar os valores obtidos do gráfico representado na Figura 60 b), foram calculados os valores correspondentes a cada intervalo dos patamares de cada nível da fotocorrente e por sua vez calculada a “MODA” dos valores obtidos em cada patamar, obtendo-se os seguintes valores da fotocorrente para cada intervalo, conforme ilustrado na Tabela 4:

				INPUT			OUTPUT s/bck	
Bits	intervalos			R	G	B	RGB -8V	RGB +1V
				MED	MED	MED	MODA	MODA
1º	106	189	239	5	5	5	0.984	0.476
2º	273	356	406	5	5	0	0.778	0.397
3º	440	523	573	5	0	5	0.698	0.286
4º	607	690	740	5	0	0	0.492	0.254
5º	774	857	907	0	5	5	0.397	0.063
6º	941	1024	1074	0	5	0	0.206	0.063
7º	1108	1191	1241	0	0	5	0.175	0.016
8º	1275	1358	1408	0	0	0	0.000	0.032
							INPUT s/bck	

Tabela 4 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.

Ao comparar os resultados obtidos na Tabela 3, com os da Tabela 4, podemos verificar que para a sequência composta RGB, os valores obtidos pela “MODA” tanto para a polarização inversa como directa, estão compreendidos nos intervalos obtidos, mas o mesmo não se verifica para os restantes valores das sequências.

O segundo exemplo analisado foi a sequência: R[11010110], G[11101100], B[10000010] com objectivo de verificar as variações dos seguintes patamares possíveis [RGB/RG/G/R/G/RG/RB/OFF], onde foram alternadas as combinações, repetindo os patamares[RG e G] e removendo os patamares[GB e G], são demonstradas na Figura 61.

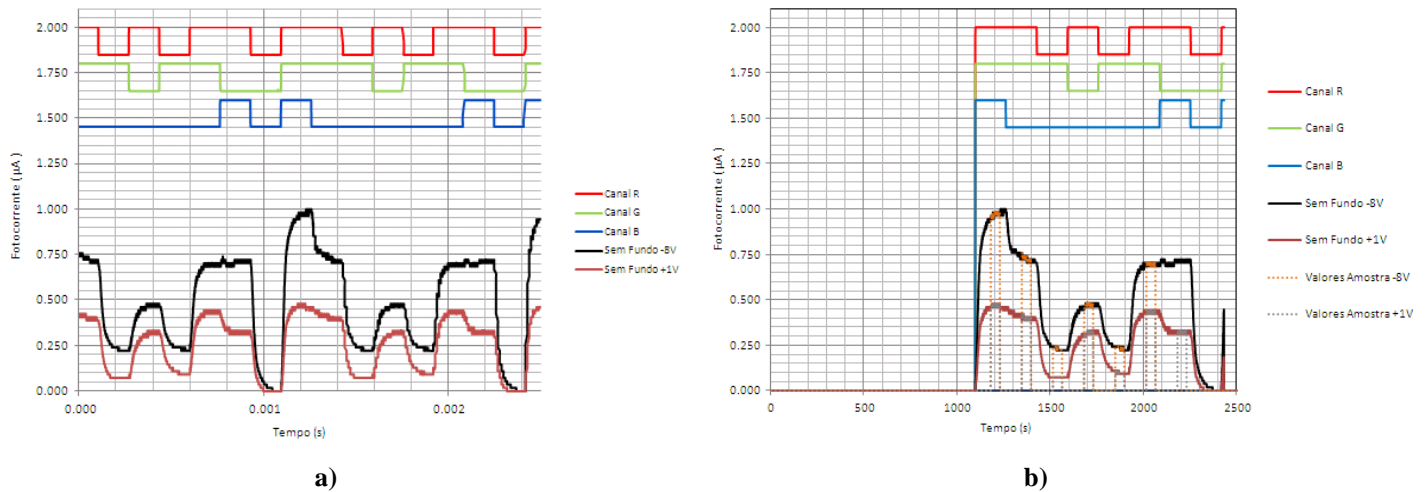


Figura 61 – Sem aplicação de radiação de fundo; a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.

Após analisar os valores obtidos do gráfico representado na Figura 61 b), foram calculados os valores correspondentes a cada intervalo dos patamares de cada nível da fotocorrente e por sua vez calculada a “MODA” dos valores obtidos em cada patamar, obtendo-se os seguintes valores da fotocorrente para cada intervalo, conforme ilustrado na Tabela 5:

Bits	intervalos				INPUT			OUTPUT s/bck	
	1°	2°	3°	4°	R MED	G MED	B MED	RGB -8V MODA	RGB +1V MODA
1°	1096	1179	1229	1262	5	5	5	0.963	0.463
2°	1263	1346	1396	1429	5	5	0	0.722	0.407
3°	1430	1513	1563	1596	0	5	0	0.222	0.074
4°	1597	1680	1730	1763	5	0	0	0.463	0.315
5°	1764	1847	1897	1930	0	5	0	0.241	0.093
6°	1931	2014	2064	2097	5	5	0	0.704	0.426
7°	2098	2181	2231	2264	5	0	5	0.704	0.333
8°	2265	2348	2398	2431	0	0	0	0.000	0.000

Tabela 5 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.

De realçar que nesta sequência para as combinações [RG e RB] os valores para a polarização inversa são iguais, mas na polarização directa são diferentes, logo é possível distinguir estas duas combinações, sabendo que podem ter o mesmo valor, o que vai ser necessário ter cuidado com a distinção destas duas sequências.

Após a análise de várias medidas experimentais realizadas com aplicação de diversas sequências de transmissão por cada LED, que se encontram compiladas no Anexo I (Versão digital no CD), chegou-se a uma conclusão, onde cada canal podia variar nos intervalos abaixo referidos, tanto para a polarização inversa como para a polarização directa. Tabela esta que vai ser aplicada no algoritmo, em conjunto com as validações referidas em capítulos anteriores, onde vai ser realizada a comparação com o valor obtido pela “MODA” do conjunto de intervalo, com os valores desta tabela, para a descodificação dos canais transmitidos.

S/ Aplicação de Fundo					
s/bck	RGB	RG+RB	R+GB	G+B	OFF
-8V	[1.00	[0.915	[0.61	[0.285	[0.039
	0.94]	0.69]	0.25]	0.023]	0.00]
s/bck	RG	R	G	OFF	
+1V	[0.55	[0.53	[0.225	[0.085	
	0.26]	0.16]	0.05]	0.00]	

Tabela 6 - Tabela com os intervalos dos vários níveis, Sem aplicação de fundo.

3.3 - Descrição do algoritmo - Sem aplicação de radiação de fundo

É então a partir do estudo realizado anteriormente da caracterização dos patamares da fotocorrente de canal nível, que chegamos aos resultados obtidos da Tabela 6, que se encontram representados os valores da fotocorrente onde cada nível pode variar. É deste modo que vão ser feitas as comparações com os valores obtidos pela “MODA” a cada conjunto de intervalos de cada nível, sendo estes comparados com os valores da polarização inversa e com os da polarização directa e caso os valores estejam compreendidos nesses intervalos, então será a sequência indicada da tabela, permitindo desta forma a recuperação da informação de cada canal de transmissão, conforme se pode verificar no exemplo a seguir:

Aplicando no algoritmo, a seguinte sequência binária a cada canal: R[10110010], G[00101110], B[11001010], sem aplicação de radiação de fundo e com um Bit Rate de 6000 bps, obtivemos os seguintes resultados :

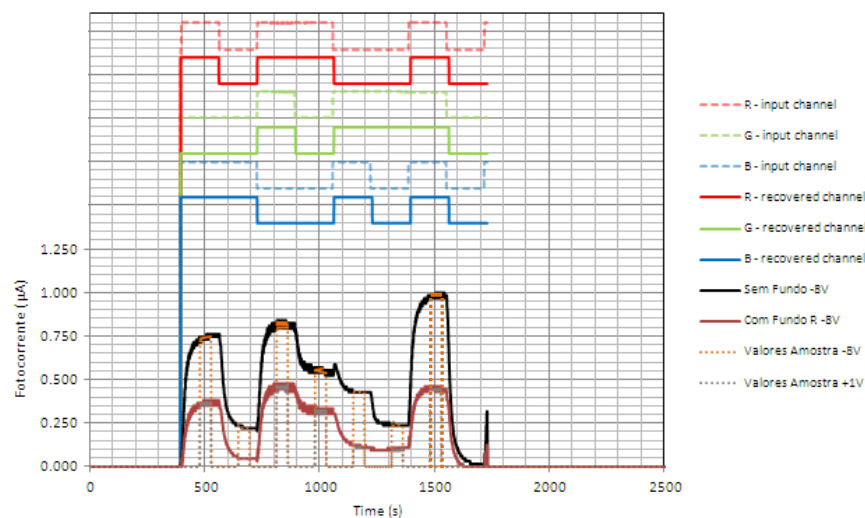


Figura 62 – Sequência RGB analisada pelo algoritmo sem aplicação de radiação de fundo.

Dos resultados, obtivemos a Figura 62, onde se encontra representada na parte superior, a sequência binária de cada canal, a traço tracejado encontra-se representada a sequência original e a traço contínuo, a resposta da sequência binária obtida pelo algoritmo. Esta apresentação serve como forma visual de garantir que o algoritmo recuperou a informação de cada canal com sucesso.

Após analisar os valores do gráfico representado, é então aplicado o algoritmo que vai calcular a “MODA” de cada conjunto de intervalos tanto para a polarização inversa como para a polarização directa e compará-los com os valores obtidos da Tabela 6, sempre que o valor obtido para ambas as polarizações estiver compreendido dentro do intervalo correspondente, será então a sequência indicada da tabela, onde por sua vez será também indicada a sua sequência binária de cada Bit, conforme representado na Tabela 7, obtida do algoritmo:

Bits	intervalos				INPUT			OUTPUT s/bck			
	1º	2º	3º	4º	R MED	G MED	B MED	RGB -8V MODA	RGB +1V MODA	INPUT	RGB
1º	393	476	526	559	5	0	5	0.746	0.365	RB	101
2º	560	643	693	726	0	0	5	0.222	0.048	B	001
3º	727	810	860	893	5	5	0	0.810	0.444	RG	110
4º	894	977	1027	1060	5	0	0	0.540	0.333	R	100
5º	1061	1144	1194	1227	0	5	5	0.429	0.127	GB	011
6º	1228	1311	1361	1394	0	5	0	0.238	0.111	G	010
7º	1395	1478	1528	1561	5	5	5	0.968	0.444	RGB	111
8º	1562	1645	1695	1728	0	0	0	0.016	0.000	OFF	000

Tabela 7 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.

Conforme verificado na Figura 62 e comparando com os resultados obtidos da Tabela 7, podemos concluir que o algoritmo efectuou com sucesso a demultiplexação, conseguindo obter a informação de cada canal transmitido.

Ao ter sido aplicado o algoritmo nas várias medidas experimentais realizadas anteriormente, pode-se concluir que os resultados foram sempre concordantes.

Partindo deste ponto, vamos descrever a aplicação do algoritmo da demultiplexação com aplicação de radiação de fundo.

3.4 - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Vermelho.

Neste ponto vamos descrever o algoritmo com aplicação de radiação de fundo vermelho, onde vamos aplicar a análise que foi desenvolvida no capítulo da caracterização dos patamares da fotocorrente em conjunto com o estudo da influência da aplicação de radiação de fundo, na análise dos dados, foram utilizadas as mesmas experiências anteriormente analisadas, onde a grande diferença vai ser na comparação dos sinais, ao aplicar a radiação de fundo, os sinais a serem analisados foram os da fotocorrente com polarização inversa, sem radiação de fundo com os sinais de fotocorrente com polarização inversa com radiação de fundo vermelho, aplicando o mesmo raciocínio do capítulo anterior, foram efectuadas várias experiências a fim de verificar o comportamento do sinal.

Assim, mostra-se a título ilustrativo a implementação detalhada desta análise para dois exemplos diferentes. Os restantes resultados associados às medidas experimentais e respectivo tratamento pelo algoritmo encontram-se compilados no Anexo II (Versão digital no CD).

Deste modo passamos para o primeiro exemplo analisado, com aplicação de radiação de fundo vermelho, foi a conhecida sequência standard: R[11110000], G[11001100], B[10101010], com o objectivo de verificar os 8 estados distintos possíveis [RGB/RG/RB/R/GB/G/B/OFF]. Na Figura 63 a), encontra-se representada a sequência completa onde são demonstrados os dois períodos dos valores das 2500 amostras, com o objectivo de analisar apenas um período com os 8 Bits pretendidos. Na Figura 63 b) é representado apenas um período da sequência com apenas os 8 Bits, onde cada Bit é composto por 167 amostras.

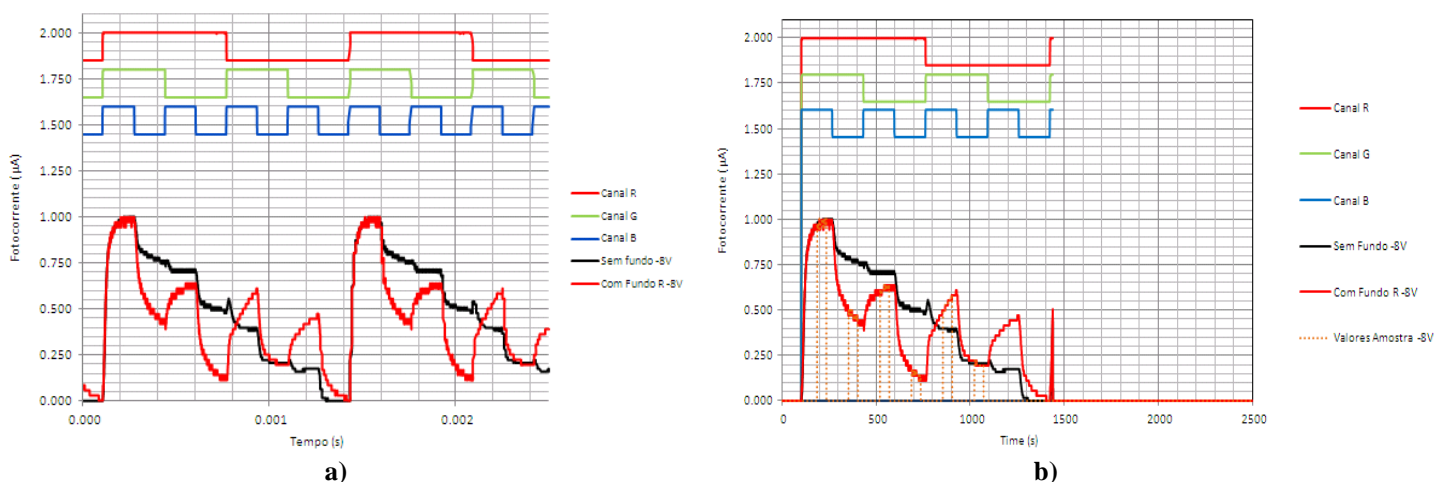


Figura 63 – Aplicação de radiação de fundo vermelho a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.

Após analisar os valores obtidos do gráfico representado na Figura 63 b), foram calculados os valores correspondentes a cada intervalo dos patamares de cada nível da fotocorrente e por sua vez calculada a “MODA” dos valores obtidos em cada patamar, obtendo-se os seguintes valores da fotocorrente para cada intervalo, conforme ilustrado na Tabela 5:

Bits	intervalos			INPUT		
	1°	2°	3°	R	G	B
1°	106	189	239	5	5	5
2°	273	356	406	5	5	0
3°	440	523	573	5	0	5
4°	607	690	740	5	0	0
5°	774	857	907	0	5	5
6°	941	1024	1074	0	5	0
7°	1108	1191	1241	0	0	5
8°	1275	1358	1408	0	0	0

OUTPUT s/bck				OUTPUT bck R		
RGB -8V	RGB +1V	INPUT	RGB	RGB -8V	INPUT	RGB
MODA	MODA			MODA		
0.984	0.476	RGB	111	0.972		
0.778	0.397	RG	110	0.472		
0.698	0.286	RB	101	0.611		
0.492	0.254	R	100	0.139		
0.397	0.063	GB	011	0.556		
0.206	0.063	G	010	0.194		
0.175	0.016	B	001	0.444		
0.000	0.032	OFF	000	0.028		

Tabela 8 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo vermelho.

O segundo exemplo analisado foi: R[11010110], G[11101100], B[10000010] com objectivo de verificar as variações dos seguintes patamares possíveis [RGB/RG/G/R/G/RG/RB/OFF], onde foram alternadas as combinações, repetindo os patamares [RG e G] e removendo os patamares [GB e G], são demonstradas na Figura 64.

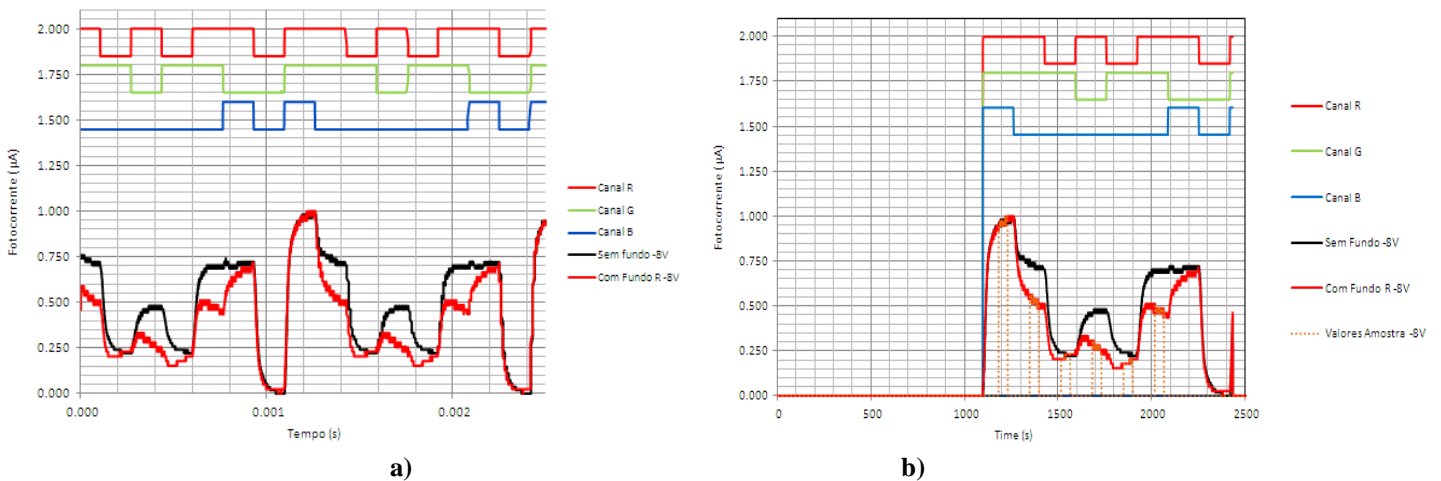


Figura 64 – a) Aplicação de radiação de fundo vermelho a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.

Após analisar os valores do gráfico representado na Figura 64 b), foram calculados os valores correspondentes a cada intervalo dos patamares e por sua vez calculada a “MODA” dos valores obtidos em cada patamar, obtendo-se os seguintes valores da fotocorrente para cada intervalo:

				INPUT			OUTPUT s/bck				OUTPUT bck R		
Bits	intervalos			R	G	B	RGB -8V	RGB +1V	INPUT	RGB	RGB -8V	INPUT	RGB
				MED	MED	MED	MODA	MODA	MODA	MODA	MODA	MODA	MODA
1ª	1096	1179	1229	5	5	5	0.963	0.463	RGB	111	0.974		
2ª	1263	1346	1396	5	5	0	0.722	0.407	RG	110	0.538		
3ª	1430	1513	1563	0	5	0	0.222	0.074	G	010	0.231		
4ª	1597	1680	1730	5	0	0	0.463	0.315	R	100	0.282		
5ª	1764	1847	1897	0	5	0	0.241	0.093	G	010	0.179		
6ª	1931	2014	2064	5	5	0	0.704	0.426	RG	110	0.462		
7ª	2098	2181	2231	5	0	5	0.704	0.333	RB	101	0.667		
8ª	2265	2348	2398	0	0	0	0.000	0.000	OFF	000	0.026		
							INPUT s/bck			INPUT bck R			

Tabela 9 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo vermelho.

É então a partir da análise das várias medidas experimentais realizadas com aplicação de diversas seqüências de transmissão por cada LED com aplicação da radiação de fundo vermelho, que se encontram compiladas no Anexo II (Versão digital no CD), verificou-se que com a aplicação do fundo vermelho, este não influencia muito no canal vermelho, mas amplifica o sinal do canal azul e que atenua ligeiramente o canal verde. Contudo a aplicação do algoritmo decodificador, das experiências com aplicação da radiação de fundo vermelho, consiste em efectuar o cálculo da diferença entre os valores da polarização inversa das experiências sem aplicação de fundo com os valores da polarização inversa das experiências com aplicação de fundo vermelho e verificar se estas diferenças se encontram compreendidas nos intervalos referidos na Tabela 10:

C/ Aplicação do Fundo Vermelho								
-8V	RGB	RG	RB	R	GB	G	B	OFF
S/bck -	>	>	>	>	<	>	<	>
C/bck R	0.052	0.400	0.200	0.422	-0.430	0.170	-0.350	0.030
%	-5%	-40%	-20%	-42%	43%	-17%	35%	-3%

Tabela 10 - Tabela com os intervalos dos vários patamares, Com aplicação de fundo Vermelho.

Chegou-se à conclusão, que quando aplicado a radiação do fundo vermelho nos casos mais extremos podemos ter cerca de 5% de atenuação no sinal composto RGB, cerca de 40% de atenuação no sinal RG, cerca de 20% de atenuação no sinal RB, cerca de 42% de atenuação no sinal R, cerca de 17% de atenuação no sinal G e cerca 3% de atenuação no sinal a OFF. Mas quando temos o sinal GB podemos ter 43% de amplificação e cerca de 35% de amplificação no sinal B. Estes valores foram aferidos com base nos valores obtidos pela “MODA”.

Deste modo vamos comparar os valores obtidos pela MODA nos dois sinais de fotocorrente e verificar se as diferenças entre ambos se encontram compreendidas nos intervalos da Tabela 10 e assim será a seqüência indicada da tabela, permitindo desta forma a recuperação da informação de cada canal de transmissão, conforme podemos verificar no exemplo a seguir:

Aplicando no algoritmo, a seguinte sequência binária a cada canal: R [10110010], G [00101110], B [11001010], com aplicação de radiação de fundo Vermelho a um Bit Rate de 6000 bps, obtivemos os seguintes resultados, conforme ilustrado na Figura 65:

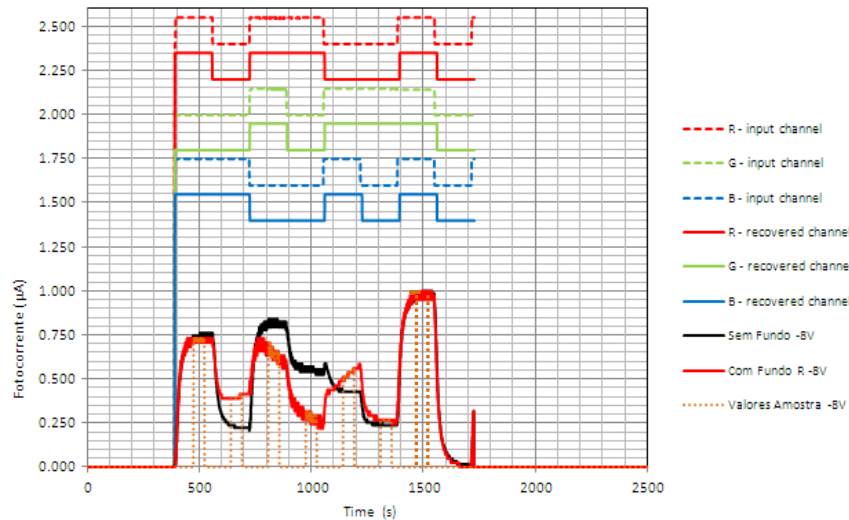


Figura 65 - Sequência RGB analisada pelo algoritmo com aplicação radiação de fundo vermelho.

Dos resultados, mostrados da Figura 65, encontra-se representada a sequência binária de cada canal de transmissão, na parte superior da figura, a traço tracejado a sequência de entrada e o traço contínuo a resposta da sequência binária obtida pelo algoritmo decodificador. Esta apresentação serve como forma visual de garantir que o algoritmo recuperou a informação de cada canal com sucesso.

Após analisar os valores do gráfico representado, é então aplicado o algoritmo que vai calcular a “MODA” de cada conjunto de intervalos tanto para a polarização inversa do sinal sem aplicação de radiação de fundo como para os valores da polarização inversa com aplicação de radiação de fundo vermelho e vai efectuar a diferença entre ambos os valores e compará-los com os valores obtidos da Tabela 10, sempre que o valor obtido para ambas as polarizações estiver compreendido no intervalo correspondente, será então a sequência indicada da tabela, onde por sua vez será também indicada a sua sequência binária de cada Bit, conforme a Tabela 11 obtida do algoritmo:

				INPUT		
				R	G	B
				MED	MED	MED
Bits	intervalos					
1ª	393 476 526 559			5	0	5
2ª	560 643 693 726			0	0	5
3ª	727 810 860 893			5	5	0
4ª	894 977 1027 1060			5	0	0
5ª	1061 1144 1194 1227			0	5	5
6ª	1228 1311 1361 1394			0	5	0
7ª	1395 1478 1528 1561			5	5	5
8ª	1562 1645 1695 1728			0	0	0

				OUTPUT s/bck			OUTPUT bck R		
RGB -8V		RGB +1V		INPUT	RGB	RGB -8V	INPUT	RGB	
MODA	MODA	MODA	MODA	MODA	MODA	MODA	MODA	MODA	
0.746	0.365	RB	101	0.732	RB	101			
0.222	0.048	B	001	0.390	B	001			
0.810	0.444	RG	110	0.659	RG	110			
0.540	0.333	R	100	0.293	R	100			
0.429	0.127	GB	011	0.537	GB	011			
0.238	0.111	G	010	0.268	G	010			
0.968	0.444	RGB	111	0.951	RGB	111			
0.016	0.000	OFF	000	0.000	OFF	000			
INPUT s/bck				INPUT bck R					

Tabela 11 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.

Conforme verificado na Tabela 11 e comparando com os resultados obtidos da tabela 10, podemos concluir que o algoritmo efectuou com sucesso a demultiplexação, conseguindo obter a informação de cada canal transmitido.

O mesmo resultado também se verificou ao ter sido aplicado o algoritmo nas várias medidas experimentais realizadas anteriormente, concluindo-se que os resultados foram sempre concordantes.

3.5 - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Verde.

Nesta secção vamos descrever o algoritmo com aplicação de radiação de fundo verde. Para o efeito vamos aplicar a análise que foi desenvolvida no capítulo da caracterização dos patamares da fotocorrente em conjunto com o estudo da influência da aplicação de radiação de fundo, na análise dos dados. Iremos utilizar as mesmas experiências analisadas anteriormente, onde a grande diferença vai ser na comparação dos sinais. Com a aplicação de radiação de fundo, os sinais a serem analisados foram os da fotocorrente com polarização inversa, sem radiação de fundo com os sinais de fotocorrente com polarização inversa com radiação de fundo verde, aplicando o mesmo raciocínio do capítulo anterior, foram efectuadas várias experiências a fim de verificar o comportamento do sinal.

Assim, mostra-se a título ilustrativo a implementação detalhada desta análise para dois exemplos diferente. Os restantes resultados associados às medidas experimentais e respectivo tratamento pelo algoritmo encontram-se compilados no Anexo III (Versão digital no CD).

Deste modo passamos para o primeiro exemplo analisado com aplicação de radiação de fundo verde, com a seguinte sequência de transmissão: R [11110000], G [11001100], B [10101010], com objectivo de verificar os 8 estados distintos possíveis [RGB/RG/RB/R/GB/G/B/OFF]. Na Figura 66 a), encontra-se representada a sequência completa onde são demonstrados os dois períodos dos valores das 2500 amostras, com o objectivo de analisar apenas um período com os 8 Bits pretendidos. Na Figura 67 b) é representado apenas um período da sequência com apenas os 8 Bits, onde cada Bit é composto por 167 amostras.

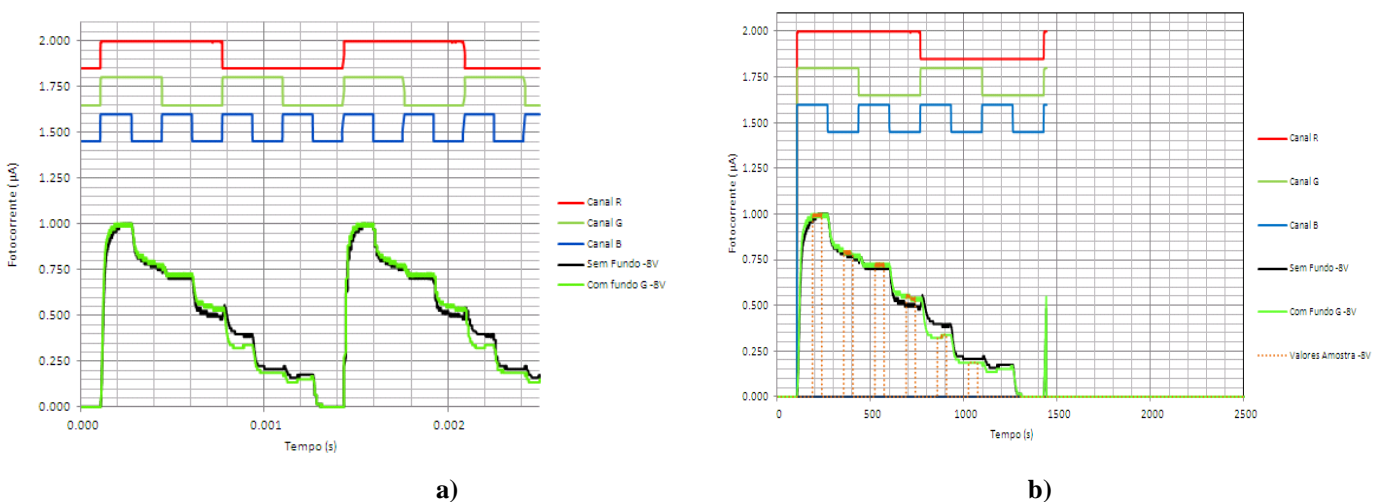


Figura 66 – Aplicação de radiação de fundo verde a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.

Após analisar os valores obtidos do gráfico representado na Figura 66 b), foram calculados os valores correspondentes a cada intervalo dos patamares de cada nível da fotocorrente e por sua vez calculada a “MODA” dos valores obtidos em cada patamar, obtendo-se os seguintes valores da fotocorrente para cada intervalo, conforme ilustrado na Tabela 12.

Bits	intervalos			INPUT		
	1º	2º	3º	R	G	B
1º	106	189	239	5	5	5
2º	273	356	406	5	5	0
3º	440	523	573	5	0	5
4º	607	690	740	5	0	0
5º	774	857	907	0	5	5
6º	941	1024	1074	0	5	0
7º	1108	1191	1241	0	0	5
8º	1275	1358	1408	0	0	0

OUTPUT s/bck				OUTPUT bck G		
RGB -8V	RGB +1V	INPUT	RGB	RGB -8V	INPUT	RGB
MODA	MODA			MODA		
0.984	0.476	RGB	111	0.983	RGB	111
0.778	0.397	RG	110	0.780	RG	110
0.698	0.286	RB	101	0.729	RG	101
0.492	0.254	R	100	0.542	R	100
0.397	0.063	GB	011	0.322	GB	011
0.206	0.063	G	010	0.186	G	010
0.175	0.016	B	001	0.153	B	001
0.000	0.032	OFF	000	0.000	OFF	000

Tabela 12 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo verde.

O segundo exemplo analisado foi aplicação da sequência: R[11010110], G[11101100], B[10000010] com objectivo de verificar as variações dos seguintes patamares possíveis [RGB/RG/G/R/G/RG/RB/OFF], onde foram alternadas as combinações, repetindo os patamares[RG e G] e removido os patamares[GB e G], são demonstradas na Figura 68.

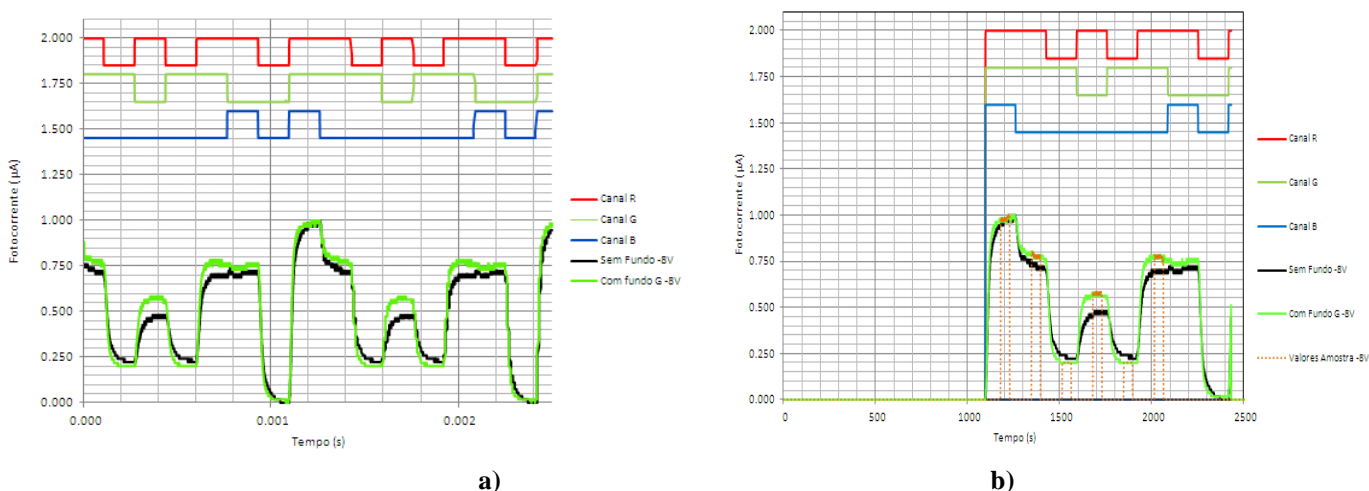


Figura 67 – Aplicação de radiação de fundo verde a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.

Após analisar os valores obtidos do gráfico representado na Figura 67 b), foram calculados os valores correspondentes a cada intervalo dos patamares de cada nível da fotocorrente e por sua vez calculada a “MODA” dos valores obtidos em cada patamar, obtendo-se os seguintes valores da fotocorrente para cada intervalo, conforme ilustrado na Tabela 13.

Bits	intervalos			INPUT			OUTPUT s/bck			OUTPUT bck G			
	1°	2°	3°	R	G	B	RGB -8V	RGB +1V	INPUT	RGB	RGB -8V	INPUT	RGB
1°	1096	1179	1229	5	5	5	0.963	0.463	RGB	111	0.982	RGB	111
2°	1263	1346	1396	5	5	0	0.722	0.407	RG	110	0.782	RG	110
3°	1430	1513	1563	0	5	0	0.222	0.074	G	010	0.200	G	010
4°	1597	1680	1730	5	0	0	0.463	0.315	R	100	0.564	R	100
5°	1764	1847	1897	0	5	0	0.241	0.093	G	010	0.200	G	010
6°	1931	2014	2064	5	5	0	0.704	0.426	RG	110	0.764	RG	110
7°	2098	2181	2231	5	0	5	0.704	0.333	RB	101	0.745	RB	101
8°	2265	2348	2398	0	0	0	0.000	0.000	OFF	000	0.018	OFF	000
							INPUT s/bck				INPUT bck G		

Tabela 13 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.

Após a análise das várias medidas experimentais realizadas com aplicação de diversas sequências de transmissão por cada LED com aplicação da radiação de fundo verde, que se encontram compiladas no Anexo III (Versão digital no CD), verificou-se que com a aplicação do fundo verde, este não influencia muito, atenuando ligeiramente o sinal do canal verde e azul e amplificando ligeiramente o sinal do canal vermelho. Contudo a aplicação do algoritmo decodificador das experiências com aplicação da radiação de fundo verde, consiste em efectuar o cálculo da diferença entre os valores da polarização inversa das experiências sem aplicação de fundo com os valores da polarização inversa das simulações com aplicação de fundo verde e verificar se esta diferenças se encontram compreendidas nos intervalos referidos na Tabela 14:

C/ Aplicação do Fundo Verde								
-8V	RGB	RG	RB	R	GB	G	B	OFF
S/bck -	>	<	<	<	>	>	>	>
C/bck G	0.020	-0.094	-0.060	-0.180	0.110	0.057	0.050	0.020
%	-2%	9%	6%	18%	-11%	-6%	-5%	-2%

Tabela 14 - Tabela com os intervalos dos vários níveis, Com aplicação de radiação de fundo Verde.

O que quando aplicado a radiação do fundo verde nos casos mais extremos podemos ter cerca de 2% de atenuação no sinal composto RGB, cerca de 11% de atenuação no sinal GB, cerca de 6% de atenuação no sinal G, cerca de 5% de atenuação no sinal B e cerca de 2% de atenuação no sinal a OFF, mas quando obtemos o sinal composto RG podemos ter até 9 % da amplificação do sinal RG, cerca de 6% de amplificação no sinal RB e cerca de 18 % de amplificação do sinal R. Estes resultados foram aferidos com base nos valores obtidos pela “MODA”.

Deste modo vamos comparar os valores obtidos pela “MODA” nos dois sinais de fotocorrente e verificar se as diferenças entre ambos se encontram compreendidas nos intervalos da Tabela 14 e assim será a sequência indicada da tabela, permitindo desta forma a recuperação da informação de cada canal de transmissão, conforme podemos verificar no exemplo a seguir:

Aplicando no algoritmo, a seguinte sequência binária a cada canal: R [10110010], G [00101110], B [11001010], com aplicação de radiação de fundo Verde a um Bit Rate de 6000 bps, foram obtidos os seguintes resultados, conforme ilustrados na Figura 68:

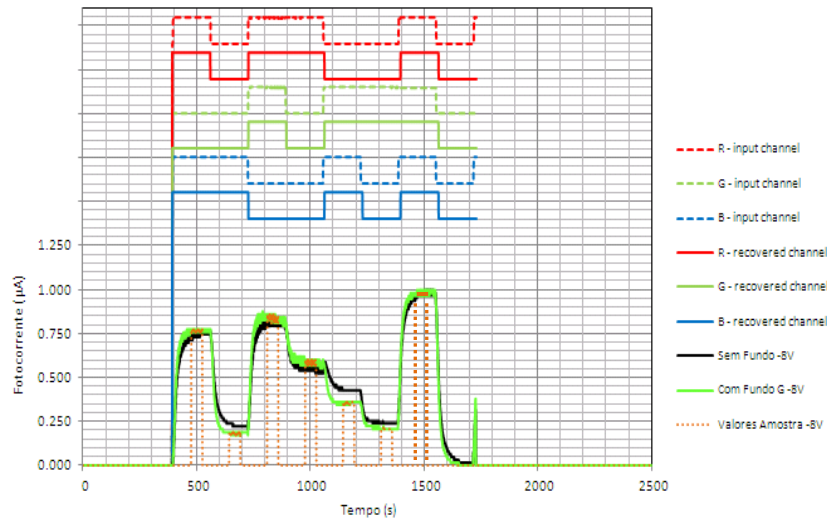


Figura 68 - Sequência RGB analisada pelo algoritmo com aplicação radiação de fundo verde.

Dos resultados mostrados da Figura 68, encontra-se representada a sequência binária de cada canal de transmissão na parte superior da figura, a traço a tracejado a sequência de entrada e o traço contínuo é a resposta da sequência binária obtida pelo algoritmo. Esta apresentação serve como forma visual de garantir que o algoritmo recuperou a informação de cada canal com sucesso.

Após analisar os valores do gráfico representado, é então aplicado o algoritmo que vai calcular a “MODA” de cada conjunto de intervalos tanto para a polarização inversa do sinal sem aplicação de radiação de fundo como para os valores da polarização inversa com aplicação de radiação de fundo verde e vai efectuar a diferença entre ambos os valores e compará-los com os valores obtidos da Tabela 14, sempre que o valor obtido por ambas as polarizações estiver compreendido no intervalo correspondente, será então a sequência indicada da tabela, onde por sua vez será também indicada a sua sequência binária de cada Bit, conforme a Tabela 15 obtida do algoritmo:

Bits	Intervalos				INPUT			OUTPUT s/bck				OUTPUT bck G		
	1º	2º	3º	4º	R MED	G MED	B MED	MODA -8V	MODA +8V	INPUT	RGB	MODA -8V	INPUT	RGB
1º	393	478	526	559	5	0	5	0.746	0.365	RB	101	0.776	RB	101
2º	560	643	693	726	0	0	5	0.222	0.048	B	001	0.190	B	001
3º	727	810	880	893	5	5	0	0.810	0.444	RG	110	0.845	RG	110
4º	894	977	1027	1060	5	0	0	0.540	0.333	R	100	0.603	R	100
5º	1061	1144	1194	1227	0	5	5	0.429	0.127	GB	011	0.362	GB	011
6º	1228	1311	1361	1394	0	5	0	0.238	0.111	G	010	0.207	G	010
7º	1395	1478	1528	1561	5	5	5	0.968	0.444	RGB	111	0.983	RGB	111
8º	1562	1645	1695	1728	0	0	0	0.016	0.000	OFF	000	0.000	OFF	000
								INPUT s/bck			INPUT bck G			

Tabela 15 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo verde.

Conforme verificado na Tabela 15 e comparando com os resultados obtidos da tabela 14, podemos concluir que o algoritmo efectuou com sucesso a demultiplexação, conseguindo obter a informação de cada canal transmitido.

Ao ter sido aplicado o algoritmo nas várias medidas experimentais realizadas anteriormente, pode-se concluir que os resultados também foram sempre concordantes.

3.6 - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo Azul.

Nesta secção vamos descrever a aplicação do algoritmo com aplicação de radiação de fundo azul. Para o efeito vamos também aplicar a análise que foi desenvolvida no capítulo da caracterização dos patamares da fotocorrente em conjunto com o estudo da influência da aplicação de radiação de fundo, na análise dos dados. Fomos utilizar as mesmas experiências de Bits analisadas anteriormente, mas a grande diferença foi na comparação dos sinais. Com aplicação de radiação de fundo os sinais a serem analisados foram os sinais da fotocorrente com polarização inversa, sem aplicação de fundo com os sinais de fotocorrente com polarização inversa com aplicação de radiação de fundo azul, aplicando o mesmo raciocínio dos capítulos anteriores, onde foram efectuadas varias experiências a fim de verificar o comportamento do sinal.

Assim, mostra-se a título ilustrativo a implementação detalhada desta análise para dois exemplos diferente. Os restantes resultados associados às medidas experimentais e respectivo tratamento pelo algoritmo encontram-se compilados no Anexo IV (Versão digital no CD).

Deste modo passamos para o primeiro exemplo analisado com aplicação de radiação do fundo azul, com a seguinte sequência: R[11110000], G[11001100], B[10101010], com objectivo de verificar os 8 estados distintos possíveis [RGB/RG/RB/R/GB/G/B/OFF]. Na Figura 69 a), encontra-se representada a sequência completa onde são demonstrados os dois períodos dos valores das 2500 amostras, com o objectivo de analisar apenas um período com os 8 Bits pretendidos. Na Figura 69 b) é representada apenas um período da sequência com apenas os 8 Bits, onde cada Bit é composto por 167 amostras.

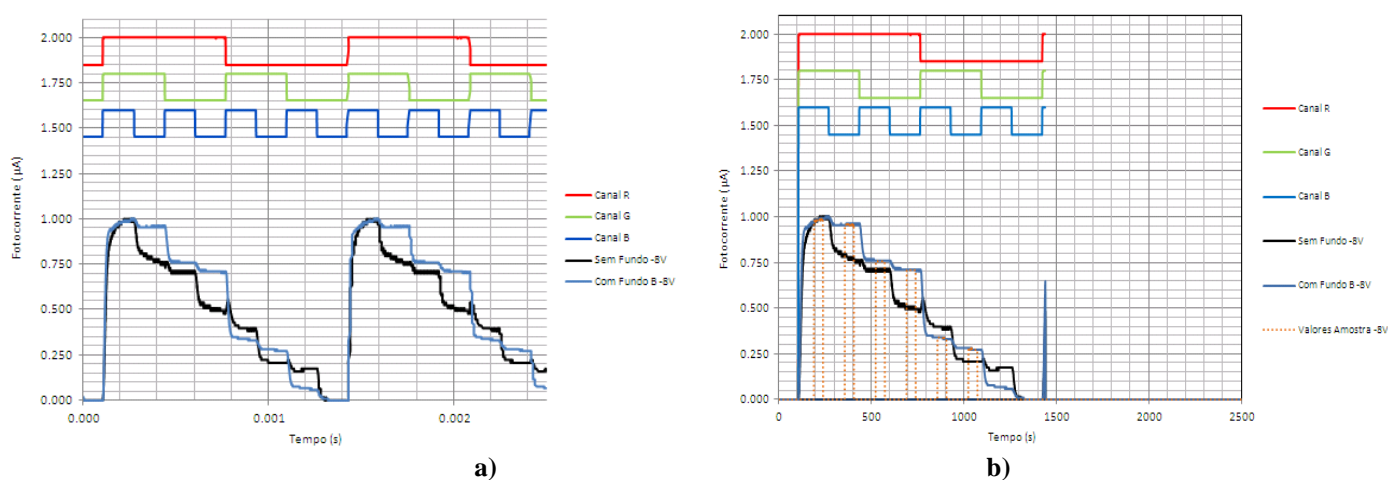


Figura 69 – Aplicação de radiação de fundo azul a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.

Após analisar os valores obtidos do gráfico representado na Figura 69 b), foram calculados os valores correspondentes a cada intervalo dos patamares de cada nível da fotocorrente e por sua vez calculada a “MODA” dos valores obtidos em cada patamar, obtendo-se os seguintes valores da fotocorrente para cada intervalo, conforme ilustrado na Tabela 16.

Bits	intervalos			INPUT		
	1°	2°	3°	R	G	B
1°	106	189	239	5	5	5
2°	273	356	406	5	5	0
3°	440	523	573	5	0	5
4°	607	690	740	5	0	0
5°	774	857	907	0	5	5
6°	941	1024	1074	0	5	0
7°	1108	1191	1241	0	0	5
8°	1275	1358	1408	0	0	0

OUTPUT s/bck				OUTPUT bck B		
RGB -8V	RGB +1V	INPUT	RGB	RGB -8V	INPUT	RGB
MODA	MODA	RGB	111	MODA		
0.984	0.476	RGB	110	0.981		
0.778	0.397	RG	100	0.951		
0.698	0.286	RB	101	0.757		
0.492	0.254	R	100	0.709		
0.397	0.063	GB	011	0.340		
0.206	0.063	G	010	0.272		
0.175	0.016	B	001	0.068		
0.000	0.032	OFF	000	0.000		
INPUT s/bck				INPUT bck B		

Tabela 16 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação da radiação de fundo azul.

O segundo exemplo analisado foi a sequência: R[11010110], G[11101100], B[10000010] com objectivo de verificar as variações dos seguintes patamares possíveis [RGB/RG/G/R/G/RG/RB/OFF], onde foram alternadas as combinações, repetindo os patamares [RG e G] e removidos os patamares [GB e G], são demonstradas na Figura 70.

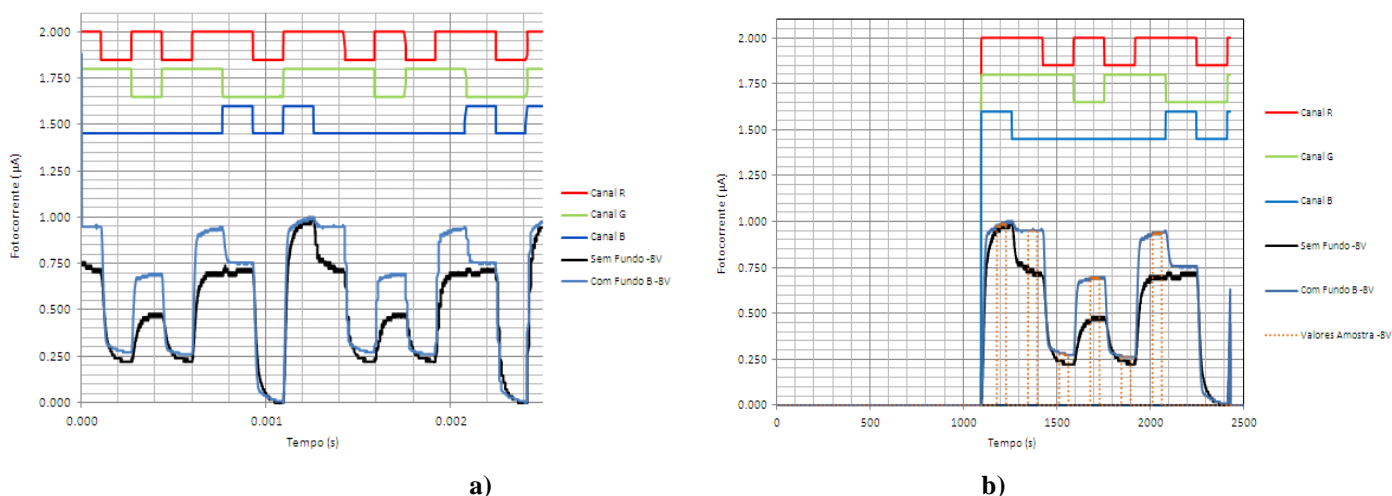


Figura 70 - Aplicação de radiação de fundo azul a) Sequência total com dois períodos; b) Sequência analisar com um período, 8Bits.

Após analisar os valores obtidos do gráfico representado na Figura 70 b), foram calculados os valores correspondentes a cada intervalo dos patamares de cada nível da fotocorrente e por sua vez calculada a “MODA” dos valores obtidos em cada patamar, obtendo-se os seguintes valores da fotocorrente para cada intervalo, conforme ilustrado na Tabela 17.

				INPUT			OUTPUT s/bck				OUTPUT bck B		
Bits	intervalos			R	G	B	RGB -8V	RGB +1V	INPUT	RGB	RGB -8V	INPUT	RGB
				MED	MED	MED	MODA	MODA			MODA		
1°	1096	1179	1229	5	5	5	0.963	0.463	RGB	111	0.980		
2°	1263	1346	1396	5	5	0	0.722	0.407	RG	110	0.949		
3°	1430	1513	1563	0	5	0	0.222	0.074	G	010	0.283		
4°	1597	1680	1730	5	0	0	0.463	0.315	R	100	0.687		
5°	1764	1847	1897	0	5	0	0.241	0.093	G	010	0.263		
6°	1931	2014	2064	5	5	0	0.704	0.426	RG	110	0.939		
7°	2098	2181	2231	5	0	5	0.704	0.333	RB	101	0.758		
8°	2265	2348	2398	0	0	0	0.000	0.000	OFF	000	0.020		
							INPUT s/bck			INPUT bck B			

Tabela 17 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados.

É então a partir da análise das várias medidas experimentais realizadas com aplicação de diversas sequências de transmissão por cada LED com aplicação da radiação de fundo azul, que se encontram compiladas no Anexo IV (Versão digital no CD), verificou-se que com a aplicação do fundo azul, este não influencia muito no canal verde, mas amplifica o sinal do canal azul e que atenua ligeiramente o canal vermelho. Contudo a aplicação do algoritmo decodificador das experiências com aplicação da radiação de fundo azul, consiste em efectuar o cálculo da diferença entre os valores da polarização inversa das experiências sem aplicação de fundo com os valores da polarização inversa das simulações com aplicação de fundo azul e verificar se esta diferença se encontra compreendida nos intervalos referidos na Tabela 18:

C/ Aplicação do Fundo Azul								
-8V	RGB	RG	RB	R	GB	G	B	OFF
S/bck -	>	<	<	<	>	<	>	>
C/bck B	0.025	-0.240	-0.070	-0.300	0.280	-0.150	0.172	0.020
%	-3%	24%	7%	30%	-28%	15%	-17%	-2%

Tabela 18 - Tabela com os intervalos dos vários níveis, Com aplicação de fundo azul.

O que se chegou às conclusões, que quando aplicado a radiação do fundo azul nos casos mais extremos podemos ter cerca de 3% de atenuação no sinal composto RGB, cerca de 28 % de atenuação no sinal GB, cerca de 17% de atenuação no sinal B e cerca de 2% de atenuação no sinal a OFF, mas quando obtemos o sinal RG podemos ter até 24% de amplificação, no caso do sinal RB podemos ter até 7 % de amplificação, cerca de 30% de amplificação no sinal R e cerca de 15% de amplificação no sinal G. Estes resultados foram aferidos com base nos valores obtidos pela “MODA”.

Deste modo vamos comparar os valores obtidos pela “MODA” nos dois sinais de fotocorrente e verificar se a diferença entre ambos se encontra compreendida nos intervalos da Tabela 18 e assim será a sequência indicada na tabela, permitindo desta forma a recuperação da informação de cada canal de transmissão, conforme podemos verificar no exemplo a seguir:

Aplicando no algoritmo, a seguinte sequência binária a cada canal: R [10110010], G [00101110], B [11001010], com aplicação de radiação de fundo Azul a um Bit Rate de 6000 bps, obtivemos os seguintes resultados:

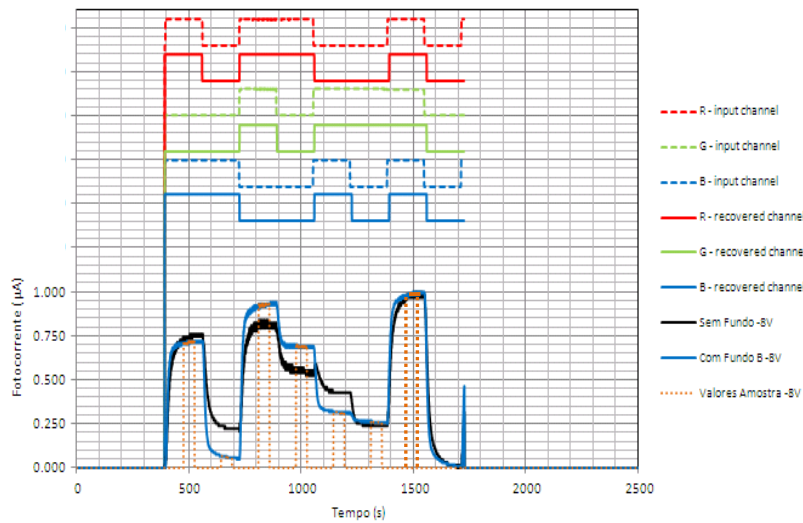


Figura 71 – Sequência RGB analisada pelo algoritmo com aplicação radiação de fundo azul.

Dos resultados mostrados da Figura 71, encontra-se representada a sequência binária de cada canal de transmissão na parte superior da figura, a traço a tracejado a sequência de entrada e o traço contínuo a resposta da sequência binária obtida pelo algoritmo. Esta apresentação serve como forma visual de garantir que o algoritmo recuperou a informação de cada canal com sucesso.

Após analisar os valores do gráfico representado, é então aplicado o algoritmo que vai calcular a “MODA” de cada conjunto de intervalos tanto para a polarização inversa do sinal sem aplicação de radiação de fundo como para os valores da polarização inversa com aplicação de radiação de fundo azul e vai efectuar a diferença entre ambos os valores e compará-los com os valores obtidos da Tabela 18, sempre que o valor obtido para ambas as polarizações estiver compreendido no intervalo correspondente, será então a sequência indicada da tabela, onde por sua vez será também indicada a sua sequência binária de cada Bit, conforme a Tabela 19 obtida do algoritmo:

					INPUT			OUTPUT s/bck				OUTPUT bck B		
Bits	intervalos				R	G	B	RGB -8V	RGB +1V	INPUT	RGB	RGB -8V	INPUT	RGB
					MED	MED	MED	MODA	MODA			MODA		
1°	393	476	526	559	5	0	5	0.746	0.365	RB	101	0.712	RB	101
2°	560	643	693	726	0	0	5	0.222	0.048	B	001	0.058	B	001
3°	727	810	860	893	5	5	0	0.810	0.444	RG	110	0.923	RG	110
4°	894	977	1027	1060	5	0	0	0.540	0.333	R	100	0.692	R	100
5°	1061	1144	1194	1227	0	5	5	0.429	0.127	RG	110	0.317	RG	110
6°	1228	1311	1361	1394	0	5	0	0.238	0.111	G	010	0.260	G	010
7°	1395	1478	1528	1561	5	5	5	0.968	0.444	RGB	111	0.981	RGB	111
8°	1562	1645	1695	1728	0	0	0	0.016	0.000	OFF	000	0.019	OFF	000
								INPUT s/bck			INPUT bck B			

Tabela 19 - Tabela com os intervalos e a MODA de cada patamar da fotocorrente dos 8 Bits analisados com aplicação de radiação de fundo azul.

Conforme verificado na Tabela 19 e comparando com os resultados obtidos da tabela 18, podemos concluir que o algoritmo efectuou com sucesso a demultiplexação, conseguindo obter a informação de cada canal transmitido.

Ao ter sido aplicado o algoritmo nas várias medidas experimentais realizadas anteriormente, pode-se concluir que os resultados também foram sempre concordantes.

Cap. 4 - Funcionamento do Simulador

Neste capítulo será apresentada a descrição das variantes de como utilizar a interface gráfica do simulador que permite efectuar o reconhecimento autónomo da informação transmitida por cada canal através da leitura do sinal da fotocorrente fornecido pelo dispositivo, com e sem aplicação de radiação de fundo.

O simulador pode ser executado em computadores com diferentes sistemas operacionais (Windows, Linux e Mac). Para isso, basta ter instalado o Microsoft Office ou OpenOffice. Após a referida instalação, o computador não precisa de nenhuma versão específica do Microsoft Office ou do OpenOffice para executar o simulador.

O programa é iniciado com uma janela de apresentação, representado na Figura 72, que representa o menu principal do simulador.

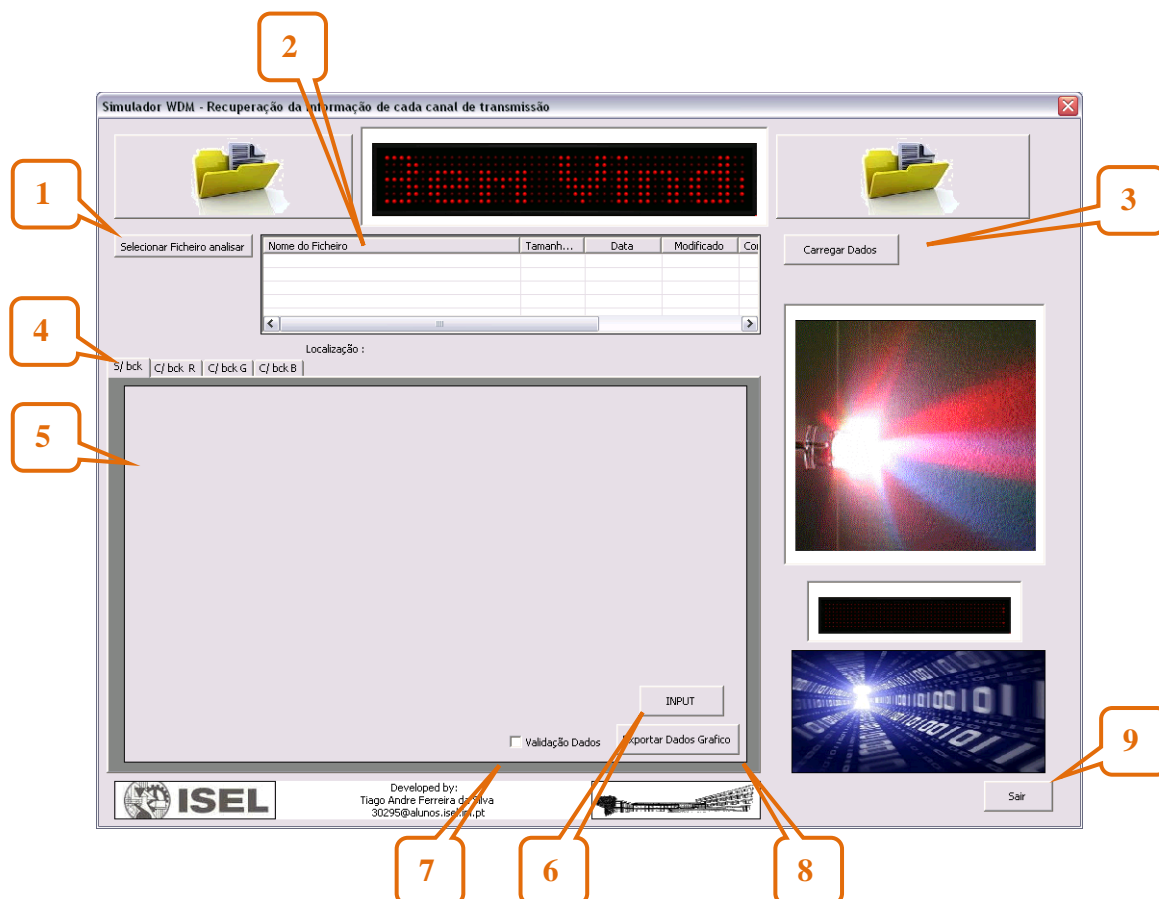


Figura 72 – Menu do simulador.

Nesta janela podemos verificar os vários botões/menus disponíveis no simulador, que se encontram numerados de 1 a 9 para mais facilmente serem referenciados:

1 Após iniciar o simulador, o utilizador pode seleccionar a pasta onde se encontram os ficheiros com as medições em laboratório, às quais se pretendem analisar no simulador de forma a obter o reconhecimento de cada canal de transmissão dos LED R&G&B, conforme ilustrado na Figura 73.

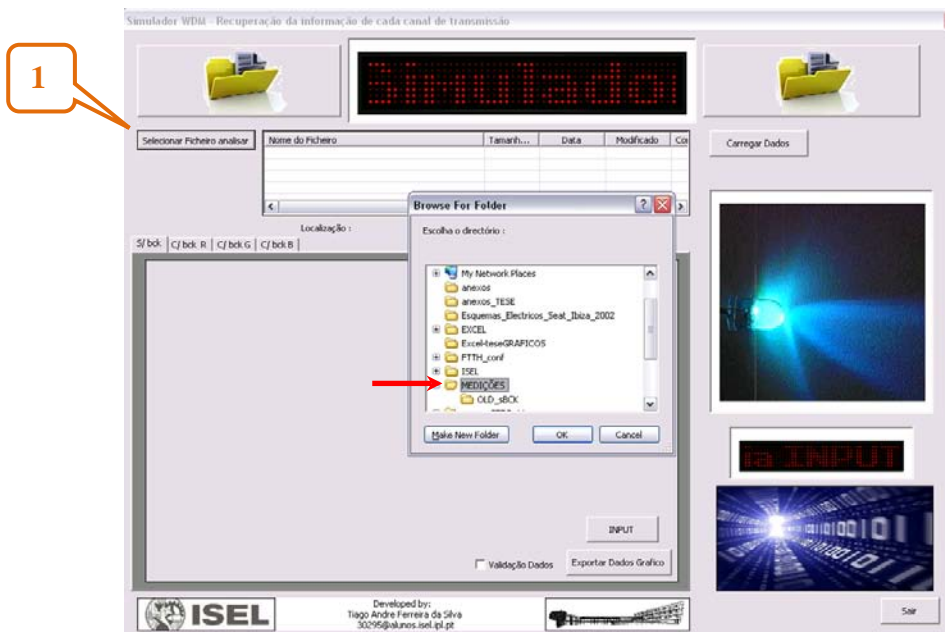


Figura 73 – Seleccionar o ficheiro que o utilizador pretende analisar no simulador.

2 O utilizador após ter escolhido a pasta onde se encontram os ficheiros das medições em laboratório, deve seleccionar o ficheiro que pretende analisar no simulador, conforme ilustrado na Figura 74.

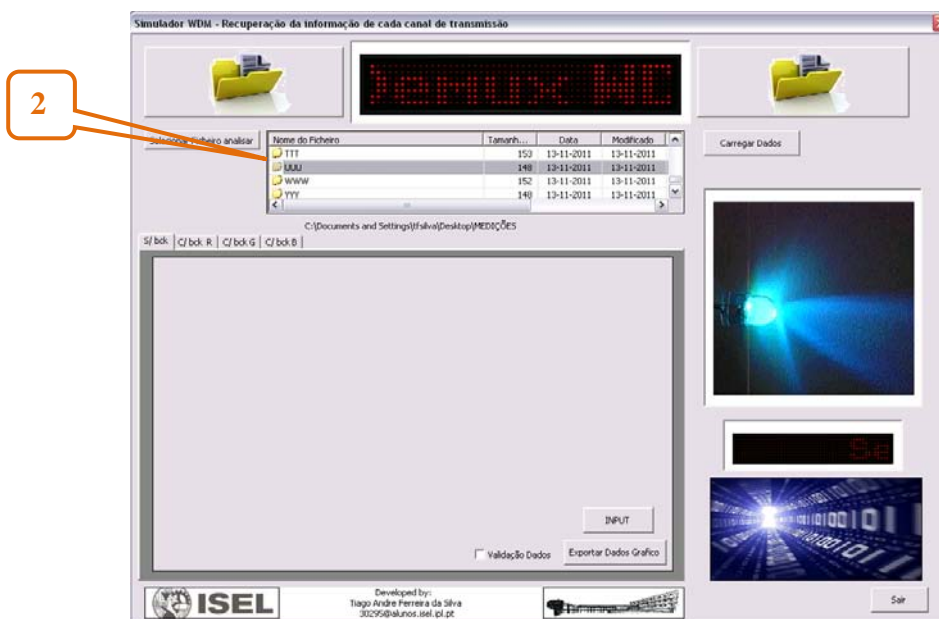


Figura 74 – Seleccionar o ficheiro com as medições analisar pelo algoritmo.

3 Ao seleccionar o ficheiro pretendido, vamos carregar os dados para o simulador, deste modo o utilizador deve carregar no botão “Carregar Dados”, para que sejam copiados os dados para o simulador de forma a serem analisados. Ao serem copiados os dados, é apresentada uma mensagem com a indicação que os dados foram transferidos com sucesso.

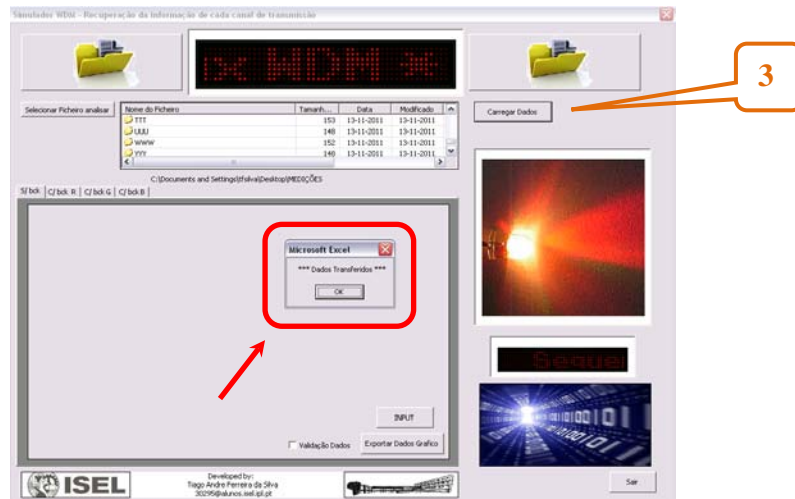


Figura 75 – Copiar os dados do ficheiro seleccionado para o simulador.

4 Após este processo, o utilizador pode seleccionar a janela em que pretende ver apresentados os gráficos dos resultados obtidos em laboratório (sem ou com aplicação de radiação de fundo) do Canal Vermelho, Verde ou Azul.

5 Nesta janela encontram-se representados os gráficos dos resultados obtidos. Neste exemplo, sem aplicação de radiação de fundo, onde na parte superior são mostradas as sequências binárias de cada LED, o que permite fazer a comparação dos sinais obtidos com polarização inversa e directa a fim de se obter as sequências dos canais de entrada.

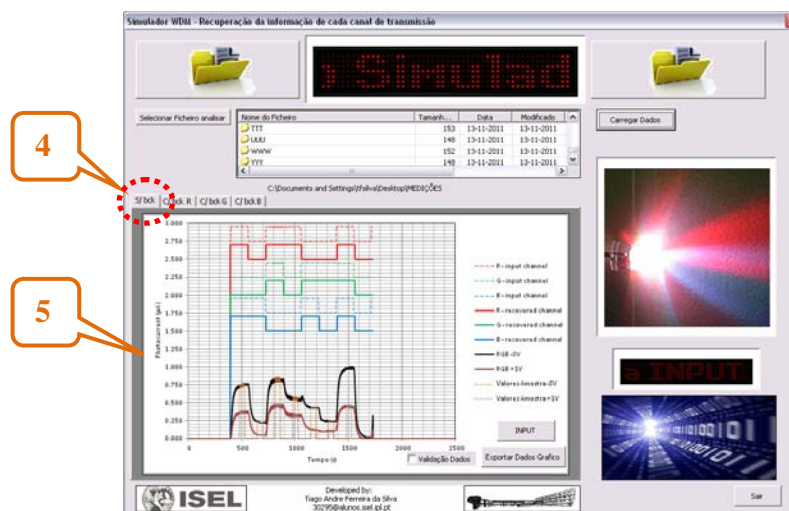


Figura 76 – Análise dos dados sem aplicação da polarização óptica.

5 Neste exemplo encontram-se representados os gráficos dos resultados obtidos, com aplicação de radiação de fundo do canal Vermelho. Na parte superior são apresentadas as sequências binárias de cada canal de entrada (a tracejado). Os sinais de fotocorrente mostrados permitem a comparação dos sinais medidos com polarização inversa sem aplicação de radiação de fundo e com radiação de fundo Vermelho a fim de se obter a sequência de entrada.

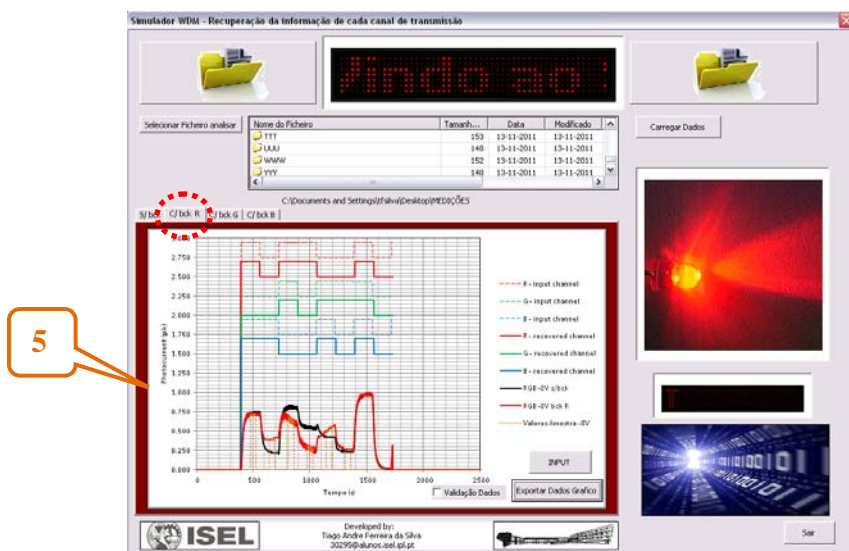


Figura 77 – Análise dos dados com aplicação da polarização óptica do canal Vermelho.

5 Na Figura 78 encontram-se representados os gráficos dos resultados obtidos, com aplicação de radiação de fundo do canal Verde. Na parte superior são apresentadas as sequências binárias de cada canal de entrada (a tracejado), Os sinais de fotocorrente mostrados permitem a comparação dos sinais medidos com polarização inversa sem aplicação de radiação de fundo e com radiação de fundo Verde a fim de se obter a sequência de entrada.

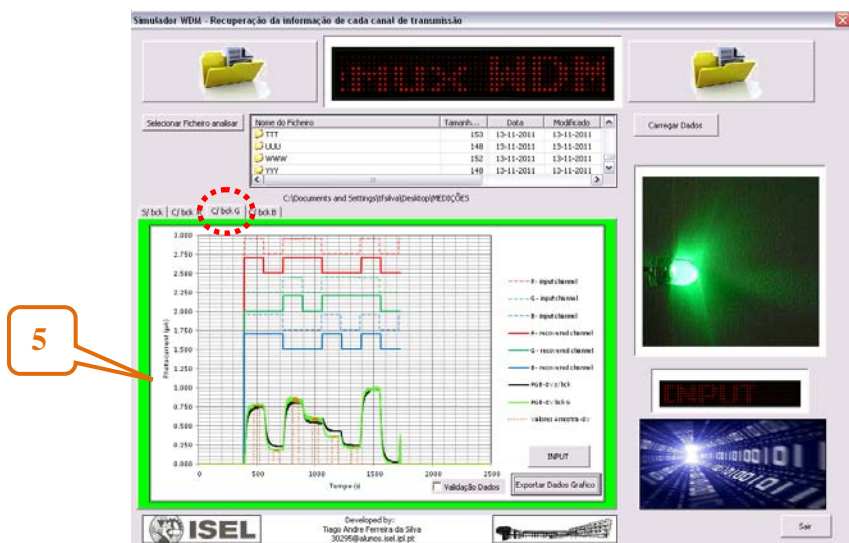


Figura 78 – Análise dos dados com aplicação da polarização óptica do canal Verde.

5 Na Figura 79 encontram-se representados os gráficos dos resultados obtidos, com aplicação de radiação de fundo do canal Azul. Na parte superior são apresentadas as sequências binárias de cada canal de entrada (a tracejado), Os sinais de fotocorrente mostrados permitem a comparação dos sinais medidos com polarização inversa sem aplicação de radiação de fundo e com radiação de fundo Azul a fim de se obter a sequência de entrada.

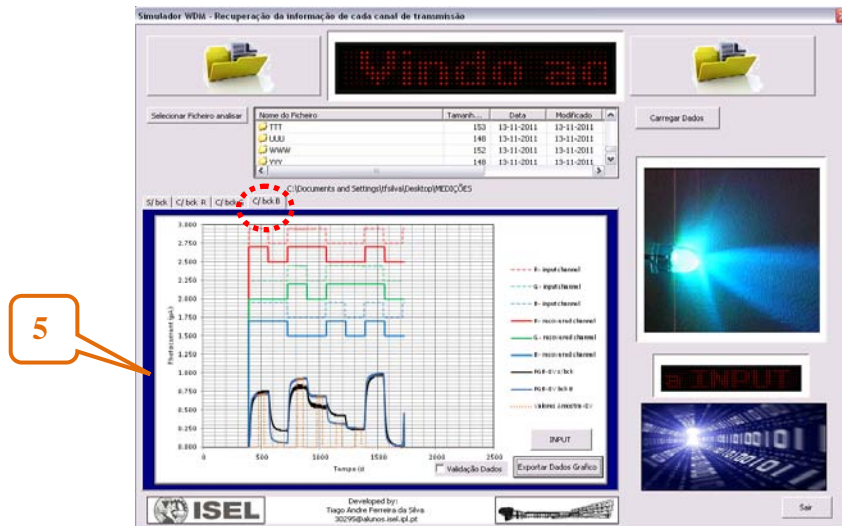


Figura 79 – Análise dos dados com aplicação da polarização óptica do canal Azul.

6 Após o utilizador seleccionar a janela que pretende ver apresentados os gráficos dos resultados obtidos em laboratório (sem ou com aplicação de radiação de fundo). Neste exemplo, sem aplicação de radiação de fundo, ao carregar no botão “INPUT” irá aparecer uma nova mensagem com a indicação da sequência binária de cada canal de transmissão obtida pelo algoritmo.

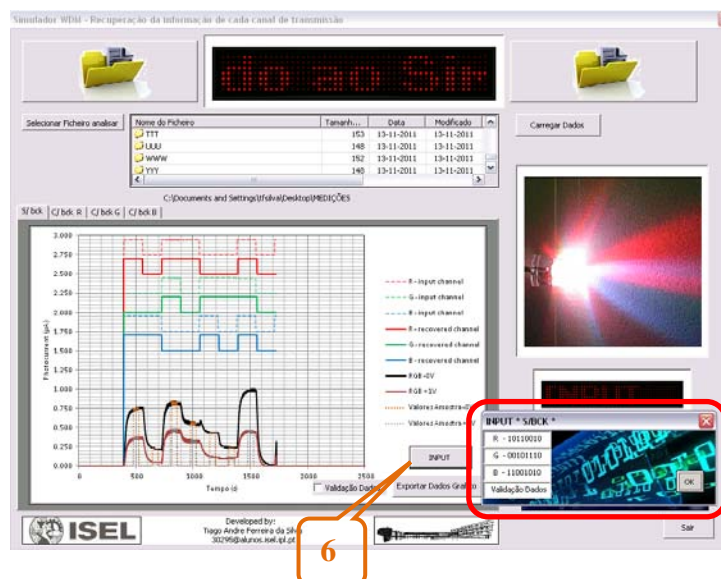


Figura 80 – Visualização da sequência binária INPUT de cada canal de transmissão obtida pelo algoritmo.

- 7 O utilizador ao pretender visualizar a sequência binária INPUT, pode ainda seleccionar a opção “Validação de Dados”, opção que permite a validação da sequência binária obtida pelo algoritmo com a sequência binária original.

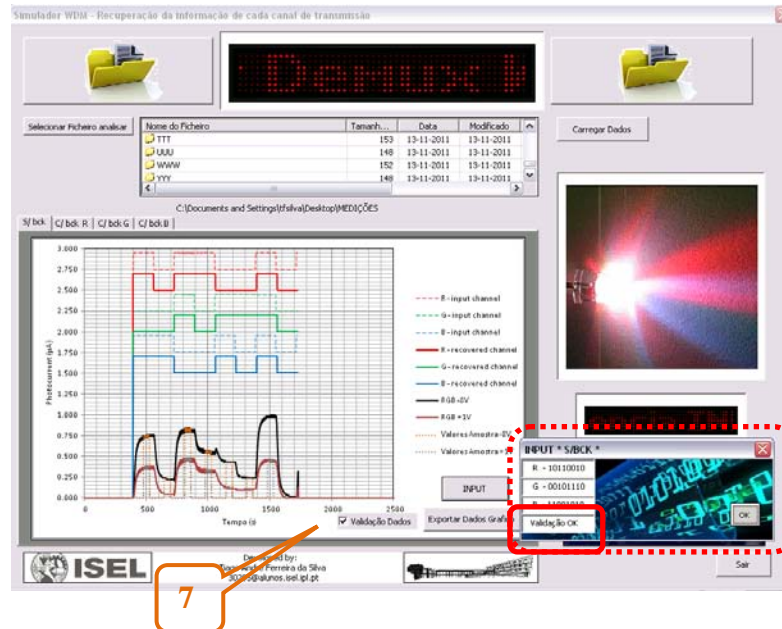


Figura 81 – Validação da sequência binária obtida pelo algoritmo com a sequência binária original.

- 8 Após o procedimento de o utilizador seleccionar a janela, onde se encontra representado os resultados pretendidos, este pode Exportar os dados para outro ficheiro Excel, para isso basta o utilizador carregar no botão “Exportar Dados Gráfico” e indicar o ficheiro onde pretende exportar os dados.

- 9 Após todo processo de análise, o utilizador pode seleccionar o botão “Sair” para fechar o simulador.

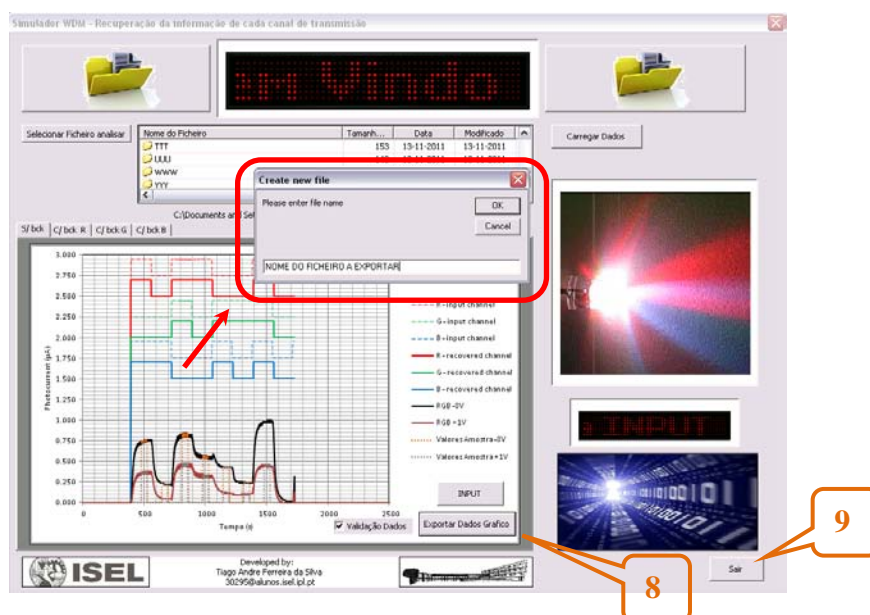


Figura 82 – Análise dos dados com a possibilidade de Exportar Dados

Cap. 5 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.

Esta dissertação consiste na continuação do estudo de um dispositivo WDM demultiplexador baseado num semiconductor de a-SiC:H/ a-Si:H de sinais transmitidos na zona visível do espectro electromagnético, tendo como objectivo utilizar este dispositivo para realizar a demultiplexagem de sinais ópticos e permitir o reconhecimento dos canais de entrada. Deste modo foi desenvolvido, implementado e testado um algoritmo e uma interface gráfica do simulador que permita efectuar o reconhecimento autónomo da informação transmitida por cada canal através da leitura do sinal da fotocorrente fornecido pelo dispositivo com e sem aplicação de radiação de fundo, de modo a que o utilizador possa executar todo o processo de um modo simples, funcional e simultaneamente, atractivo e de fácil manuseamento, de forma a explorar a sua utilização na implementação da tecnologia WDM.

Um dos grandes desafios iniciais, na construção do algoritmo, foi a compreensão das características e propriedades de filtragem óptica do sensor utilizado. Outro desafio, foi na importância da boa definição da caracterização dos patamares da fotocorrente associados a cada uma das combinações de polarização dos LEDs envolvidos, sendo este, um factor importante para permitir um melhor desempenho na recuperação da informação transmitida, das quais foram optimizadas com aplicação de várias experiências realizadas em laboratório e com o auxílio de trabalhos anteriores bem como, com notas de outros docentes, permitindo desde logo implementar o algoritmo. Por fim, outro desafio foi na implementação de uma interface gráfica amigável (“user-friendly”), que fosse funcional e simultaneamente atractiva para o utilizador.

Quanto aos desenvolvimentos futuros do algoritmo/simulador, existem alguns pontos de melhoramento, nomeadamente a possibilidade de leitura e tratamento dos dados obtidos directamente do osciloscópio. O algoritmo foi construído com base em ensaios em espaço livre e esta condição de funcionamento levou a que em alguns ensaios se observasse um ruído na fotocorrente por elementos luminosos externos, displays e leds dos aparelhos de medida em torno da bancada de trabalho. Este modo de propagação também se revela perdulário da potência emitida pelos LEDs pois a uma distância de cerca de 16 cm entre os emissores e o fotodíodo há uma perda aproximada de cerca de 80% da potência emitida pelos LEDs. A utilização da fibra óptica como meio de transmissão é outro aspecto a implementar para a construção futura de um protótipo de

sistemas de comunicação óptica, para além disso, testes com outros comprimentos de onda poderá também complementar a caracterização do desempenho do dispositivo. A variação da intensidade do fundo é outra vertente desta linha de investigação que merece ser explorada, bem como a aplicação de fundos com dois ou mais comprimentos de onda, tanto para emissores como na aplicação de radiação de fundo. Outro aspecto que carece de optimização é o estudo do desempenho do fotodetector para frequências mais altas para a taxa de transmissão.

Em relação ao sistema de processamento desenvolvido, os resultados obtidos permitiram demonstrar a demultiplexagem e a partir do algoritmo desenvolvido, efectuar o reconhecimento autónomo da informação transmitida por cada canal de entrada. Contudo, o seu desempenho pode ainda ser melhorado de forma a conseguir uma melhor aproximação do sinal original. Esta melhoria pode ser conseguida através de um acoplamento dos leds à fibra óptica utilizando o multiplexador de três entradas.

Desta forma com a utilização deste sensor WDM e como meio de transmissão a fibra óptica de plástico (POF), conseguimos ter um sistema de comunicação a curta distância.

As aplicações previstas centram-se na comunicação a curta distância através de fibras ópticas de plástico como por exemplo ligações internas de pequenas empresas. O baixo custo, tanto da tecnologia das fibras ópticas como do sensor (baseado na tecnologia de a-Si:H), é outra das vantagens da utilização deste dispositivo na demultiplexagem de sinais na região do visível.

O estudo desenvolvido nesta dissertação permitiu conhecer melhor os dispositivos WDM, nomeadamente aprofundar o conhecimento sobre a demultiplexagem óptica usada no dispositivo semiconductor. Este dispositivo funciona como filtro de cor controlado por tensão, e permite controlar a selectividade espectral no canal de transmissão, regulando a regeneração do sinal óptico transmitido. Desta análise, poderá ser possível estender o âmbito das comunicações de curta distância a um leque mais vasto de aplicações.

O estudo desenvolvido nesta dissertação permitiu complementar e consolidar todo um conjunto de conhecimentos das matérias associadas à física dos semicondutores e que em algumas das vertentes nunca tinham sido abordadas, nem na vertente académica, nem na vertente profissional que desenvolvo no ramo das telecomunicações desde a conclusão da minha primeira etapa académica.

Além dos conhecimentos adquiridos directamente associados com a tecnologia analisada houve todo um conjunto de aprendizagem de processos e metodologias de trabalho associadas aos

ensaios desenvolvidos e que me permitiram perceber a especificidade dos mesmos nesta área de conhecimento.

Anexos - Paper publicado no CETC_2011

Anexo I - Descrição do algoritmo - Sem aplicação de radiação de fundo.

Anexo II - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo **Vermelho**.

Anexo III - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo **Verde**.

Anexo IV - Descrição do algoritmo - Com aplicação de radiação de fundo **Azul**.

(CD em Anexo)