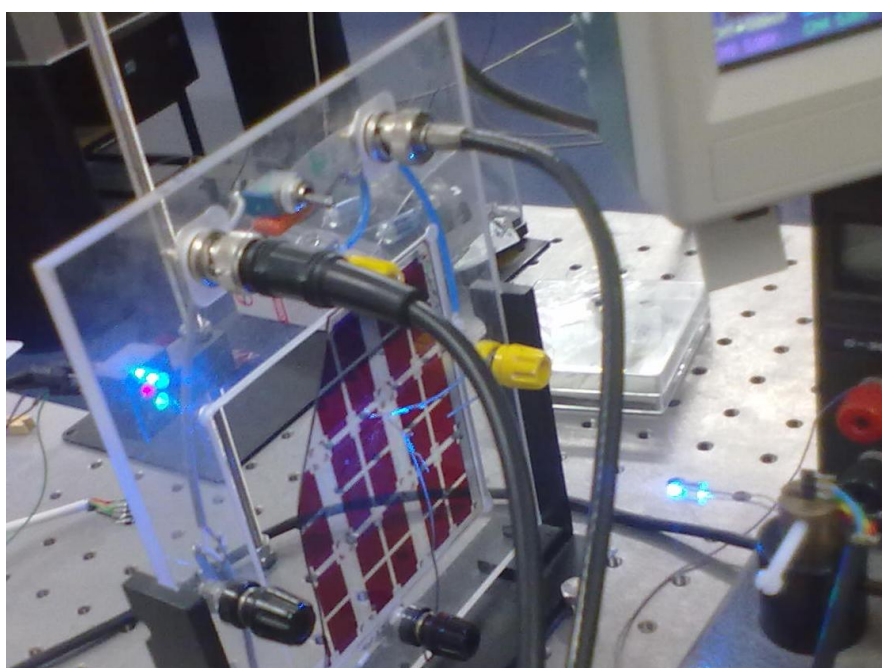




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E
TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES

Fotodetector e dispositivo WDM integrados



Hugo Miguel Naldinho Ferraz

(Licenciado em Engenharia Electrónica e Computadores)

TRABALHO FINAL DE MESTRADO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES

Orientador: Doutora Paula Louro Antunes
Co-Orientador: Doutora Manuela Vieira

Júri:
Presidente: Prof. Mário Véstias
Vogal: Prof. Alessandro Fantoni

Novembro de 2012

Agradecimentos

Chegado o culminar de um percurso académico com a apresentação desta dissertação e face à sua respectiva importância há que agradecer e reconhecer o apoio e empenho de algumas pessoas, que directa ou indirectamente, contribuíram para a finalização do trabalho apresentado:

À Professora Doutora Paula Louro Antunes, professora orientadora desta dissertação, por me ter proporcionado a realização da mesma na divulgação deste tema, pela sua disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e a constante revisão e acompanhamento da dissertação face às diversas dificuldades que surgiram.

A todos os meus colegas e amigos, que tanto me apoiaram, deram as suas importantes opiniões e conhecimentos transmitidos, sem os quais não poderia chegar a esta fase.

Aos meus pais, que sabiamente e com muito esforço me educaram, oferecendo-me as melhores condições de estudo que me permitem agora apresentar esta dissertação.

À minha querida esposa pelo apoio constante, opinião crítica, e encorajamento para a finalização desta dissertação.

Resumo

Ao longo deste trabalho é apresentada a caracterização optoelectrónica de uma estrutura semicondutora empilhada de fotodíodos PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*), baseados em silício amorfo hidrogenado (a-Si:H - *Hydrogenated Amorphous Silicon*) e siliceto de carbono amorfo hidrogenado (a-SiC:H - *Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide*), em que ambos funcionam como filtros ópticos na zona visível do espectro electromagnético e cuja sensibilidade espectral na região do visível é modulada pelo sinal de tensão eléctrico aplicado e pela presença de polarização óptica adicional (radiação de fundo).

Pretende-se utilizar a característica de sensor de cor destes dispositivos semicondutores para realizar a demultiplexagem de sinais ópticos e desenvolver um algoritmo que permita fazer o reconhecimento autónomo do sinal transmitido em cada canal, tendo em vista a utilização de vários canais para a transmissão de sinais a curta distância.

A transmissão destes sinais deverá ser suportada no meio de transmissão fibra óptica, que constituirá uma importante mais-valia na optimização do sistema WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), permitindo optimizar a transmissão de sinais. Pelas suas capacidades intrínsecas, as fibras ópticas de plástico (POF - *Plastic Optical Fibers*) são uma solução adequada para a transmissão de sinais no domínio visível do espectro electromagnético a curtas distâncias.

Foi realizada uma sucinta caracterização optoelectrónica da estrutura semicondutora sob diferentes condições de iluminação, variando o comprimento de onda e a iluminação de fundo que influencia a resposta espectral do dispositivo semicondutor, variando as cores dos fundos incidentes, variando o lado incidente do fundo sobre a estrutura semicondutora, variando a intensidade desses mesmos fundos incidentes e também variando a frequência do sinal de dados.

Para a transmissão dos sinais de dados foram utilizados três dispositivos LED (*Light-Emitting Diode*) com as cores vermelho (626nm), verde (525nm) e azul (470nm) a emitir os respectivos sinais de dados sobre a estrutura semicondutora e onde foram aplicadas diversas configurações de radiação de fundo incidente, variando as cores dos fundos incidentes, variando o lado incidente do fundo sobre a estrutura semicondutora e variando também a intensidade desses mesmos fundos incidentes.

Com base nos resultados obtidos ao longo deste trabalho, foi possível aferir sobre a influência da presença da radiação de fundo aplicada ao dispositivo, usando diferentes sequências de dados

transmitidos nos vários canais. Sob polarização inversa, e com a aplicação de um fundo incidente no lado frontal da estrutura semicondutora os valores de fotocorrente gerada são amplificados face aos valores no escuro, sendo que os valores mais altos foram encontrados com a aplicação do fundo de cor violeta, contribuindo para tal, o facto do sinal do canal vermelho e canal verde serem bastante amplificados com a aplicação deste fundo.

Por outro lado, com a aplicação dos fundos incidentes no lado posterior da estrutura semicondutora, o sinal gerado não é amplificado com nenhuma cor, no entanto, a aplicação do fundo de cor azul proporciona a distinção do sinal proveniente do canal azul e do canal vermelho, sendo que quando está presente um sinal do canal vermelho, o sinal é fortemente atenuado e com a presença do sinal do canal azul o sinal gerado aproxima-se mais do valor de fotocorrente gerada com a estrutura no escuro.

O algoritmo implementado ao longo deste trabalho, permite efectuar o reconhecimento autónomo da informação transmitida por cada canal através da leitura do sinal da fotocorrente fornecida pelo dispositivo quando sujeito a uma radiação de fundo incidente violeta no lado frontal e uma radiação de fundo incidente azul no lado posterior. Este algoritmo para a descodificação dos sinais WDM utiliza uma aplicação gráfica desenvolvida em *Matlab* que com base em cálculos e comparações de sinal permite determinar a sequência de sinal dos três canais ópticos incidentes.

O trabalho proposto nesta tese é um módulo que se enquadra no desenvolvimento de um sistema integrado de comunicação óptica a curta distância, que tem sido alvo de estudo e que 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 dentro do domínio do espectro visível e utilizando as POF como meio de transmissão.

Palavras-chave: Fibra óptica de plástico (POF), dispositivos semicondutores, optoelectrónica, multiplexagem/demultiplexagem óptica, descodificação de sinais.

Abstract

On this thesis is made the optoelectronic characterization of semiconductor structure using stacked photodiodes PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*) based on hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) and hydrogenated amorphous silicon carbide (a-SiC:H), that works as optical filters in the visible region of the electromagnetic spectrum whose spectral sensitivity in the visible region is modulated by the applied voltage and also by the presence of additional optical bias (background radiation).

It is intended to use the color sensor characteristic of this semiconductor to perform optical demultiplexing and also create an algorithm that will permit auto-recognition of the transmitted signal on each channel.

The transmission of these signals should be made under optical fibers, which will be an important asset in optimizing signal transmission through WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) system. Due to its inherent capabilities, the POF (*Plastic Optical Fibers*) is an appropriate solution for the signal transmission on the visible electromagnetic spectrum at short distances.

We performed a brief characterization of the optoelectronic semiconductor structure under different lighting conditions, varying the wavelength and the backlight which influences the spectral response of the semiconductor device, varying the color of incident backlight, varying the incident side on the semiconductor structure, varying the intensity of those backlight and also varying the frequency of the data signal.

To transmit the data signals on the semiconductor structure are used three LED (*Light-Emitting Diode*) devices with the colors red (626nm), green (525nm) and blue (470nm). Different background settings were applied, varying the backlight colors, varying the incident side on the semiconductor structure and also varying the intensity of the backlight.

Based on the results obtained on this study, was understood about the influence of background radiation applied to the device, using transmitted different data signals. Under reverse bias, and applying background radiation on the front side of the semiconductor structure, the values of generated photocurrent are amplified comparing with the dark. The highest values were obtained applying violet as background, because the red and green channels are quite amplified with the use of this radiation.

Otherwise, applying background light on the back side of the semiconductor structure, the signal generated isn't amplified. However, applying blue background color provides the signal distinction from the blue and red channels. Where the red channel is present the signal is strongly attenuated, and when the blue channel is present the signal generated is closer to the value of photocurrent generated with the structure in the dark.

The implemented algorithm, allows recovering the transmitted information by each channel reading the photocurrent signal produced by the device when subjected to a violet background radiation on the front side and a blue background radiation on the backside. This decoding algorithm for WDM signals uses a graphical application that was developed in *Matlab* and is based on calculations and signal comparisons to determine the signal sequence transmitted by the three optical channels.

The work made on this thesis is a module of an integrated optical communication at short distance, where this device and others with identical configuration was been studied to implementing WDM technology on the visible spectrum and using POF for transmission.

Keywords: Plastic optical fiber (POF), semiconductors devices, optoelectronic, optical multiplexer/demultiplexer, decoding signals.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Enquadramento	3
1.2 - Objectivo.....	4
1.3 - Apresentação da tese.....	4
1.4 - Referências	6
Capítulo 2 - Dispositivos WDM	7
2.1 - A modulação WDM.....	7
2.1.1 - Wavelength Division Multiplexing (WDM)	8
2.1.2 - Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM).....	9
2.1.3 - Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM).....	9
2.2 - O conceito WDM.....	10
2.3 - Caracterização.....	11
2.4 - Transmissão no domínio infravermelho	13
2.5 - Transmissão no domínio do visível	14
2.5.1 - WDM baseado em semicondutores	15
2.5.1.1 - A estrutura do dispositivo.....	15
2.5.1.2 - Influência da tensão na resposta espectral	16
2.5.1.3 - Influência do dispositivo na resposta espectral	18
2.5.1.4 - Demultiplexagem controlada por tensão	20
2.5.1.5 - Influência da polarização óptica na resposta espectral	23
2.6 - Referências	24
Capítulo 3 - Caracterização optoelectrónica	26
3.1 - Descrição do dispositivo.....	26
3.2 - Simulação de resposta espectral	28
3.2.1 - Semicondutor a-SiC:H.....	28
3.2.2 - Semicondutor a-Si:H	29
3.2.3 - Semicondutores a-SiC:H/a-Si:H empilhados	30
3.3 - Medidas de resposta espectral	33
3.3.1 - Influência da luz de fundo pelo lado frontal.....	34
3.3.1.1 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 500Hz	34
3.3.1.2 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 3000Hz	36
3.3.2 - Influência da luz de fundo pelo lado posterior	38
3.3.2.1 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 500Hz	38
3.3.2.2 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 3000Hz	40
3.4 - Referências	42

Capítulo 4 - Análise de sinais WDM	43
4.1 - Análise de canais individuais.....	46
4.1.1 - Influência da luz de fundo pelo lado frontal.....	46
4.1.1.1 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 500bps	46
4.1.1.2 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 2000bps	48
4.1.1.3 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 6000bps	50
4.1.2 - Influência da luz de fundo pelo lado posterior	51
4.1.2.1 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 500bps	51
4.1.2.2 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 2000bps	53
4.1.2.3 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 6000bps	55
4.2 - Análise de canais combinados	56
4.2.1 - Influência da luz de fundo pelo lado frontal.....	57
4.2.2 - Influência da luz de fundo pelo lado posterior	58
4.3 - Análise de sinais com fibra POF	59
Capítulo 5 - Descodificação com Matlab.....	64
5.1 - Desenvolvimento do algoritmo.....	64
5.1.1 - Normalização dos dados	64
5.1.2 - Cálculo da duração do bit	65
5.1.3 - Início do bit.....	66
5.1.4 - Medição de distâncias.....	67
5.1.5 - Exemplo do algoritmo	68
5.2 - Desenvolvimento da aplicação	74
Capítulo 6 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	78
Capítulo 7 - Anexos	81

Lista de Figuras

Capítulo 2 - Dispositivos WDM

Figura 1 – Multiplexagem WDM	8
Figura 2 – Espectro de comprimentos de onda WDM	8
Figura 3 – Espectro de comprimentos de onda DWDM e CWDM	9
Figura 4 – Funcionamento do WDM	10
Figura 5 – Equipamento WDM	11
Figura 6 – Rede FTTH utilizando transmissão WDM	12
Figura 7 – Ligações de um equipamento ONT	12
Figura 8 – Espectro electromagnético	14
Figura 9 – Atenuação de uma fibra POF	15
Figura 10 – Estrutura P-I-N-P-I-N do dispositivo semiconductor.....	16
Figura 11 – Resposta espectral para diferentes valores de tensão de polarização	17
Figura 12 – Resposta espectral para diferentes frequências do sinal incidente	17
Figura 13 – Resposta espectral das células do composto NC12	18
Figura 14 – Resposta espectral do composto NC12	19
Figura 15 – Fotocorrente gerada pelo composto NC12	20
Figura 16 – Sinais multiplexados sob polarização directa e inversa	21
Figura 17 – Sinais multiplexados sob diferentes frequências do sinal incidente	22
Figura 18 – Variação da fotocorrente com a potência óptica	22
Figura 19 – Resposta espectral com polarização óptica de fundo:	23
Figura 20 – Fotocorrente resultante da aplicação das radiações de fundo	24

Capítulo 3 - Caracterização optoelectrónica

Figura 21 – Diagrama esquemático simplificado da estrutura do dispositivo semiconductor	26
Figura 22 – Absorção dos comprimentos de onda na estrutura semicondutora	27
Figura 23 – Configuração da estrutura do semiconductor a-SiC:H.....	28
Figura 24 – Resposta espectral do semiconductor a-SiC:H.....	29
Figura 25 – Configuração da estrutura do semiconductor a-Si:H.	29
Figura 26 – Resposta espectral do semiconductor a-Si:H.	30
Figura 27 – Configuração da estrutura dos semicondutores a-SiC:H/a-Si:H empilhados.....	31
Figura 28 – Resposta espectral dos fotodíodos PIN a-SiC:H/a-Si:H empilhados.	31
Figura 29 – Resposta espectral dos semicondutores a-SiC:H/a-Si:H isolados e empilhados.....	32
Figura 30 – Diagrama da montagem para o estudo da resposta espectral.	33
Figura 31 – Resposta espectral a uma frequência de 500Hz com luz de fundo frontal:.....	35
Figura 32 – Resposta espectral a uma frequência de 3000Hz com luz de fundo frontal:.....	37
Figura 33 – Resposta espectral a uma frequência de 500Hz com luz de fundo posterior:	39
Figura 34 – Resposta espectral a uma frequência de 3000Hz com luz de fundo posterior:	41

Capítulo 4 - Análise de sinais WDM

Figura 35 – Diagrama da montagem para o estudo dos sinais WDM.....	43
Figura 36 – Distribuição dos LEDs de sinal RGB e do led de fundo frontal.....	44

Figura 37 – Configuração das sequências binárias individuais da placa controladora.....	45
Figura 38 – Fotocorrente do sinal incidente a 500bps com luz de fundo frontal e corrente de polarização:.....	47
Figura 39 – Fotocorrente do sinal incidente a 2000bps com luz de fundo frontal e corrente de polarização:.....	49
Figura 40 – Fotocorrente do sinal incidente a 6000bps com luz de fundo frontal e corrente de polarização:.....	50
Figura 41 – Fotocorrente do sinal incidente a 500bps com luz de fundo posterior e corrente de polarização:.....	52
Figura 42 – Fotocorrente do sinal incidente a 2000bps com luz de fundo posterior e corrente de polarização:.....	54
Figura 43 – Fotocorrente do sinal incidente a 6000bps com luz de fundo posterior e corrente de polarização:.....	55
Figura 44 – Fotocorrente dos canais RGB incidentes com luz de fundo frontal e corrente de polarização:.....	57
Figura 45 – Fotocorrente dos canais RGB incidentes com luz de fundo posterior e corrente de polarização:.....	59
Figura 46 – Conector F-05 acoplado a uma fibra POF.....	60
Figura 47 – LED RGB de alto brilho.....	60
Figura 48 – LED RGB acoplado à fibra POF.....	61
Figura 49 – Conector POF a incidir sobre a estrutura semicondutora.....	61
Figura 50 – Fotocorrente medida com a fibra POF:.....	62

Capítulo 5 - Descodificação com Matlab

Figura 51 – Resultado gráfico da medição experimental obtido com o <i>software OpenChoice</i>	65
Figura 52 – Representação gráfica do início do bit de uma amostragem.....	66
Figura 53 – Representação do sinal quando sujeito a uma radiação de fundo.....	68
Figura 54 – Representação dos patamares de sinal com identificação do canal R.....	69
Figura 55 – Representação do sinal com identificação do canal B.....	69
Figura 56 – Representação do sinal com identificação do canal G.....	70
Figura 57 – Representação do sinal com identificação dos três canais RGB.....	70
Figura 58 – Representação do sinal quando sujeito a uma radiação de fundo.....	71
Figura 59 – Representação dos patamares de sinal com identificação do canal R.....	72
Figura 60 – Representação do sinal com identificação do canal B.....	72
Figura 61 – Representação do sinal com identificação do canal G.....	73
Figura 62 – Representação do sinal com identificação dos três canais RGB.....	74
Figura 63 – Diagrama de blocos do programa decodificador WDM de 3 canais.....	75
Figura 64 – Janela principal da aplicação gráfica do decodificador WDM de 3 canais.....	75
Figura 65 – Barra de menus da aplicação gráfica do decodificador WDM de 3 canais.....	76
Figura 66 – Escolha do ficheiro de medidas do decodificador WDM de 3 canais.....	76
Figura 67 – Diagrama de funções do programa decodificador WDM de 3 canais.....	77

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características dos semicondutores da estrutura.....	28
Tabela 2 – Potência óptica dos LEDs de fundo em função da intensidade de corrente.....	34
Tabela 3 – Potência óptica dos LEDs de sinais em função da intensidade de corrente.....	45
Tabela 4 – Combinações RGB da sequência de transmissão padrão.....	45
Tabela 5 – Características da fibra POF utilizada.....	60
Tabela 6 – Características do LED RGB utilizado.	61

Lista de Acrónimos e Termos

Acrónimo/Termo	Descrição
a-Si:H	Hydrogenated Amorphous Silicon
a-SiC:H	Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BPS	Bits per Second
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DSL	Digital Subscriber Line
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FTTH	Fiber to the home
InGaAsP	Indium Gallium Arsenide Phosphorus
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ITO	Indium Tin Oxide
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light-Emitting Diode
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
PIN	Positive-Intrinsic-Negative
POF	Plastic Optical Fiber
RGB	Red-Green-Blue
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
VOIP	Voice over Internet Protocol
WDM	Wavelength Division Multiplexing

Capítulo 1 - Introdução

A fibra óptica ocupa um lugar de destaque devido à sua superior capacidade de transmissão quando comparada com as tecnologias baseadas em cobre. Apesar de inúmeros relatórios que apontam para uma maior igualdade de custos de desenvolvimento da fibra óptica em relação ao cobre, a primeira torna-se a escolha óbvia pela largura de banda disponibilizada e pelo potencial elevado de realizar *upgrades*, não esquecendo também custos de manutenção mais reduzidos e a capacidade de cobrir distâncias maiores face ao cobre.

Outra das vantagens que podemos citar é o facto dos cabos de fibra óptica não serem tão susceptíveis a interferências. A perda de potência do sinal por quilómetro é muito menor do que os sistemas com cabos coaxiais, guias de onda ou transmissão pelo espaço livre, o que se traduz numa necessidade menor da quantidade de repetidores para uma cobertura maior.

As fibras ópticas são compostas fundamentalmente por três elementos; núcleo (*core*), casca (*cladding*) e revestimento (*jacket*). O núcleo normalmente é constituído por sílica e possui um índice de refração ligeiramente maior que o da casca, a qual pode ser composta por sílica ou plástico. Com essa configuração, a luz, uma vez acoplada ao núcleo, fica confinada neste, sendo que o revestimento serve para proteger a fibra e para conferir uma maior resistência mecânica.

A nível da transmissão por fibra óptica, existem dois grandes tipos de fibras utilizadas; as fibras ópticas de sílica e as fibras ópticas de plástico (POF - *Plastic Optical Fibers*).

A maioria das fibras utilizadas hoje em dia é feita com vidro de sílica dopada de uma pureza extremamente elevada, que requer processos especiais de fabricação. Os cabos de fibra óptica de sílica contêm vários fios de fibras de sílica extremamente fina que são agrupadas num acabamento flexível. Este tipo de fibras possui uma resistência maior às altas temperaturas e o diâmetro do seu núcleo anda na ordem dos 8 a 12 μm para fibras monomodo e aproximadamente 50 a 200 μm para as fibras multimodo. Por outro lado, a utilização deste tipo de fibra para a transmissão de sinais a curta distância não é preferível devido ao pequeno diâmetro do núcleo e dos respectivos custos de acoplamento dos conectores [1, 2].

Por esta razão, as POF são uma solução adequada para substituir as fibras ópticas de sílica e os cabos de cobre como meio de transmissão para comunicações a curtas distâncias. O diâmetro do núcleo de uma POF varia entre os 120 a 1000 μm , sendo bastante maior do que uma fibra de sílica e

como tal, oferece a possibilidade de usar conectores mais baratos. A sua flexibilidade permite obter raios de curvatura mais curtos que são um factor crítico nas fibras de sílica.

As POF são bastante mais resistentes a danos devido às características intrínsecas do seu material. Os custos de instalação e manutenção são mais reduzidos dado que este tipo de fibra é bastante fácil de manusear, polir e ligar as terminações (conectores).

Os usos mais comuns das POF são em redes de comunicação óptica de curto alcance, aplicações indoor (como na indústria automóvel, indústria aeroespacial, medicina) e redes de acesso local (LAN - *Local Area Network*). Dada a evolução das tecnologias, existe uma maior procura por ligações de alto débito, nomeadamente para a transmissão de conteúdos de alta definição, que as tecnologias DSL (*Digital Subscriber Line*) não conseguem atender.

O futuro das telecomunicações são as redes FTTH (*Fiber to the home*) e as POF serão um complemento nas ligações, substituindo as ligações de cobre que existem, permitindo uma variada rede de comunicações interna. Todas as aplicações que assentam sobre as POF necessitam de uma alta velocidade e uma grande capacidade de transmissão de dados. Como forma de aumentar essa mesma largura de banda que é transmitida sobre uma POF a única possibilidade será aumentar a taxa de transmissão de dados recorrendo a técnicas de multiplexagem de sinais [2, 3].

A capacidade do sistema óptico pode ser aumentada, ainda mais, utilizando-se a técnica da multiplexagem por comprimento de onda. Multiplexar significa combinar sinais vindos de múltiplas fontes e transmiti-los através de um único meio. Existem porém condicionantes numa transmissão por fibra óptica, nomeadamente a dispersão e a distorção do sinal transmitido. A conjugação destes dois efeitos é um factor limitativo para o ritmo de transmissão.

Em comunicações de fibra óptica, WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é uma tecnologia de multiplexagem que funciona utilizando vários comprimentos de onda numa fibra. Considerando que os sistemas WDM se encontram divididos em diferentes padrões correspondentes a diferentes janelas de comprimentos de onda, cada serviço ocupa um comprimento de onda, ao longo do espectro utilizável [4, 5].

Uma grande vantagem da tecnologia WDM está no facto de não ser necessário tratar o sinal electricamente para o amplificar e multiplexar, ou seja, o sinal é amplificado e multiplexado apenas opticamente, o que permite atingir grandes distâncias de transmissão.

Uma infra-estrutura WDM é projectada para permitir uma evolução de rede significativa para fornecedores de serviços que procuram atender à procura de ligações de alto débito por parte dos seus clientes. O potencial de fornecer capacidade aparentemente ilimitada de transmissão é obviamente uma das maiores vantagens desta tecnologia, o que a torna especialmente indicada em redes de telecomunicações que requerem grande desempenho de acesso e capacidade de entrega de sinal.

Nesta perspectiva, o sistema de redes com tecnologia WDM fornece uma alta velocidade de transmissão de dados (actualmente na ordem dos 40-100Gbps), uma grande facilidade em mudanças na rede de serviços e permite criar redundância de rede, possibilitando topologias em anel para garantir ao máximo o fornecimento do serviço [4, 6, 7].

1.1 - Enquadramento

Os sistemas de comunicação óptica utilizam as fibras ópticas como canal de transmissão, díodos laser como emissor e operam na região infravermelha do espectro electromagnético, dado que nesta janela de transmissão as fibras ópticas de sílica exibem menor atenuação e dispersão. De forma a obter uma maior capacidade de transmissão sobre a fibra óptica, é utilizada a multiplexagem por divisão do comprimento de onda dos sinais transmitidos. Este tipo de multiplexagem, permite a transmissão simultânea de vários sinais, cada um com o seu respectivo comprimento de onda. Um sistema de comunicação WDM utiliza um *multiplexer* como transmissor de forma a juntar os vários sinais ópticos, e para a recuperação desses mesmos sinais ópticos transmitidos, utiliza um *demultiplexer* no receptor.

No domínio do espectro visível, são utilizadas as fibras ópticas de plástico, que em termos de atenuação oferecem um melhor desempenho nesta região do espectro. Este tipo de fibras oferece uma maior eficiência, maior flexibilidade e um custo menor quando comparadas com as fibras ópticas de sílica. Com estas características, as POF pretendem implementar a sua utilização para as comunicações a curtas distâncias.

O sistema previsto centra-se na multiplexagem/demultiplexagem por divisão no comprimento de onda, no espectro visível através de fibras ópticas de plástico [1, 4, 6, 7].

1.2 - Objectivo

O objectivo desta tese compreende a utilização de fotodíodos PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*), baseados em silício amorfo hidrogenado (a-Si:H - *Hydrogenated Amorphous Silicon*) e siliceto de carbono amorfo hidrogenado (a-SiC:H - *Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide*), cuja sensibilidade espectral na região do visível é modulada pelo sinal de tensão eléctrica aplicado e pela presença de polarização óptica adicional (radiação de fundo). O facto deste dispositivo optoelectrónico funcionar como filtro de cor controlado por tensão e luz, permite controlar a selectividade espectral no canal de transmissão, o que regula a regeneração do sinal óptico transmitido.

No sentido de minimizar os custos dos sistemas de comunicação óptica utilizam-se as POF que operam na região visível do espectro, contrariamente ao que sucede com as fibras ópticas convencionais que transmitem o sinal óptico no domínio do infravermelho.

Para aumentar a capacidade de transmissão do canal o método vulgarmente usado é a técnica de WDM que consiste em codificar dois ou mais sinais ópticos num único canal. Dado que o uso da técnica WDM é predominantemente utilizada no domínio do infravermelho, torna-se necessário que os dispositivos de multiplexagem/demultiplexagem sejam redesenhados para operarem no domínio do visível.

O tema desta tese é resultado conjunto de conclusões de teses anteriores, em que foi feita uma análise sucinta e minuciosa deste tipo de fotodíodo, de forma a explorar a sua utilização na implementação da tecnologia WDM sobre POF.

1.3 - Apresentação da tese

Este trabalho encontra-se organizado em seis capítulos, onde o capítulo 1 faz uma breve introdução e enquadramento no tema desta tese, abordando a transmissão de sinais WDM utilizando dispositivos semicondutores pelo meio de transmissão POF.

No capítulo 2 são abordados os dispositivos WDM baseados em semicondutores, começando por ser feita uma introdução sobre o conceito de multiplexagem WDM. É feito também um resumo da evolução do estudo até agora realizado no domínio da multiplexagem WDM utilizando este tipo de dispositivo e as várias técnicas até agora utilizadas. São descritos os resultados anteriores obtidos na caracterização optoelectrónica sob diferentes condições de iluminação, variando o

Capítulo 1 - Introdução

comprimento de onda, a tensão de polarização e a iluminação de fundo que influenciam a resposta espectral do dispositivo semiconductor.

No capítulo 3 é feita a descrição do dispositivo semiconductor, sendo também analisada a sensibilidade espectral deste quando sujeito a um sinal óptico. Essa análise foi efectuada de duas formas: simulação de uma estrutura semicondutora semelhante ao dispositivo através de uma aplicação gráfica de nome AFORS-HET 2.4.1 e realização experimental de medidas no laboratório com vários cenários de simulação; variando as cores dos fundos incidentes, variando o lado incidente do fundo sobre a estrutura semicondutora, variando a intensidade desses mesmos fundos incidentes e também variando a frequência do sinal de dados incidente.

Após a análise da resposta espectral da estrutura semicondutora, é feita a análise dos sinais WDM do dispositivo semiconductor no capítulo 4. Esta análise foi efectuada com um conjunto de três dispositivos LED (*Light-Emitting Diode*) com as cores vermelho, verde e azul (RGB - *Red-Green-Blue*) a emitir os respectivos sinais de dados sobre a estrutura semicondutora tanto numa configuração de canal individual como numa configuração de canais combinados. Na configuração de canal individual foi analisado o comportamento do dispositivo semiconductor quando este estava submetido a um sinal de dados unicamente de cor vermelha, cor verde ou cor azul, sendo que foram testados vários cenários de simulação; variando as cores dos fundos incidentes, variando o lado incidente do fundo sobre a estrutura semicondutora, variando a intensidade desses mesmos fundos incidentes e também variando a frequência do sinal de dados incidente.

De igual forma, foram testados esses mesmos cenários para uma configuração de canais combinados, onde poderiam existir dois ou três canais de dados a transmitir em simultâneo. A finalizar este capítulo, foi efectuada uma análise de sinais com a utilização de fibras POF a incidir directamente sobre a estrutura semicondutora, tendo sido utilizado um LED RGB de alto brilho acoplado a um conector de uma fibra POF.

No capítulo 5 é feita a análise da descodificação dos sinais WDM utilizando uma aplicação gráfica desenvolvida em *Matlab*. De forma a poder recuperar o sinal de dados incidente sobre a estrutura semicondutora, a aplicação desenvolvida necessita de um ficheiro específico de medidas *Excel* onde faz os cálculos para a calibragem dos níveis de sinal. Com base nos cálculos de calibragem dos níveis de sinal é feita uma comparação com outro ficheiro de medidas *Excel*, que corresponde ao sinal de fotocorrente gerada pela estrutura semicondutora, quando esta recebe um sinal de dados incidente com uma determinada sequência dos três canais. O único requisito para a composição das sequências dos canais de dados é que exista uma combinação onde os canais combinados

estejam todos em simultâneo no escuro (nível lógico “0”). De forma a ser possível perceber o princípio de funcionamento da aplicação é ainda apresentado neste capítulo, o diagrama de blocos constituinte da aplicação, assim como um diagrama com as funções principais de cada um desses blocos.

Por fim, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido e as perspectivas de trabalho futuro.

1.4 - Referências

- [1] T. G. Brown, K. Creath, H. Kogelnik, M. Kriss, J. Schmit, and M. J. Weber, *The Optics Encyclopedia: Basic Foundations and Practical Applications* vol. 4. Weinheim: WILEY-VCH, 2004.
- [2] A. Appajajah, H.-J. Kretschmar, and W. Daum, "Aging Behavior of Polymer Optical Fibers: Degradation Characterization by FTIR". *Wiley InterScience*, 2006.
- [3] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, and J. Costa, "Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications". *Advances in Photodiodes*, 2010.
- [4] M. Haupt and U. Fischer-Hirchert, "WDM Key Element in the visible spectrum for Standard SI-POF". *Fachhochschule Schmalkalden*, 2010.
- [5] N. Massa, "Fiber Optic Telecommunication," University of Connecticut, Massachusetts, 2000.
- [6] U. H. P. Fischer and M. Haupt, "POF-WDM-Systems," in *Harz University of Applied Sciences*, Wernigerode, 2007.
- [7] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, and W. Daum, *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*. Berlin: Springer, 2008.

Capítulo 2 - Dispositivos WDM

Neste capítulo é feita a caracterização da tecnologia WDM que consiste na multiplexagem por divisão do comprimento de onda. Pretende-se ainda mostrar o seu princípio de funcionamento, as suas características intrínsecas, bem como a evolução desta técnica de multiplexagem ao longo do tempo.

2.1 - A modulação WDM

A televisão é o entretenimento favorito a nível mundial e um grande suporte de informação. A tecnologia IPTV (*Internet Protocol Television*) é um sistema de transmissão do sinal de televisão digital sobre redes de telecomunicações usando o protocolo IP (*Internet Protocol*) e que oferece novas possibilidades e vantagens aos utilizadores. A tecnologia IPTV permite a transmissão de formatos em alta definição para televisão e outros conteúdos que permitem ao utilizador uma experiência audiovisual, assim como, as funcionalidades de gravação de conteúdos, integração com redes sociais, etc. A transmissão destes serviços IPTV é agregada aos serviços de dados e voz (VOIP - *Voice over Internet Protocol*) pela rede dos operadores de telecomunicações.

Com o volume de tráfego a aumentar com a introdução de novos serviços de vídeo em alta definição, videoconferências, VOIP, e com a necessidade de fornecer maiores taxas de transferência de dados devido às necessidades dos utilizadores, os operadores de telecomunicações são forçados a ter uma maior capacidade de fornecimento deste tipo de serviços aos seus utilizadores e têm apostado cada vez mais nas tecnologias ópticas de transmissão dos seus serviços, o que tem levado a uma evolução constante deste tipo de tecnologia.

Devido aos custos iniciais de implementação da rede de fibra óptica, os operadores pretendem rentabilizar ao máximo esse investimento e conter os custos na rede com a implementação de novos serviços na sua plataforma. Por esse motivo, a solução de instalar novas fibras ópticas para obter uma maior capacidade de transmissão de dados na rede não é a solução ideal.

A solução de rentabilizar ao máximo a capacidade de transmissão da fibra óptica já instalada é a solução ideal, podendo ser implementada com o aumento da taxa de transmissão nas ligações existentes ou implementando uma forma de transmissão de variados comprimentos de onda sobre a mesma fibra óptica. A esta técnica dá-se o nome de multiplexagem e pode ser realizada de diferen-

tes formas, através das técnicas WDM, DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) ou CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) [1-4].

2.1.1 - Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Na técnica de modulação WDM, as informações são multiplexadas e enviadas sobre comprimentos de onda, sendo que dentro da multiplexagem WDM temos as variantes CWDM e DWDM (Figura 1).

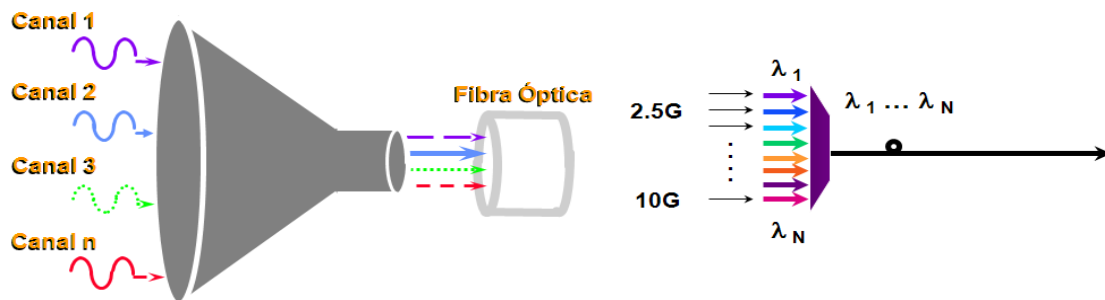


Figura 1 – Multiplexagem WDM [4].

Um sistema WDM utiliza um multiplexer no transmissor para juntar os sinais, e um demultiplexer no receptor para separá-los. A informação é multiplexada sobre comprimentos de onda específicos, chamados de canais ópticos. O espectro utilizável para a transmissão por fibra óptica divide-se em janelas. Devido aos materiais utilizados na construção das fibras, os comprimentos de onda para WDM ficam limitados à utilização entre os 1260nm e 1625nm. Dentro deste intervalo existem certos comprimentos de onda que têm mais perdas e, por isso, não são utilizados. Em sistemas WDM é preferencialmente usada a banda C, porque é aquela que possui a atenuação mínima de sinal (Figura 2) [3-6].

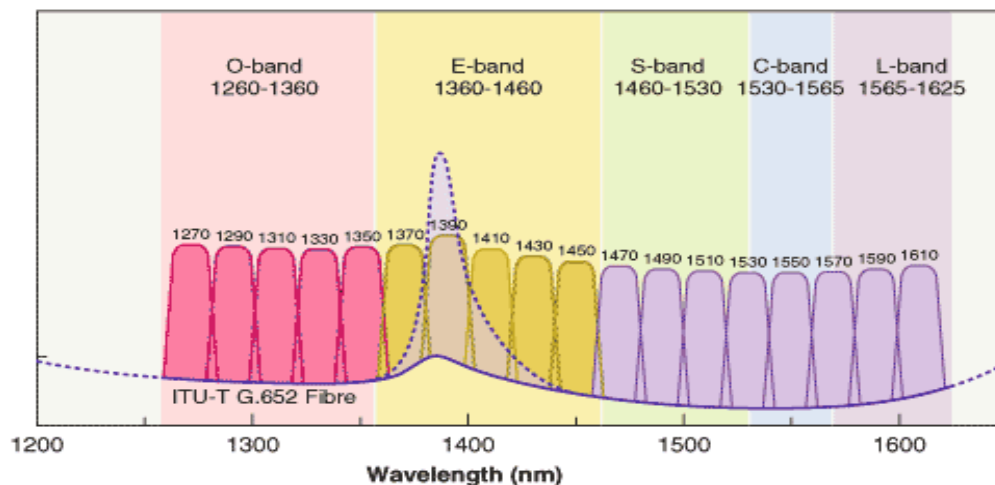


Figura 2 – Espectro de comprimentos de onda WDM [6].

2.1.2 - Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

Sistemas DWDM são um desenvolvimento dos sistemas WDM clássicos. A diferença entre WDM e DWDM é fundamentalmente a de que o DWDM tem um espaçamento dos comprimentos de onda mais curto do que aquele que é utilizado pelo WDM, e portanto tem uma maior capacidade total. Estes sistemas aumentam a complexidade das redes e introduzem novos desafios para testes e equipamentos de medida. Além da multiplicação da taxa de transmissão de dados numa única fibra, os sistemas DWDM têm a vantagem de possibilitar uma adaptação do número de canais de acordo com as necessidades da rede.

2.1.3 - Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)

O CWDM em contraste com o convencional WDM e DWDM usa maior espaçamento de canais para permitir uma maior ocupação espectral, logo suporta poucos canais de transmissão, o que é apontado como uma solução mais económica para algumas redes mais reduzidas, visto que o custo de um equipamento CWDM poderá ser cerca de 40% inferior ao de um DWDM. O custo é inferior, sobretudo ao facto de um equipamento CWDM não necessitar de grande controlo de temperatura dos lasers, dado ter um grande espaçamento espectral.

Na Figura 3 são apresentadas as diferenças de espaçamento espectral dos comprimentos de onda da tecnologia DWDM e CWDM, sendo visível a diferença da ocupação dos canais de transmissão [6, 7].

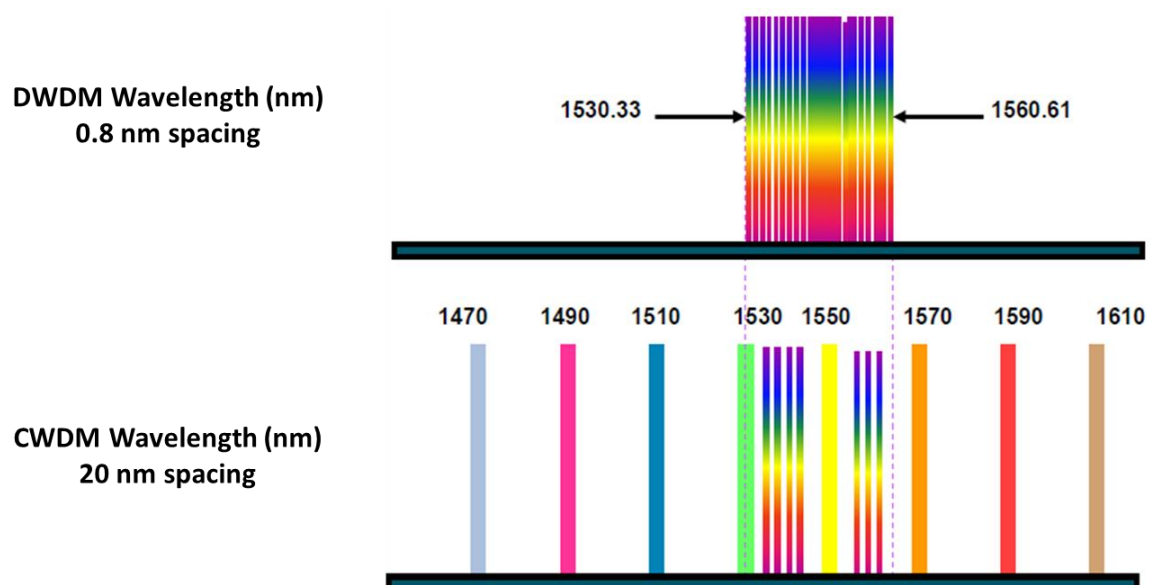


Figura 3 – Espectro de comprimentos de onda DWDM e CWDM [7].

2.2 - O conceito WDM

Como referido anteriormente, a tecnologia WDM nada mais é do que uma multiplexagem na transmissão de mais de um fluxo de informação num único canal ao mesmo tempo. Em comunicações de fibra óptica, WDM é uma tecnologia de multiplexagem que funciona utilizando vários comprimentos de onda numa fibra. Assim, cada serviço ocupa um comprimento de onda, ao longo do espectro utilizável, sendo que um sistema WDM utiliza um multiplexer no transmissor para juntar os sinais, e um demultiplexer no receptor para separá-los. Este conceito foi publicado pela primeira vez em 1970, e em 1978 os sistemas WDM já eram testados em laboratório pelas empresas *Bell Laboratories* e *NEC Corporation* [8-10].

Inicialmente os sistemas WDM eram caros e com uma complexidade elevada para serem implementados, no entanto, a padronização recente e melhor compreensão da tecnologia, tornaram o WDM menos dispendioso para ser implementado e tornaram os sistemas WDM populares entre as empresas de telecomunicações porque lhes permitem expandir a capacidade da rede sem colocar mais fibra. Com a utilização da tecnologia WDM e amplificadores ópticos, podem ser acomodadas várias gerações de desenvolvimento de tecnologia na sua infra-estrutura óptica sem a necessidade de reformulação da rede *backbone*. A capacidade de uma determinada ligação pode ser expandida por uma simples actualização dos *multiplexers* e *demultiplexers* em cada extremidade. A tecnologia WDM aumenta a capacidade de transporte do meio físico, fibra óptica, pois multiplexando vários comprimentos de onda permite utilizar de forma mais eficiente a fibra óptica já instalada (Figura 4).

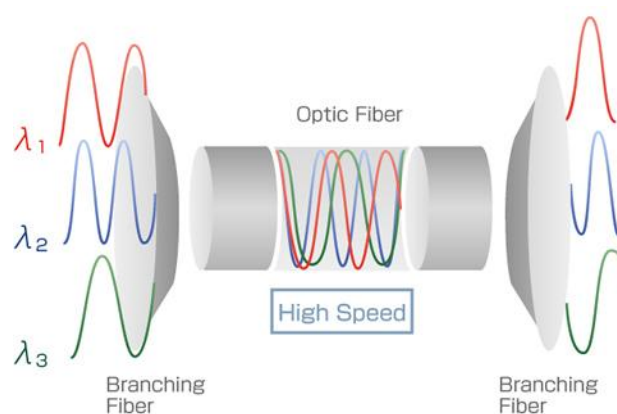


Figura 4 – Funcionamento do WDM [11].

WDM, DWDM e CWDM são baseadas no mesmo conceito de usar vários comprimentos de onda da luz sobre uma única fibra, mas diferem no espaçamento de comprimentos de onda, número de canais, bem como a capacidade de amplificar os sinais multiplexados no domínio óptico [3, 5, 7, 11].

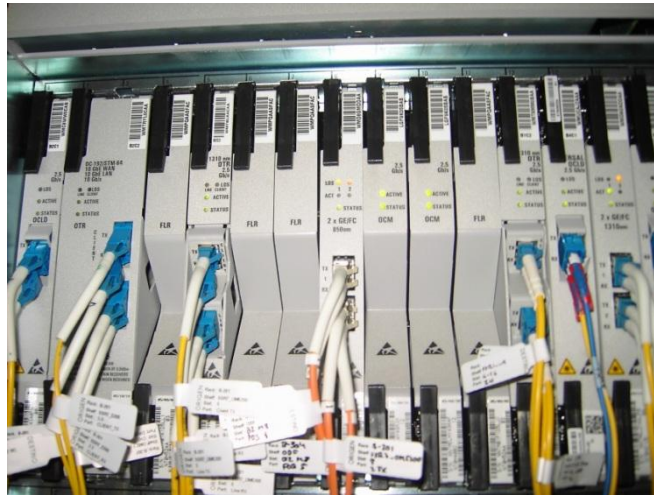


Figura 5 – Equipamento WDM [4].

A Figura 5 mostra um equipamento WDM em funcionamento com as respectivas fibras ligadas e devidamente etiquetadas às cartas de multiplexagem e demultiplexagem de sinal.

2.3 - Caracterização

As tecnologias para fibras ópticas estão cada vez mais desenvolvidas e cada vez mais as redes têm *backbones* ópticos devido à capacidade do WDM poder transportar diversas tecnologias e possibilitar o maior transporte de tráfego sobre a fibra. Desta forma, o WDM torna-se uma peça importante na integração das redes, em que a característica de escalabilidade do WDM é de grande importância devido à rápida evolução da internet. Porém a sua principal desvantagem é o alto custo dos equipamentos.

Uma grande vantagem está no facto de não ser necessário tratar o sinal electricamente para o amplificar e multiplexar, ou seja, o sinal é amplificado e multiplexado apenas opticamente, o que permite que seja possível atingir grandes distâncias de transmissão. Uma infra-estrutura WDM é projectada para permitir uma evolução de rede significativa para os fornecedores de serviços que procuram atender à procura sempre crescente de ligações de alto débito por parte dos seus clientes. O potencial de fornecer capacidade aparentemente ilimitada de transmissão é obviamente uma das maiores vantagens desta tecnologia, o que a torna especialmente indicada em redes de telecomunicações que requerem grande desempenho de acesso e capacidade de entrega de sinal [12].

Na transmissão dos serviços FTTH é utilizada a tecnologia WDM, numa arquitectura Ponto-Multiponto de uma forma muito característica para entregar o sinal dos serviços de dados e voz através de um OLT (*Optical Line Termination*), e os serviços de TV analógica (*RF Overlay*) em comprimentos de onda diferentes. No caso dos serviços provenientes do OLT para o cliente, estes

são transmitidos num determinado comprimento de onda (1490nm) e os serviços provenientes do RF Overlay são transmitidos no comprimento de onda dos 1550nm tudo numa mesma fibra óptica (Figura 6) [13].

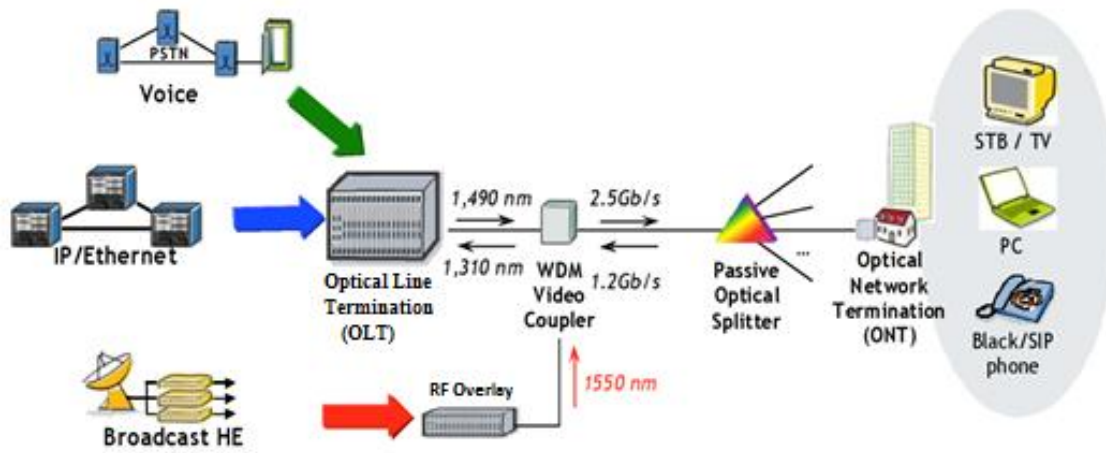


Figura 6 – Rede FTTH utilizando transmissão WDM [13].

Do lado do cliente o seu equipamento terminal ONT (*Optical Network Termination*) faz a demultiplexagem (tipicamente utilizando um dispositivo chamado *triplexer*) desses serviços e envia os dados do cliente para o OLT (sentido de *upstream*) num outro comprimento de onda (1310nm) (Figura 7) [13, 14].

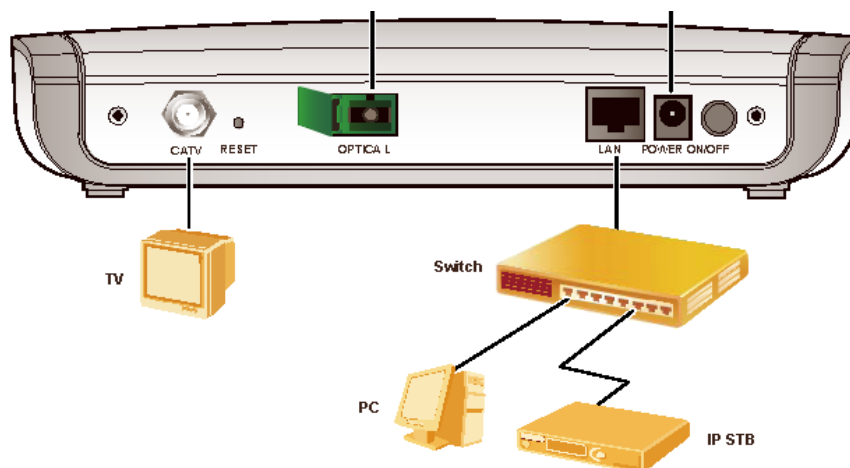


Figura 7 – Ligações de um equipamento ONT [14].

Cada vez mais nos tempos que correm os fornecedores de serviços de IPTV devem procurar atender à procura por largura de banda por parte dos utilizadores, sendo que o seu objectivo será sempre aumentar a receita, tendo em conta o capital e custos operacionais e fornecer múltiplos serviços com um número mínimo de infra-estruturas. Nessa óptica, o sistema de redes com tecnologia WDM fornece uma alta velocidade de transmissão de dados (actualmente na ordem dos 40-

100Gbps), uma grande facilidade em mudanças na rede de serviços e permite criar redundância de rede, possibilitando topologias em anel para garantir ao máximo o fornecimento do serviço.

De ambas as perspectivas técnica e económica, a possibilidade de fornecer uma capacidade de transmissão potencialmente ilimitada é a mais óbvia vantagem da tecnologia WDM. Uma maior capacidade do sistema pode ser obtida, através da actualização dos equipamentos terminais ou aumentando o número de comprimentos de onda transmitidos sobre a mesma fibra, tirando o máximo partido do investimento de fibra óptica já existente [5].

As vantagens técnicas da tecnologia WDM podem ser resumidas como se segue:

- ✓ **Transparência** – Porque sendo o WDM uma arquitectura de camada física, ela pode suportar de forma transparente os variados formatos de dados, tais como ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), Gigabit Ethernet, SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), etc.
- ✓ **Escalabilidade** – O WDM pode aproveitar a abundância de fibra numa dada região para satisfazer rapidamente a demanda por capacidade em ligações ponto a ponto.
- ✓ **Provisão Dinâmica** – Provisionamento de ligações de rede aos clientes com alta largura de banda de forma rápida, simples e dinâmica.

2.4 - Transmissão no domínio infravermelho

Utilizando a fibra óptica de sílica como meio de transmissão do sinal, os sistemas de comunicação óptica operam na banda do espectro electromagnético com comprimentos de onda entre os 850 e os 1625nm, ou seja na região dos infravermelhos.

De forma a permitir a transmissão do sinal WDM na janela do espectro infravermelho, os dispositivos ópticos utilizados, denominam-se de LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Os dispositivos LASER possuem uma emissão coerente com largura espectral estreita (entre 0.1nm e 1nm) e uma capacidade de emissão de alta potência para utilização como sinal em telecomunicações (na ordem dos 10 mW). Dado que possuem um pequeno espalhamento angular, permitem mais facilmente um melhor acoplamento em fibras ópticas monomodo (eficiência de acoplamento máxima entre 30 e 50%), e ainda melhor resposta em altas frequências devido ao menor tempo de recombinação associada à emissão estimulada do laser.

Com estas características, a transmissão do sinal WDM no domínio do infravermelho tem aplicações importantes nas redes de telecomunicações de forma a atingir longas distâncias e fornecer grandes débitos de dados [15-17].

2.5 - Transmissão no domínio do visível

A transmissão no domínio do visível vem permitir explorar uma faixa de comprimentos de onda até então inutilizada devida à sua incompatibilidade para com as características intrínsecas das fibras ópticas de sílica. Desta forma começaram a surgir as fibras ópticas de plástico que possuem uma atenuação muito menor nessa região do espectro e possibilitam que exista comunicação óptica no domínio do visível (Figura 8).

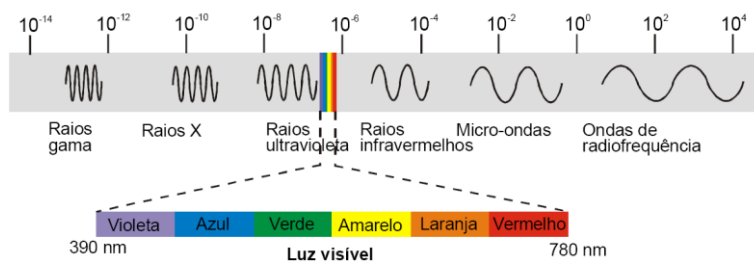


Figura 8 – Espectro electromagnético [17].

Aliada a esta possibilidade de comunicação óptica no domínio do visível existe também a possibilidade de multiplexagem WDM nessa zona do espectro tornando-se particularmente útil em aplicações como sistemas de comunicação dentro de automóveis e na ligação das LAN que requerem ligações em distâncias relativamente pequenas, dado que este tipo de comunicações ópticas no domínio do visível cobre distâncias de ligação bastante inferiores.

Um novo conceito para o uso da técnica WDM, é transmitir este sinal no domínio do espectro visível (região do espectro electromagnético com comprimentos de onda entre os 390nm e os 780nm) utilizando fibras POF como meio de transmissão e torná-la ainda mais interessante para aplicações industriais, pois este tipo de fibras apresenta uma menor atenuação na região visível do espectro electromagnético.

Para a utilização de técnicas WDM para a transmissão na janela do espectro visível, são necessários dispositivos ópticos adequados que possibilitem a multiplexagem/demultiplexagem do sinal, nomeadamente dispositivos LED como emissores de sinal.

Ao usar dispositivos LED, o sistema WDM que funciona no domínio do visível está sujeito às dificuldades associadas a este tipo de dispositivos, nomeadamente a emissão incoerente com lar-

Capítulo 2 - Dispositivos WDM

gura espectral larga (entre 20nm e 60nm), baixa capacidade de modulação (frequência máxima de modulação típica de 100 MHz para LED de InGaAsP (*Indium Gallium Arsenide Phosporus*)) e espalhamento angular elevado gerando dificuldade de acoplamento em fibras ópticas (eficiência de acoplamento máxima de 1%). A atenuação de uma fibra POF ao longo do domínio visível do espectro electromagnético é apresentada na Figura 9.

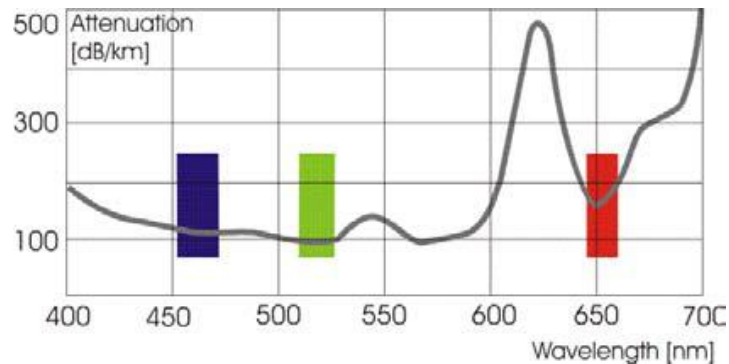


Figura 9 – Atenuação de uma fibra POF [18].

Em comparação com as fibras de sílica, as POF oferecem uma maior facilidade de manuseamento, um custo mais baixo de instalação e fabrico e ainda uma maior estabilidade face às variações de temperatura [18-20].

2.5.1 - WDM baseado em semicondutores

De forma a poder ser explorada a transmissão no domínio do visível, existe um grupo de trabalho no ISEL (GIAMOS) que se encontra focado na investigação da utilização de dispositivos semicondutores para a realização do processo de demultiplexagem na região visível do espectro electromagnético, aproveitando as características dos fotodíodos como filtros ópticos. Ao longo de vários anos de investigação foram analisados diversos tipos de estruturas semicondutoras e estudada a influência da tensão de polarização na resposta espectral do dispositivo, bem como a possibilidade de efectuar a demultiplexagem dos sinais transmitidos recorrendo à variação da tensão de polarização. Mais recentemente foi estudada a resposta espectral do semicondutor obtida com a variação da polarização óptica sobre o qual este se encontra sujeito.

2.5.1.1 - A estrutura do dispositivo

Foram analisadas diversas estruturas semicondutoras baseadas em fotodíodos PIN empilhados constituídos por a-Si:H e a-SiC:H. O dispositivo alvo de estudo dá pelo nome de NC5 e a nível de estrutura este dispositivo é composto por várias camadas: uma camada de vidro (substrato), um contacto eléctrico transparente frontal, um fotodíodo PIN baseado em a-SiC:H, um fotodíodo PIN

baseado em a-Si:H e por fim, um contacto eléctrico posterior transparente. Cada um dos respectivos fotodíodos PIN possui as suas camadas P e N fortemente dopadas e com uma espessura de 20nm, sendo que os contactos eléctricos transparentes são realizados com ITO (*Indium Tin Oxide*) (Figura 10).

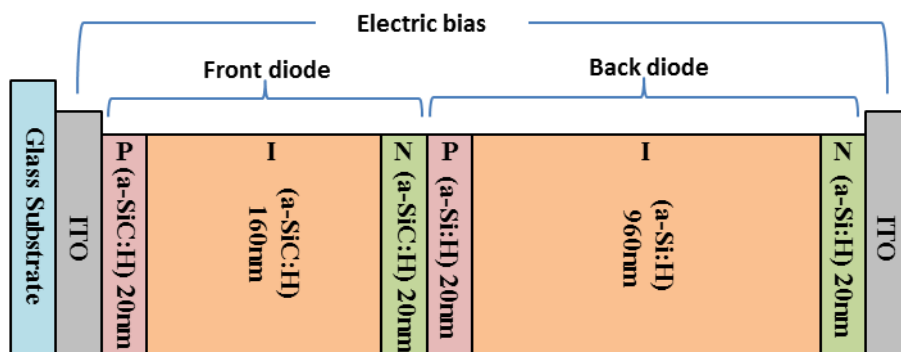


Figura 10 – Estrutura P-I-N-P-I-N do dispositivo semiconductor.

Esta configuração pode ser considerada como tendo duas zonas distintas que correspondem às diferentes características dos dois fotodíodos PIN empilhados, uma vez que o respectivo hiato energético permite ser mais propício à detecção de determinados comprimentos de onda do espectro. Desta forma, o fotodíodo frontal que é baseado em a-SiC:H é adequado para a detecção dos sinais compreendidos entre os 400 e os 590nm, com um valor máximo de fotocorrente em torno dos 470nm sendo que acima dos 590nm não é obtida qualquer resposta espectral. O fotodíodo posterior que é baseado em a-Si:H obtém um valor máximo de fotocorrente em torno dos 600nm e deixa de gerar fotocorrente acima dos 700nm.

A nível funcional é pretendida a detecção de três comprimentos de onda que correspondem aos canais RGB do espectro, referente aos comprimentos de onda vermelho (626nm), verde (525nm) e azul (470nm). Dado que o primeiro fotodíodo apenas detecta os sinais até aos 590nm, permite que os sinais acima desse comprimento de onda passem por este e sejam detectados pelo segundo fotodíodo permitindo assim a detecção completa de todo o espectro [21, 22].

2.5.1.2 - Influência da tensão na resposta espectral

Uma das primeiras etapas na investigação que tem vindo a ser realizada foi a de caracterizar a resposta espectral do dispositivo ao longo do domínio visível do espectro electromagnético (compreendido entre os 390 e 780nm), tendo sido medida a variação da fotocorrente gerada pelo dispositivo com o comprimento de onda do sinal incidente, fazendo variar a tensão de polarização da estrutura (entre os -10V e os +2V) e variando a também a frequência do sinal incidente (entre os 15Hz e

os 2000Hz). Os resultados práticos desta investigação podem ser visualizados na Figura 11 e Figura 12.

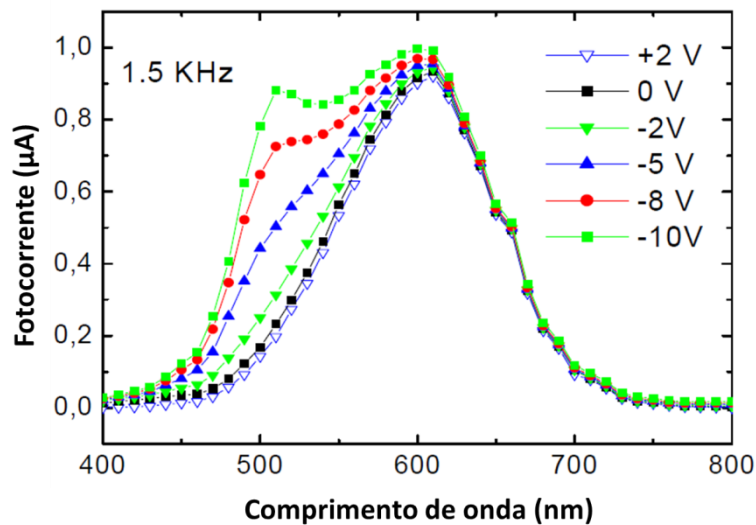


Figura 11 – Resposta espectral para diferentes valores de tensão de polarização [17].

Como resultado desta resposta espectral, pode ser observado que o valor gerado de fotocorrente aumenta com o aumento do comprimento de onda do sinal incidente até ao máximo dos 600nm, decrescendo a partir desse valor. Verifica-se ainda que a estrutura gera maior fotocorrente para valores de polarização negativa, o que levou a que fosse definido como valor ideal de tensão de polarização os -8V. Além deste facto, há a assinalar que para comprimentos de onda elevados (acima dos 600nm) o sinal de fotocorrente obtido é independente da tensão aplicada, enquanto para os comprimentos de onda mais curtos (abaixo dos 600nm), se verifica uma forte dependência com a tensão aplicada.

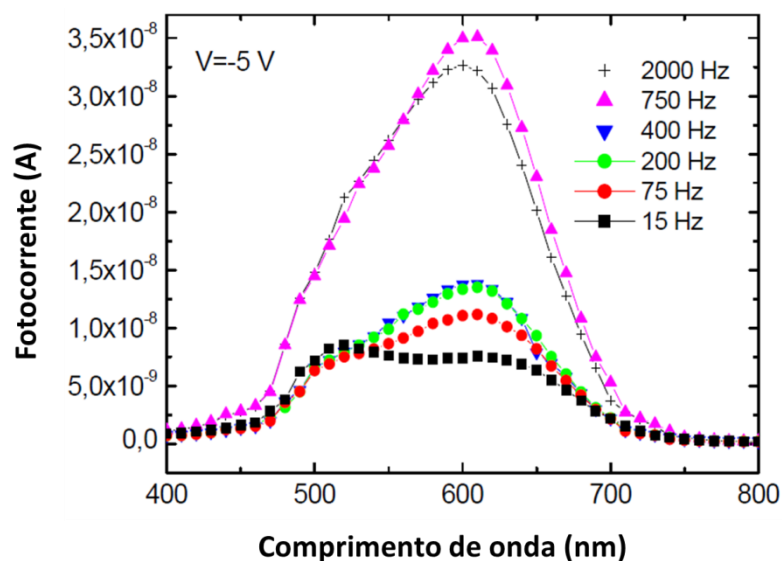


Figura 12 – Resposta espectral para diferentes frequências do sinal incidente [22].

Dos resultados da Figura 12, pode ser observado que o dispositivo semiconductor gera maior valor de fotocorrente com o aumento da frequência do sinal incidente até ao máximo dos 750Hz. Porém até cerca dos 400Hz a fotocorrente é relativamente baixa e constante nos comprimentos de onda mais baixos (dos 400 aos 530nm), e acima dos 750Hz a fotocorrente volta a decrescer. De notar que as variações entre o sinal medido a 750Hz e a 2000Hz, são notórias sobretudo nos comprimentos de onda em torno dos 600nm [17].

2.5.1.3 - Influência do dispositivo na resposta espectral

Ao longo desta investigação de forma a poderem ser analisadas em detalhe as características optoelectrónicas do dispositivo, foi analisada a contribuição individual de cada um dos dois fotodíodos (PIN1 baseado em a-SiC:H e PIN2 baseado em a-Si:H). Desta forma foi utilizado um dispositivo de nome NC12, a nível estrutural idêntico ao NC5, mas que possui um contacto transparente entre os dois fotodíodos, o que permite estudar individualmente a contribuição de cada um destes na resposta espectral.

Como referido anteriormente, o fotodíodo PIN1 baseado em a-SiC:H absorve os comprimentos de onda compreendidos entre os 400 e os 590nm e permite que os restantes comprimentos de onda passem por este e sejam detectados pelo fotodíodo PIN2 que é baseado em a-Si:H, onde se obtém um valor máximo de fotocorrente em torno dos 600nm e deixa de gerar fotocorrente acima dos 700nm.

A análise desta estrutura foi efectuada em cada uma das células (frontal e posterior) constituintes do composto NC12, tendo por base diferentes valores de tensão de polarização aplicada (Figura 13).

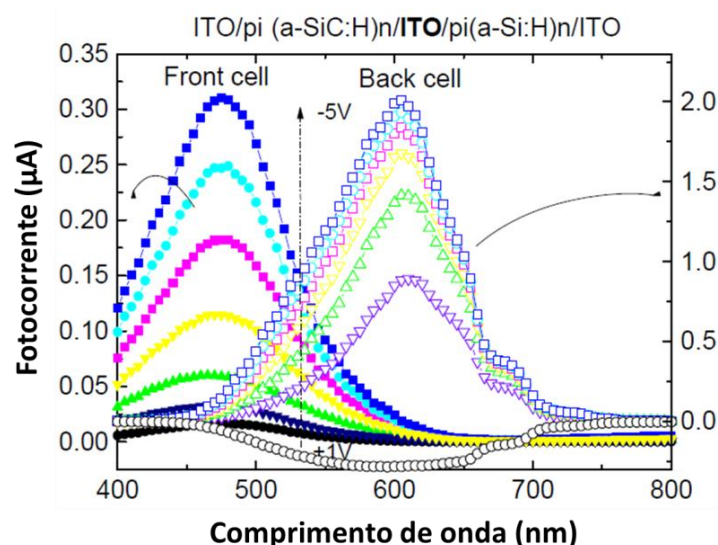


Figura 13 – Resposta espectral das células do composto NC12 [23].

Aplicando diferentes valores de tensão polarização, pode-se observar na Figura 13 que a fotocorrente gerada pelo fotodíodo PIN1 tem o seu valor máximo em torno dos 470nm e o fotodíodo PIN2 tem o seu valor máximo em torno dos 600nm, deixando de gerar fotocorrente acima dos 700nm. Essa característica é devido à composição dos respectivos materiais intrínsecos dado que são esses os comprimentos de onda onde é gerada maior concentração de portadores que é controlada pelo hiato energético desses materiais e pelo respectivo coeficiente de absorção. Para ambos os fotodíodos, é visível que aumentando o valor da tensão de polarização inversa, maior é a fotocorrente gerada.

Desta forma, é possível confirmar a característica de filtro óptico de cada um dos fotodíodos, bem como a influência de cada um deles na configuração empilhada, sendo que o fotodíodo frontal apenas absorve o comprimento de onda da cor azul e parte da cor verde, enquanto o fotodíodo posterior apenas absorve o comprimento de onda da cor vermelha e parte da cor verde [22, 23].

De forma a analisar o conjunto das duas células do composto NC12, foi efectuada a análise da resposta espectral aplicando diferentes valores de tensão de polarização (Figura 14).

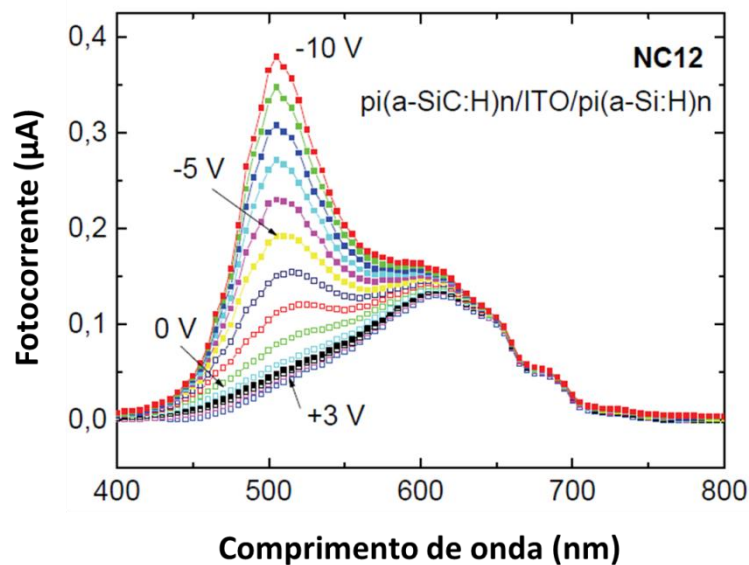


Figura 14 – Resposta espectral do composto NC12 [22].

Pela Figura 14, é possível verificar que nos comprimentos de onda em torno dos 500nm, existe uma forte dependência da fotocorrente gerada com a tensão de polarização aplicada, sendo que sob polarização inversa a fotocorrente gerada é bastante superior. Por outro lado, para os comprimentos de onda acima dos 600nm, a variação da tensão de polarização não introduz grandes variações na fotocorrente gerada pelo composto NC12.

De forma a analisar a resposta do composto NC12 à presença de sinais incidentes, foram usadas as três cores primárias do espectro (vermelho com comprimento de onda de 626nm, verde com comprimento de onda de 525nm e azul com comprimento de onda de 470nm) moduladas de forma individual (luz monocromática) e também de forma combinada (combinações policromáticas) de forma a fazerem as oito combinações possíveis com estas três cores primárias. A luz incidente nesta análise é proveniente de dispositivos LED de alto-brilho e os resultados obtidos são apresentados na Figura 15 [22].

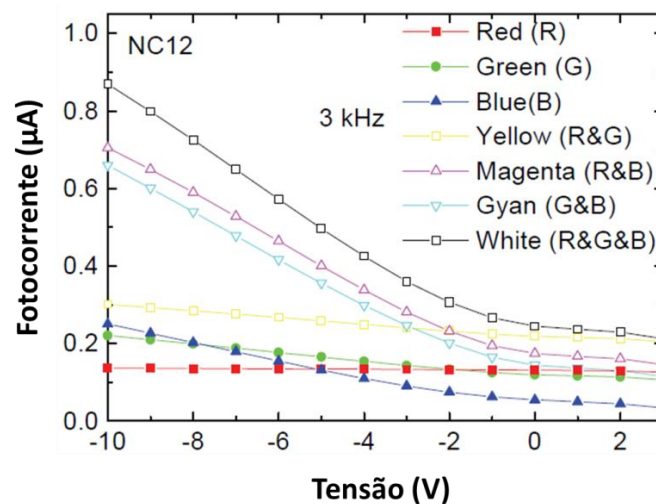


Figura 15 – Fotocorrente gerada pelo composto NC12 [22].

Sob a influência dos diferentes comprimentos de onda de luz incidente é possível verificar o comportamento da estrutura face a cada comprimento de onda e também com as várias combinações possíveis. Como resultado, verifica-se que a resposta face à iluminação com a cor vermelha é independente do valor de tensão aplicada, o que não acontece com as outras duas cores (azul e verde), sendo que também se verifica que nas combinações compostas o valor de fotocorrente é sempre superior aos valores individuais de cada uma, em que com a combinação de todas as cores (RGB) é obtido o valor mais alto.

É ainda notório que a presença da cor verde sob polarização inversa tem um comportamento semelhante ao da cor azul, mas sob polarização directa o seu comportamento é semelhante ao da cor vermelha, o que confirma a absorção dos fótons correspondentes ao comprimento de onda da luz incidente verde em ambos os fotodíodos constituintes da estrutura NC12.

2.5.1.4 - Demultiplexagem controlada por tensão

Dado que até agora já foi investigada a resposta espectral da estrutura semicondutora para a detecção dos comprimentos de onda recebidos, é necessário estudar a melhor forma de efectuar o

Capítulo 2 - Dispositivos WDM

processo de demultiplexagem para recuperação de cada um dos vários sinais emitidos. Desta forma, um outro passo que foi dado na investigação foi a de efectuar o processo de demultiplexagem controlando a tensão de polarização aplicada de forma a aproveitar o comportamento de filtro óptico no domínio do visível (Figura 16).

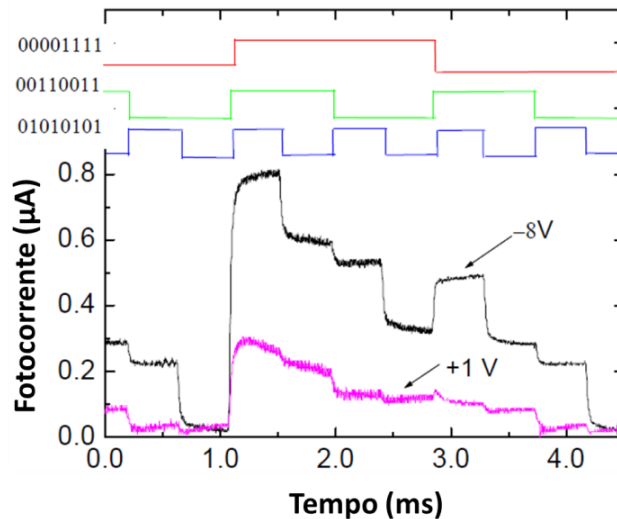


Figura 16 – Sinais multiplexados sob polarização directa e inversa [22].

Na Figura 16 é representado o sinal transmitido por cada um dos três canais RGB utilizando uma determinada sequência de bits e a fotocorrente resultante da estrutura quando polarizada directamente e inversamente, sendo que a fotocorrente gerada com a polarização directa é bastante inferior à resultante da polarização inversa.

Com a diferença de resultados obtidos através desta técnica é possível obter a combinação dos canais transmitidos, tendo sempre como referência o valor da fotocorrente gerada no escuro para a obtenção dos vários patamares de fotocorrente. Sob polarização directa a componente azul dos sinais combinados decresce para o nível escuro, o que permite a recuperação do sinal dos canais de entrada vermelho e verde.

Outro factor a ter em conta no processo de demultiplexagem do sinal transmitido é a influência da taxa de transmissão do sinal para a sua recuperação permitindo perceber qual o valor máximo de frequência de transmissão do sinal suportado pela estrutura. Pode ser observado na Figura 17 que ao aumentar a frequência de modulação do sinal, a sensibilidade da estrutura diminui e por consequência é aumentada a distorção do sinal o que leva a uma difícil detecção dos patamares de fotocorrente. Este efeito pode no entanto ser melhorado usando dispositivos de menor dimensão cujos efeitos capacitivos sejam dessa mesma forma minimizados.

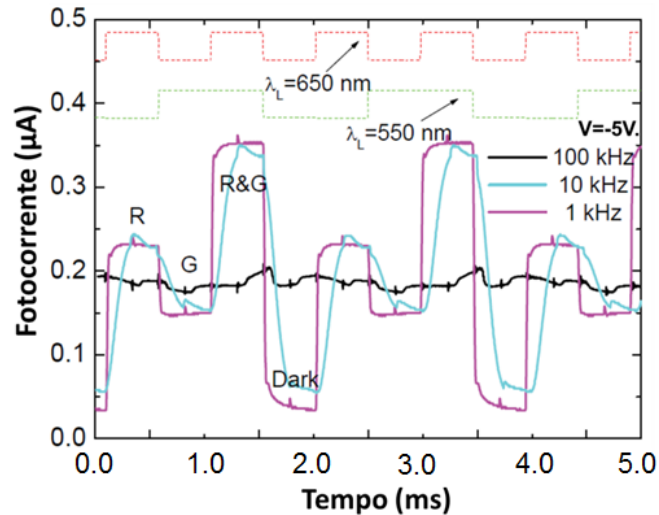


Figura 17 – Sinais multiplexados sob diferentes frequências do sinal incidente [22].

De forma a perceber a taxa de crescimento da fotocorrente com a potência óptica dos diferentes canais de entrada foi analisada a resposta da estrutura para cada canal individual, dado que existem fenómenos como a atenuação de sinal ao longo do meio de transmissão que causam uma diminuição da intensidade óptica recebida. Desta forma torna-se necessário analisar a influência deste efeito que pode ser observado na Figura 18.

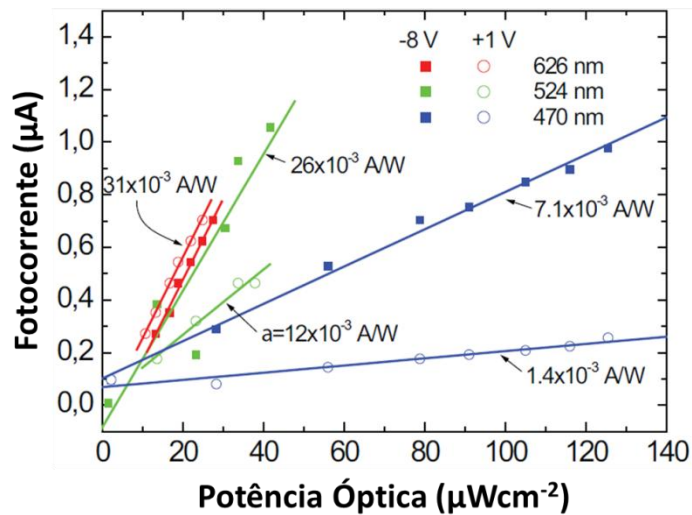


Figura 18 – Variação da fotocorrente com a potência óptica [22].

É possível observar que a fotocorrente gerada sob iluminação vermelha é quase independente da polarização aplicada e a sua intensidade aumenta linearmente com o aumento da potência óptica. Sob iluminação da luz verde ou azul, a fotocorrente gerada depende fortemente da polarização aplicada, sendo que a intensidade aumenta fortemente com o aumento da potência óptica desses canais [11, 17, 22].

2.5.1.5 - Influência da polarização óptica na resposta espectral

Outra das investigações mais recentes que incidiram sobre este tema recaiu sobre a influência da existência de polarização óptica na resposta espectral da estrutura, tendo este estudo sido realizado colocando um LED alimentado em modo estacionário (DC) como luz de fundo, para cada uma das cores RGB variando a sua respectiva tensão de polarização (Figura 19).

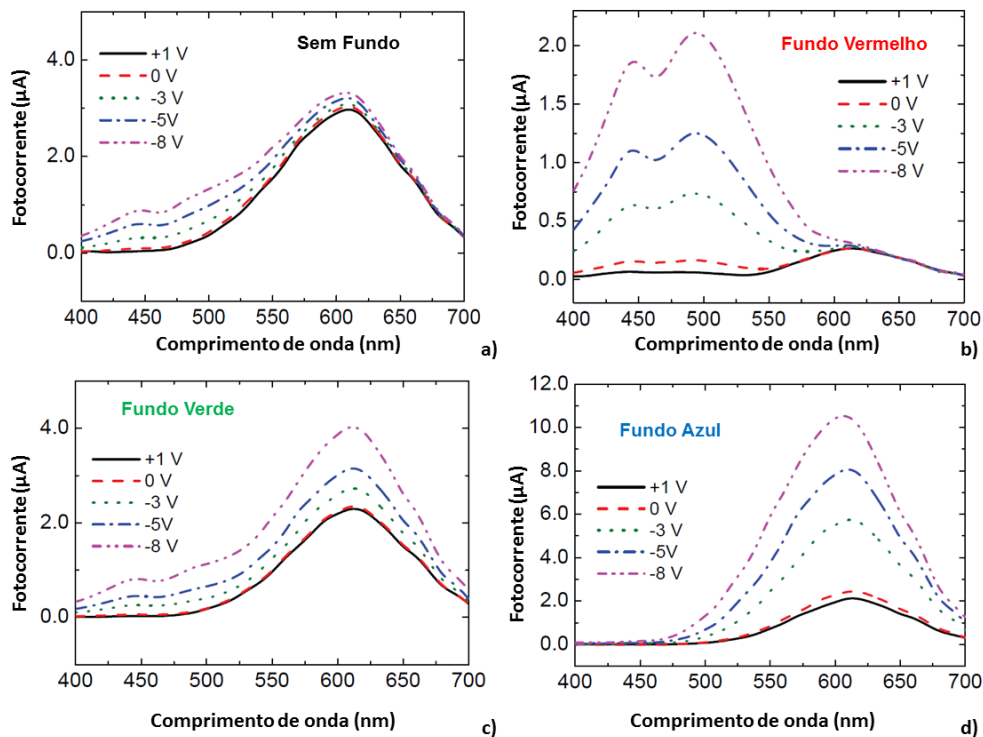


Figura 19 – Resposta espectral com polarização óptica de fundo:

a) Sem fundo, b) Fundo vermelho, c) Fundo verde e d) Fundo azul [22].

Os resultados obtidos na Figura 19 mostram que com a aplicação do fundo vermelho nos comprimentos de onda inferiores a cerca de 500nm o sinal é bastante amplificado e acima desse comprimento de onda o sinal é atenuado. Quando é aplicado um fundo de cor verde apenas os comprimentos de onda intermédios em torno da cor verde (525nm) são atenuados, os restantes, acima ou abaixo, são ligeiramente amplificados. Com a aplicação de um fundo de cor azul são obtidos os melhores resultados para os comprimentos de onda acima dos 500nm que são bastante amplificados apesar dos comprimentos de onda inferiores aos 500nm serem ligeiramente atenuados.

A dependência da tensão de polarização aplicada aliada à polarização óptica através da radiação da luz de fundo permite variar a sensibilidade espectral da estrutura e de uma forma global pode-se verificar que as cores de fundo atenuam sempre os comprimentos de onda em torno do seu próprio comprimento de onda e aumentam os restantes comprimentos de onda.

Na Figura 20 é apresentado outro cenário de testes, onde foi aplicado um sinal de onda quadrada a cada um dos três LEDs RGB em que a frequência do sinal do LED verde é o dobro da frequência do sinal do LED vermelho e em que o LED azul tem o dobro da frequência do sinal do LED verde.

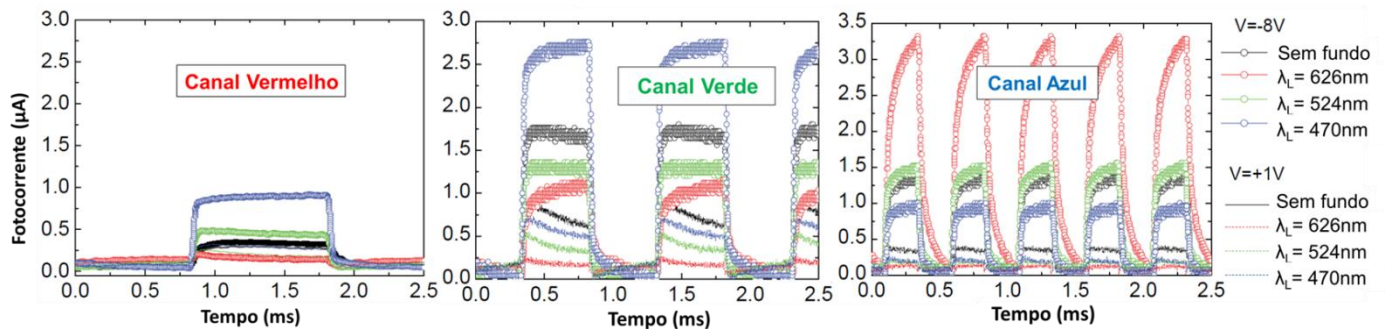


Figura 20 – Fotocorrente resultante da aplicação das radiações de fundo [22].

Verifica-se que com a aplicação da radiação de fundo das mesmas três cores do sinal de dados e variando também a tensão de polarização da estrutura é possível seleccionar um determinado canal de cor [11, 22].

2.6 - Referências

- [1] P. Moravek, M. Jelinek, D. Komosny, and M. Simek, "Visualization of a Hierarchical Aggregation in the IPTV Network Environment," in *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Brno University of Technology, Department of Telecommunications, Czech Republic, 2008.
- [2] G. Held, *Understanding IPTV*. New York: Auerbach Publications, 2007.
- [3] A. M. Dias, "Projecto de Diplomação: Análise de projectos de redes metropolitanas WDM," Porto Alegre, 2009.
- [4] N. S. Networks, "Dense Wavelength Division Multiplexing," *DWDM Overview*, 2006.
- [5] J. Pinto, C. Machado, M. Albuquerque, and M. Albuquerque, "DWDM em redes metropolitanas," in *CAT – Informática 1*, Rio de Janeiro: Centro brasileiro de pesquisas físicas, 2010.
- [6] C. C.-. Fargo, "Wavelength Division Multiplexing - CWDM vs DWDM," 2006.
- [7] I. Cisco Systems, *Cisco Enhanced Wavelength Division Multiplexing Product Line*. San Francisco: Cisco Systems, Inc, 2009.
- [8] W. J. Tomlinson and C. Lin, "Optical WDM Multiplexer for the 1-1.4 μm spectral region". *Electronics Letters*, 1978.

Capítulo 2 - Dispositivos WDM

- [9] T. Miki and H. Ishio, "Viabilities of the Wavelength-Division-Multiplexing Transmission System Over an Optical Fiber Cable". *IEEE Transactions on Communications*, 1978.
- [10] H. Waldman, "The E-volutionary Optical Network". *Microwave and Optoelectronics Conference, 2001. IMOC*, 2001.
- [11] T. A. Silva, "Tese de dissertação de Mestrado em Implementação de WDM com dispositivos semicondutores," ISEL, 2011.
- [12] N. Massa, "Fiber Optic Telecommunication," University of Connecticut, Massachusetts, 2000.
- [13] F. C. Europe, "FTTH Handbook," in *Deployment & Operations Committee*, 2009.
- [14] L. Huawei Technologies Co., "EchoLife HG860 GPON Terminal - Service Manual," 2008.
- [15] P. D. C. Bastos, "Sistemas de Comunicações Ópticas," in *Comunicação Digital I*, Escola Politécnica de Pernambuco - UPE, 2010.
- [16] T. G. Brown, K. Creath, H. Kogelnik, M. Kriss, J. Schmit, and M. J. Weber, *The Optics Encyclopedia: Basic Foundations and Practical Applications* vol. 4. Weinheim: WILEY-VCH, 2004.
- [17] C. S. Francisco, "Tese de dissertação de Mestrado em Demultiplexagem óptica controlada por tensão (DOV)," ISEL, 2008.
- [18] D. Lutz, M. Haupt, and U. Fischer, "Prism-Spectrometer as Demultiplexer for WDM over POF," in *Photonics and Microsystems, 2008 International Students and Young Scientists Workshop*, Harz Univ. of Appl. Sci., Wernigerode, Germany, 2008.
- [19] U. H. P. Fischer and M. Haupt, "POF-WDM-Systems," in *Harz University of Applied Sciences*, Wernigerode, 2007.
- [20] M. Haupt and U. Fischer-Hirchert, "WDM Key Element in the visible spectrum for Standard SI-POF". *Fachhochschule Schmalkalden*, 2010.
- [21] S. Amaral, "Tese de dissertação de Mestrado em Óptica Transparente: Wavelength Division Multiplexer," ISEL, 2010.
- [22] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, and J. Costa, "Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications". *Advances in Photodiodes*, 2010.
- [23] V. A. Manuel, M. Vieira, J. Costa, P. Louro, M. Fernandes, and A. Fantoni, "Double Pin Photodiodes with Two Optical Gate Connections for Light Triggering: A Capacitive Two-phototransistor Model," in *Sensors & Transducers Journal*, Belgium: Sensors Portal, 2011.

Capítulo 3 - Caracterização optoelectrónica

Ao longo deste capítulo foram realizadas experiências laboratoriais que incidiram sobre os aspectos de configuração do dispositivo semiconductor, sobre a sua respectiva sensibilidade espectral e também sobre a fotocorrente resultante quando o dispositivo é sujeito a uma determinada luz incidente.

3.1 - Descrição do dispositivo

Na Figura 21 é representado o diagrama esquemático simplificado da estrutura do dispositivo, em que no lado frontal possui uma camada muito fina (200nm) de um fotodíodo PIN baseado em a-SiC:H e no lado posterior possui um fotodíodo espesso (1000nm) baseado em a-Si:H. Ambos os fotodíodos são revestidos por um eléctrodo transparente (ITO) de forma a permitir que os fotões possam penetrar o dispositivo e simultaneamente estabelecer um bom contacto eléctrico para a medida de fotocorrente e também para que possa ser aplicada a tensão de polarização no dispositivo.

Esta característica do dispositivo é responsável pela existência de duas áreas distintas de fotocorrente, correspondentes a cada um dos dois tipos de fotodíodo e permite uma absorção selectiva espacial da luz incidente, dado que o dispositivo é normalmente polarizado inversamente e opera no domínio visível do espectro electromagnético (390 - 780nm).

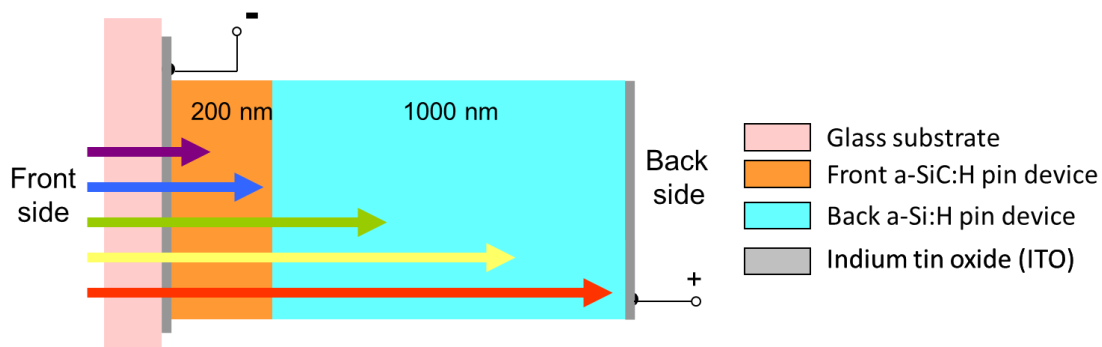


Figura 21 – Diagrama esquemático simplificado da estrutura do dispositivo semiconductor [1].

O fotodíodo PIN frontal é baseado em a-SiC:H, cujo hiato energético é ≈ 2.1 eV. Este valor corresponde a um comprimento de onda limite de $\lambda = \frac{1240}{2.1} = 590\text{nm}$. A radiação com um comprimento de onda superior não permite a foto-geração, o que significa que embora os fotões com um comprimento de onda longo incidam sobre o fotodíodo frontal, eles não são absorvidos por este, uma vez que a sua energia é inferior ao hiato energético do fotodíodo. Desta forma, a radiação no

Capítulo 3 - Caracterização optoelectrónica

domínio da cor vermelha (comprimento de onda superior a 600nm) não é absorvida neste fotodíodo [1, 2].

No fotodíodo posterior a camada intrínseca é de a-Si:H que tem um hiato energético inferior (≈ 1.8 eV). Deste modo, os fótons que passam através do fotodíodo frontal são absorvidos pelo fotodíodo posterior que possui um hiato energético inferior tornando-o sensível à radiação dos comprimentos de onda na região dos vermelhos e com um comprimento de onda limite de $\lambda = \frac{1240}{1.8} = 690\text{nm}$. No entanto como o coeficiente de absorção é tanto maior quanto menor for o comprimento de onda, a radiação de comprimentos de onda azul é absorvida preferencialmente no fotodíodo frontal (com 200nm de espessura), de modo que a foto-geração predominante no fotodíodo posterior é devida sobretudo à radiação de comprimentos de onda vermelhos, conforme se pode observar na Figura 22.

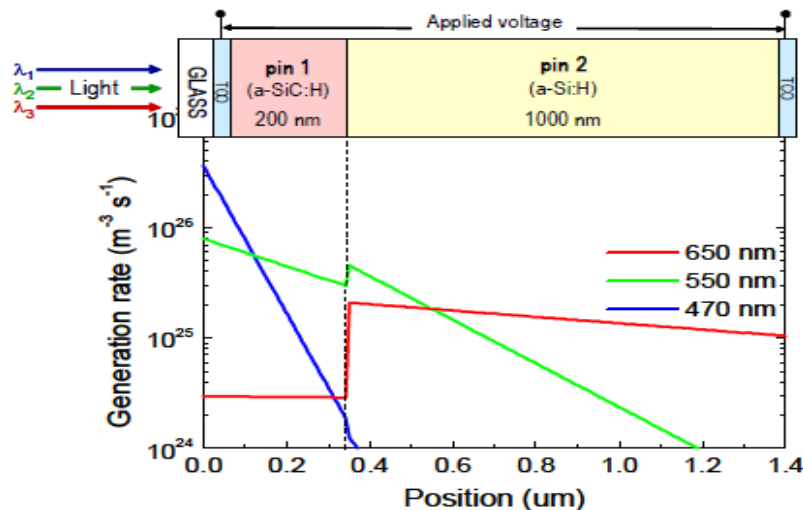


Figura 22 – Absorção dos comprimentos de onda na estrutura semicondutora [3].

Em termos práticos, o fotodíodo frontal baseado em a-SiC:H (pin1) absorve o sinal de comprimento de onda azul (470nm) e o sinal de comprimento de onda verde (525nm). O fotodíodo posterior baseado em a-Si:H (pin2), absorve o sinal de comprimento de onda vermelho (626nm) que o pin1 deixa passar. O dispositivo deixa de gerar fotocorrente em torno dos 690nm, o que é justificado pelo valor de ≈ 1.8 eV do hiato energético do a-Si:H. 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, assim como grande absorção da luz vermelha no fotodíodo posterior [3].

Algumas das características relevantes dos dispositivos semicondutores da estrutura, são apresentados na Tabela 1.

Semicondutor	a-SiC:H	a-Si:H
Comprimento de onda de corte (nm)	590	690
Comprimento de onda de pico (nm)	470	600
Hiato energético (eV)	2.1	1.8

Tabela 1 – Características dos semicondutores da estrutura.

3.2 - Simulação de resposta espectral

AFORS-HET 2.4.1 é um programa de computador desenvolvido pela *Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH* que permite a simulação, modulação e categorização de hetero-estruturas de múltiplas camadas de semicondutores e respectivos interfaces. Na versão actual, este programa apenas permite simulações a uma dimensão, mas permite a medição dos mais variados parâmetros, bem como efectuar simulações sob diversas condições de iluminação incidente, temperatura, tensão, sobre a estrutura alvo [4-7].

Com esta aplicação foi feita uma análise teórica sobre cada um dos dois tipos de semicondutor que fazem parte da estrutura e por fim foi feita uma análise de toda a estrutura empilhada de forma a simular os resultados obtidos em laboratório.

3.2.1 - Semicondutor a-SiC:H

Na aplicação indicada foi recriada uma estrutura de semicondutor baseada em a-SiC:H semelhante à utilizada no laboratório que é composta por duas camadas fortemente dopadas (p e n) e bastante mais finas do que a camada intrínseca. Os parâmetros constituintes da estrutura alvo de simulação encontram-se representados na Figura 23.

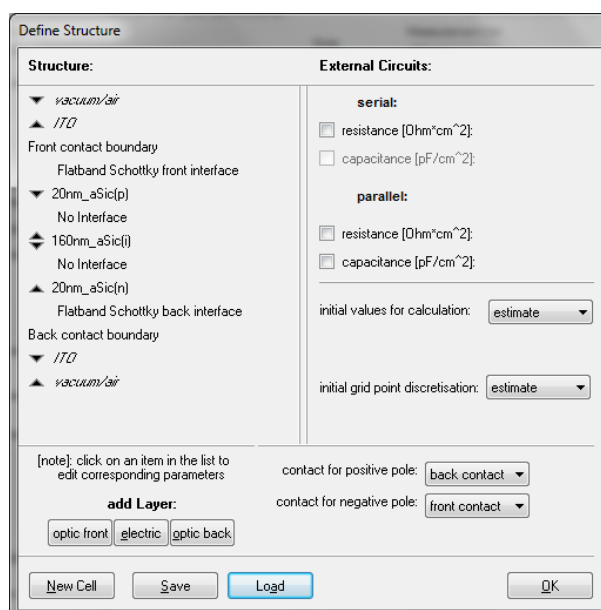


Figura 23 – Configuração da estrutura do semicondutor a-SiC:H.

Capítulo 3 - Caracterização optoelectrónica

A resposta espectral do semiconductor respeita os fundamentos teóricos que foram definidos para as características do dispositivo (Tabela 1), sobretudo o facto do valor do comprimento de onda de corte 590nm ser semelhante ao valor obtido na resposta espectral simulada (Figura 24).

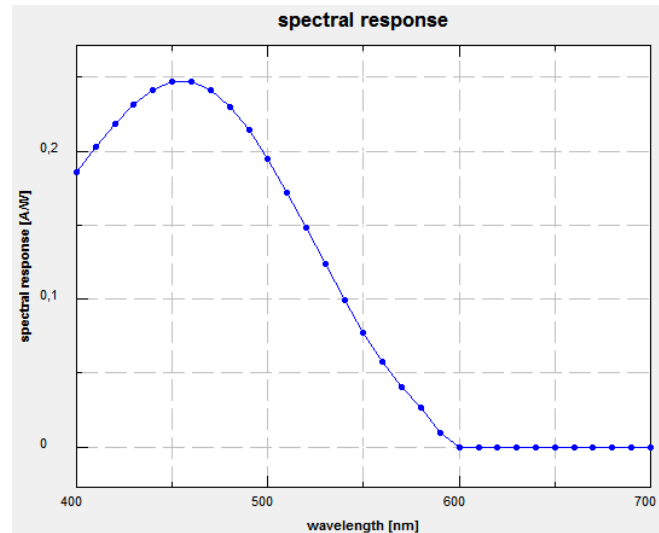


Figura 24 – Resposta espectral do semiconductor a-SiC:H.

3.2.2 - Semiconductor a-Si:H

Na aplicação indicada foi recriada uma estrutura do semiconductor baseado em a-Si:H semelhante à utilizada no laboratório que é composta por duas camadas fortemente dopadas (p e n) e bastante mais finas do que a camada intrínseca. Os parâmetros constituintes da estrutura alvo de simulação encontram-se representados na Figura 25.

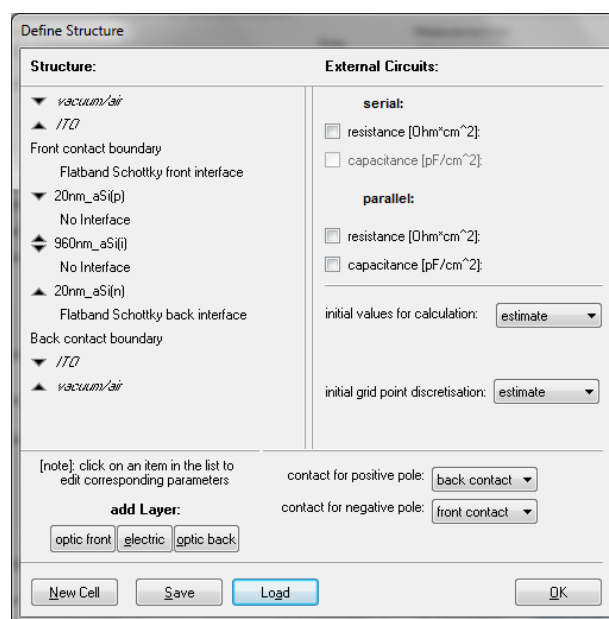


Figura 25 – Configuração da estrutura do semiconductor a-Si:H.

A resposta espectral do semiconductor respeita os fundamentos teóricos que foram definidos para as características do dispositivo (Tabela 1), sobretudo o facto do valor do comprimento de onda de corte 690nm ser relativamente próximo ao valor obtido na resposta espectral simulada (Figura 26).

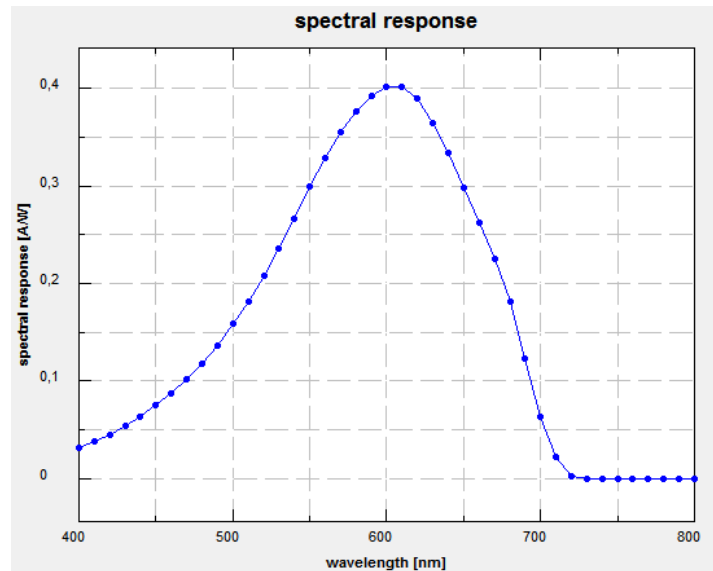


Figura 26 – Resposta espectral do semiconductor a-Si:H.

3.2.3 - Semicondutores a-SiC:H/a-Si:H empilhados

De forma a recriar o mesmo cenário onde serão feitas as simulações reais no laboratório, de uma estrutura semicondutora pin-pin com o fotodíodo frontal baseado numa composição a-SiC:H e com um fotodíodo posterior baseado numa composição a-Si:H, foi definida uma estrutura semicondutora composta por duas camadas fortemente dopadas (p e n) e bastante mais finas do que a camadas intrínseca, tanto na estrutura do semiconductor a-SiC:H, como na estrutura do semiconductor a-Si:H semelhante à indicada na aplicação de simulação.

De referir que na aplicação indicada não foi criado nenhum tipo de interface entre os dois tipos de semicondutores (junção n do semiconductor baseado em a-SiC:H com a junção p do semiconductor baseado em a-Si:H) dado que deverá existir um “túnel” entre as duas junções de forma a que os comprimentos de onda inferiores sejam absorvidos pelo primeiro semiconductor e que os restantes comprimentos de onda possam atravessar este semiconductor e serem absorvidos pelo segundo semiconductor. Os parâmetros constituintes da estrutura alvo de simulação encontram-se representados na Figura 27.



Figura 27 – Configuração da estrutura dos semicondutores a-SiC:H/a-Si:H empilhados.

A resposta espectral do dispositivo empilhado obtida nesta simulação não respeita os fundamentos teóricos que foram definidos para as características do dispositivo (Tabela 1), sobretudo o facto dos valores obtidos não serem a conjugação da resposta espectral dos dois semicondutores (Figura 28).

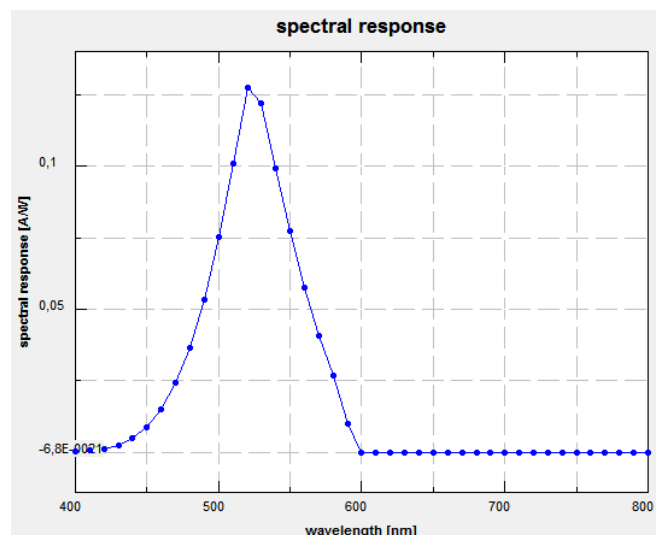


Figura 28 – Resposta espectral dos fotodíodos PIN a-SiC:H/a-Si:H empilhados.

Até cerca dos 550-590nm o resultado deveria ser semelhante ao do primeiro semiconductor (a-SiC:H) (Figura 24) em que a resposta espectral teria um valor de “pico” em torno dos 450nm, sendo que a partir dos cerca de 550-590nm, o resultado obtido deveria ser semelhante ao do segun-

do semiconductor (a-Si:H) (Figura 26) em que a resposta espectral teria um valor de “pico” em torno dos 600nm e com um comprimento de onda de corte em torno dos 690nm.

De forma a analisar a diferença dos resultados obtidos face ao esperado, foi feita a análise conjunta da resposta espectral dos dois semicondutores em separado com a resposta dos dois empilhados no mesmo gráfico (Figura 29).

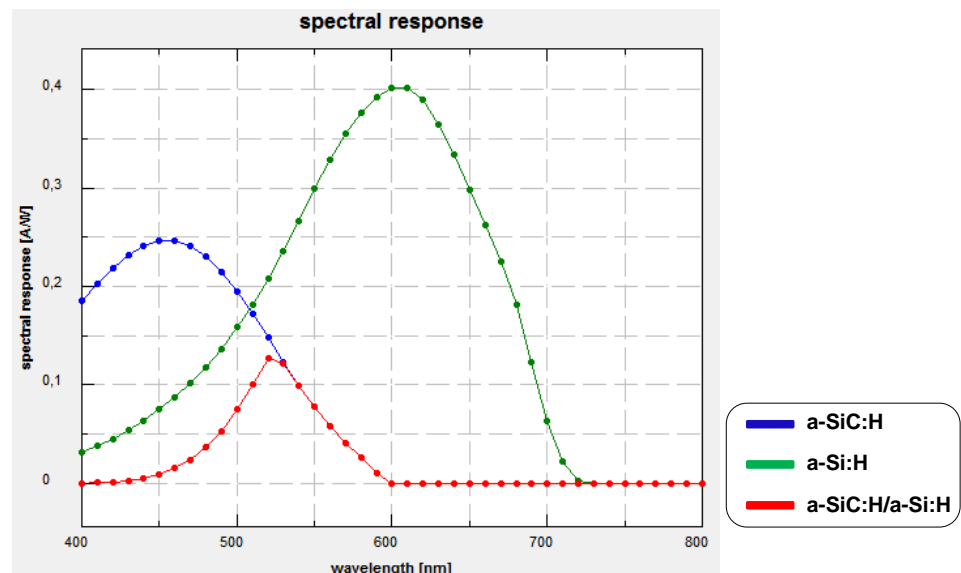


Figura 29 – Resposta espectral dos semicondutores a-SiC:H/a-Si:H isolados e empilhados.

Por análise do gráfico verificamos que a resposta espectral dos dois semicondutores empilhados segue (apesar de um pequeno decréscimo de valor) o comportamento da resposta espectral do semiconductor a-Si:H até cerca dos 525nm e que após esse comprimento de onda segue o comportamento da resposta obtida pelo semiconductor a-SiC:H, quando deveria ter exactamente o comportamento inverso.

Perante esta diferença de resultados foram tentados vários tipos de ajustes na configuração da simulação, sendo que a causa estará na forma de análise desta estrutura que não efectua uma análise da parte frontal da estrutura para a parte posterior e não cria um “túnel” entre os dois semicondutores que permitiria que os sinais que não fossem absorvidos no fotodíodo frontal atravessassem este e fossem absorvidos pelo fotodíodo posterior da estrutura.

Foi ainda tentado um contacto para com os responsáveis pela criação e distribuição da aplicação reportando esta situação, mas efectivamente nenhum dos intervenientes tinha feito até ao momento uma simulação de uma estrutura PIN-PIN ou não tinham experiência na simulação deste tipo de células, deixando no ar efectivamente que seria necessário definir um “túnel” entre as junções, função que até à data não é suportada pela aplicação.

3.3 - Medidas de resposta espectral

A resposta espectral estuda a fotocorrente gerada para cada comprimento de onda da luz incidente, sendo uma medida importante para a caracterização do dispositivo semiconductor pois corresponde a uma medida directa da célula. Esta é considerada a resposta do dispositivo para cada comprimento de onda da radiação incidente.

Dado que em experiências anteriores já se tinha concluído acerca da influência da polarização óptica na resposta espectral, nesta medição foi analisada a influência da luz de fundo sob duas perspectivas. Foi variada a posição da luz de fundo (lado frontal e posterior do dispositivo) e variada a frequência da luz incidente.

De forma a possibilitar a realização das medidas para o estudo da resposta espectral da estrutura semicondutora, foi efectuada a montagem da Figura 30.

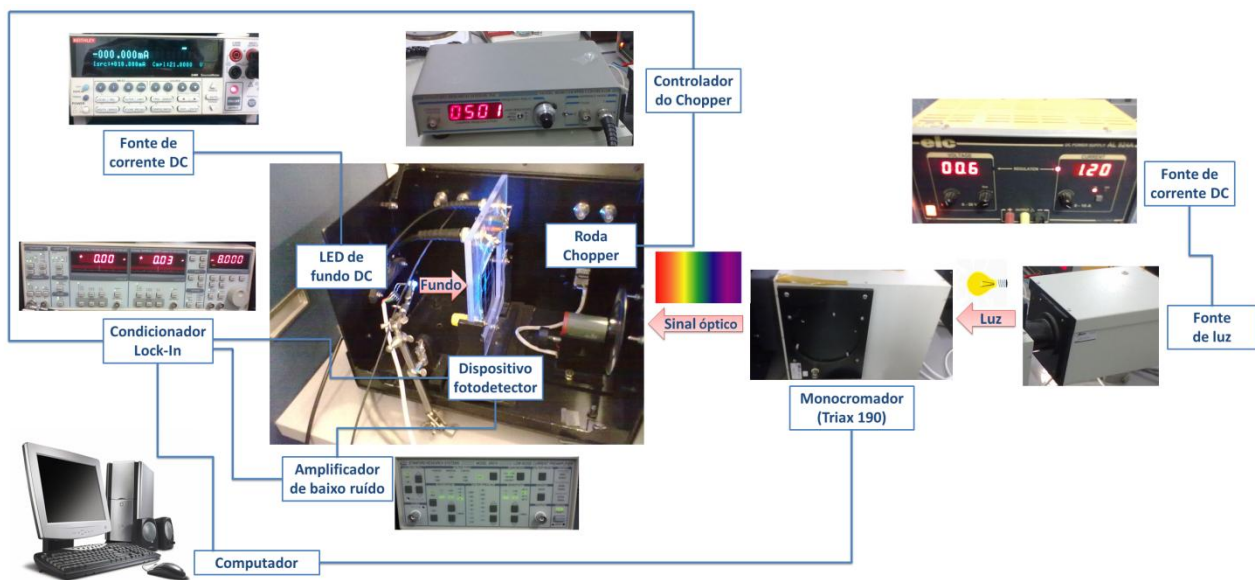


Figura 30 – Diagrama da montagem para o estudo da resposta espectral.

Para a medição da resposta espectral do dispositivo foi utilizada uma fonte de luz de halogénio que é separada em diferentes comprimentos de onda usando um monocromador, sendo que toda a experiência é controlada por um computador.

A luz emitida por essa fonte luminosa é focada na grelha de difracção do monocromador que é controlado por um motor de passos, permitindo efectuar o varrimento dos diferentes comprimentos de onda desde os 400nm até aos 800nm. Em cada comprimento de onda, a luz monocromática resultante incide no fotodetector, sendo então realizada a medida da fotocorrente gerada pelo dispo-

sitivo através do *Lock-in*. É também utilizado um pré-amplificador de baixo ruído, entre a saída do sinal do dispositivo fotodetector e a entrada do sinal no *Lock-in*, de forma a permitir amplificar o sinal gerado pelo dispositivo fotodetector dado que este é bastante pequeno.

O *Chopper* permite modular a frequência do sinal da fonte de luz incidente e é através do *Lock-in* que o dispositivo fotodetector pode ser polarizado com valores de tensão positiva ou negativa.

Os LEDs de fundo que incidem no lado frontal e posterior são alimentados por uma fonte de corrente DC que permite controlar a sua respectiva intensidade luminosa. A correspondência entre a intensidade de corrente aplicada ao LED e a potência óptica resultante é apresentada na Tabela 2.

Intensidade de corrente	Potência óptica dos LEDs ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)				
	Violeta	Azul	Verde	Amarelo	Vermelho
0.1mA	16	5	1,75	1,9	2
0.5mA	120	15	33	16,5	20
1mA	360	48	72	39	47
5mA	1391	335	300	241	205
10mA	2790	680	595	501	652
15mA	4181	1015	895	742	857
20mA	5170	1280	980	925	1345

Tabela 2 – Potência óptica dos LEDs de fundo em função da intensidade de corrente.

3.3.1 - Influência da luz de fundo pelo lado frontal

De forma a analisar a influência da luz de fundo pelo lado frontal, foram estudados dois cenários, fazendo variar a intensidade da luz de fundo emitida pelo LED em regime DC e fazendo também variar a frequência do sinal incidente.

Assim, foram feitas medições quando o dispositivo se encontra sem iluminação de fundo e quando é colocado um LED de uma determinada cor polarizado com uma corrente de 0.1mA, 0.5mA, 1mA, 5mA, 10mA, 15mA e 20mA para uma frequência do sinal incidente de 500Hz e de 3000Hz.

3.3.1.1 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 500Hz

Colocando a frequência do sinal incidente nos 500Hz foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização.

Capítulo 3 - Caracterização optoelectrónica

Os resultados obtidos (Figura 31) são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (Escuro).

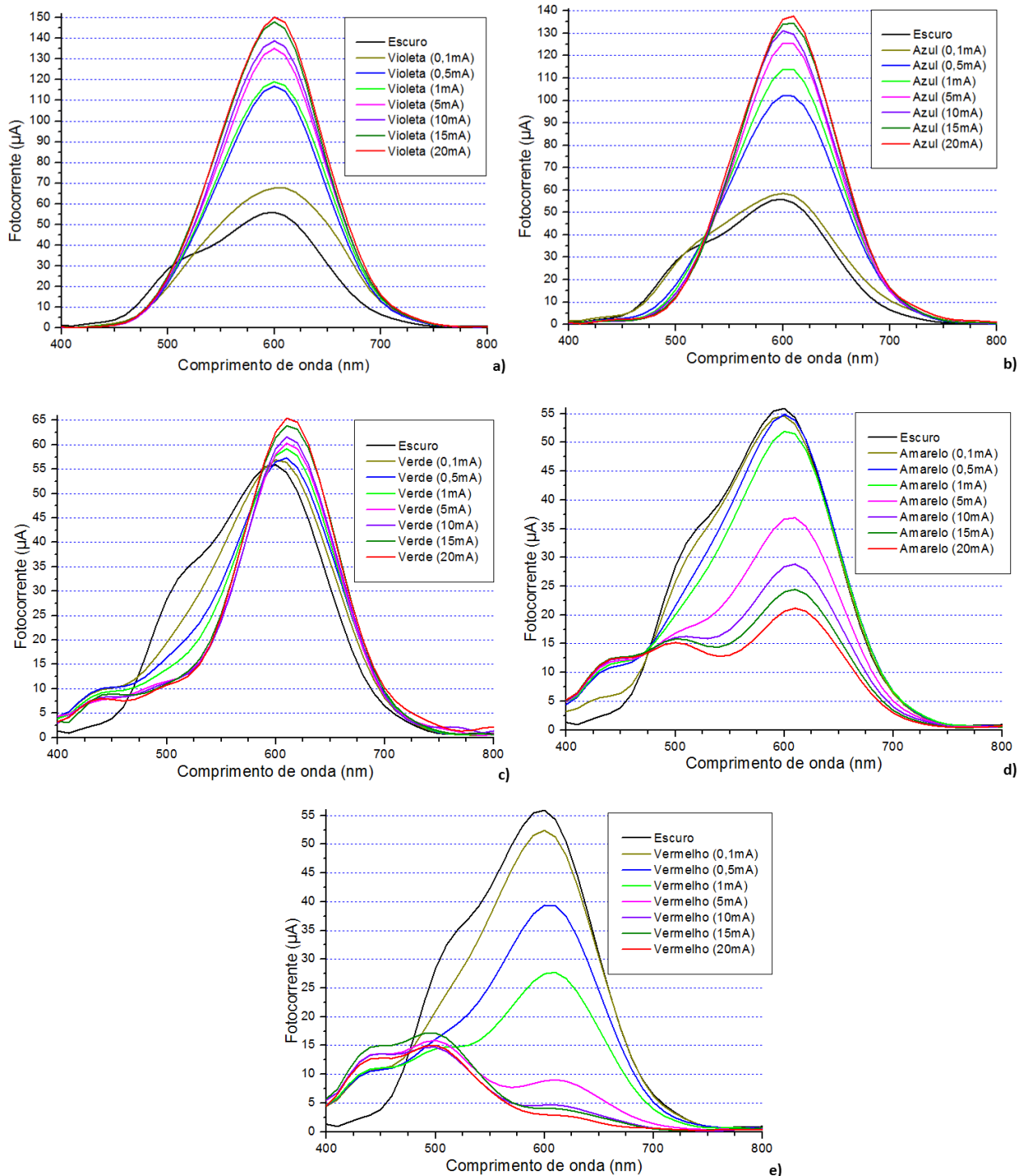


Figura 31 – Resposta espectral a uma frequência de 500Hz com luz de fundo frontal:

a) Violeta, b) Azul, c) Verde, d) Amarelo e e) Vermelho

Na Figura 31 a) e b) é possível verificar que ao fazer incidir uma luz de fundo de cor violeta e azul pelo lado frontal da estrutura a uma frequência de 500Hz a fotocorrente gerada acima dos comprimentos de onda de 525nm é sempre amplificada seja qual for a intensidade da iluminação de fundo.

Incidindo uma luz de fundo de cor verde (Figura 31 c)) é visível também um aumento da fotocorrente gerada acima dos comprimentos de onda dos 600nm, sendo no entanto um aumento bastante ligeiro face aos identificados com a presença dos fundos violeta e azul.

Nos fundos acima indicados (violeta, azul e verde) a amplificação é maior com o aumento da intensidade dessa iluminação.

Com a presença de uma luz de fundo de cor amarela e vermelha, conforme demonstra a Figura 31 d) e e), é possível verificar que a fotocorrente gerada acima dos comprimentos de onda de 475nm é sempre atenuada seja qual for a intensidade da iluminação de fundo, sendo essa mesma atenuação maior com o aumento da intensidade dessa iluminação.

Por outro lado, para os fundos de cor violeta e azul, nos comprimentos de onda abaixo dos 500-525nm a fotocorrente gerada é inferior ao valor de fotocorrente no escuro, enquanto de forma inversa, para os fundos de cor verde, amarela e vermelha, a fotocorrente gerada para os comprimentos de onda inferiores aos 475nm é ligeiramente superior ao valor de fotocorrente no escuro, sendo estes pouco dependentes da corrente de polarização do LED de fundo.

3.3.1.2 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 3000Hz

Colocando a frequência do sinal incidente nos 3000Hz foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos (Figura 32) são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (Escuro).

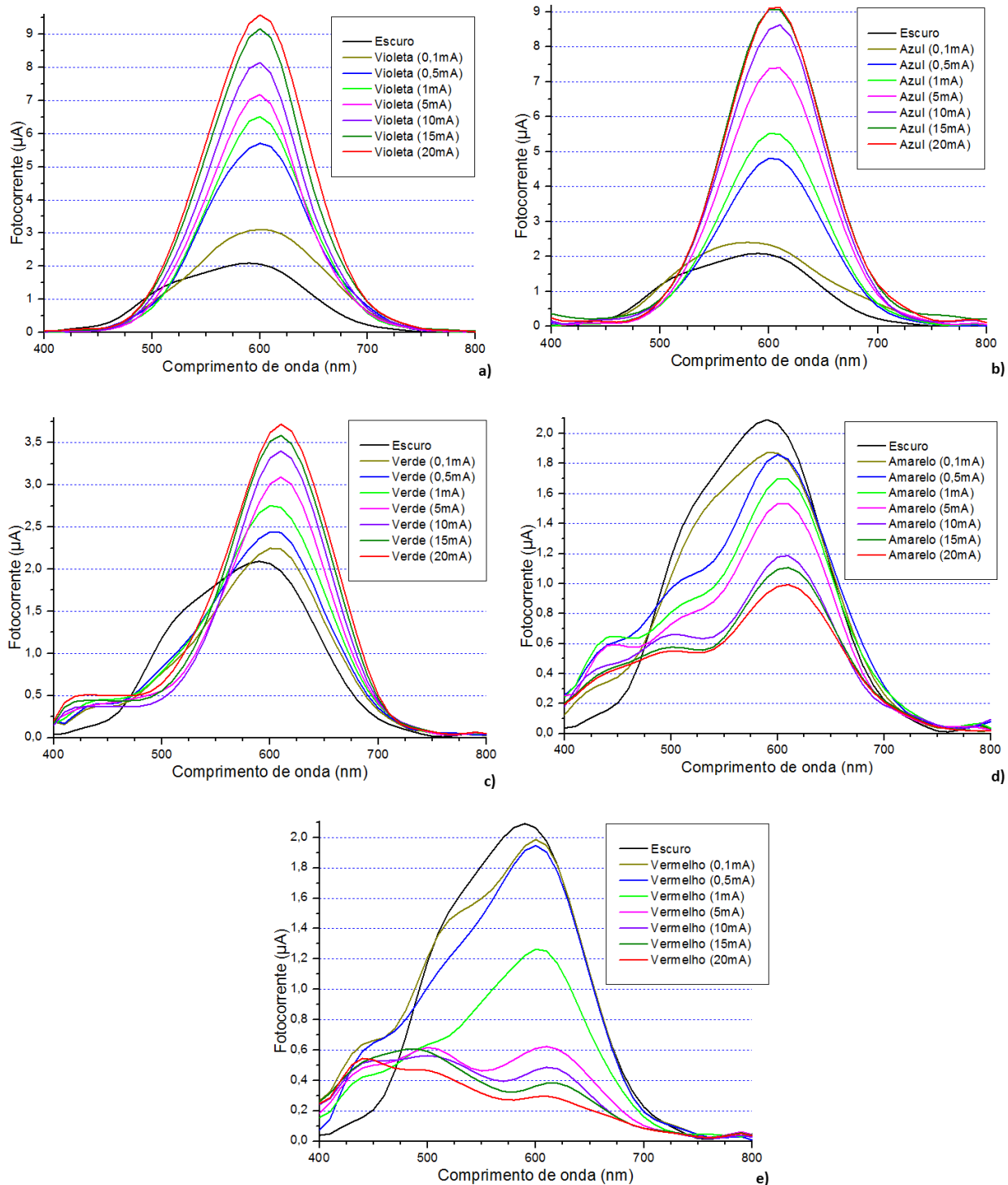


Figura 32 – Resposta espectral a uma frequência de 3000Hz com luz de fundo frontal:

a) Violeta, b) Azul, c) Verde, d) Amarelo e e) Vermelho

Na Figura 32 é possível verificar que o comportamento da resposta espectral do dispositivo face à radiação de todas as cores de fundo é idêntico ao da Figura 31, tendo no entanto valores de fotocorrente gerada bastante inferiores, dado que foi aumentada a frequência do sinal incidente de 500Hz para 3000Hz. Este comportamento da estrutura permite perceber que aumentando a frequência do sinal incidente o sinal da fotocorrente gerada tende a diminuir.

Assim, a incidência da luz de fundo violeta e azul (Figura 32 a) e b)) faz com que a fotocorrente gerada acima dos comprimentos de onda de 525nm seja sempre amplificada seja qual for a intensidade da iluminação de fundo.

A luz de fundo verde amplifica também a fotocorrente gerada mas apenas acima dos comprimentos de onda dos 550-575nm (Figura 32 c)). A presença da luz de fundo amarela e vermelha atenua os comprimentos de onda acima dos 475-500nm independentemente da intensidade da iluminação de fundo, mas abaixo desses comprimentos de onda o valor de fotocorrente gerada é superior face ao valor medido no escuro.

Nos comprimentos de onda abaixo dos 525nm, a fotocorrente gerada pela radiação dos fundos de cor violeta e azul, é inferior ao valor de fotocorrente no escuro, enquanto para os fundos de cor verde, amarela e vermelha, a fotocorrente gerada para os comprimentos de onda inferiores aos 475nm é ligeiramente superior ao valor de fotocorrente no escuro, sendo notório que existe pouca dependência da corrente de polarização do LED de fundo nestes comprimentos de onda mais baixos (Figura 32 d e e)).

3.3.2 - Influência da luz de fundo pelo lado posterior

De forma a analisar a influência da luz de fundo pelo lado posterior, foram estudados dois cenários, fazendo variar a intensidade da luz de fundo emitida pelo LED em regime DC e fazendo também variar a frequência do sinal incidente.

Assim, foram feitas medições quando o dispositivo se encontra sem iluminação de fundo e quando é colocado um LED de uma determinada cor polarizado com uma corrente de 0.1mA, 0.5mA, 1mA, 5mA, 10mA, 15mA e 20mA para uma frequência do sinal incidente de 500Hz e de 3000Hz.

3.3.2.1 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 500Hz

Colocando a frequência do sinal incidente nos 500Hz foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos (Figura 33) são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (Escuro).

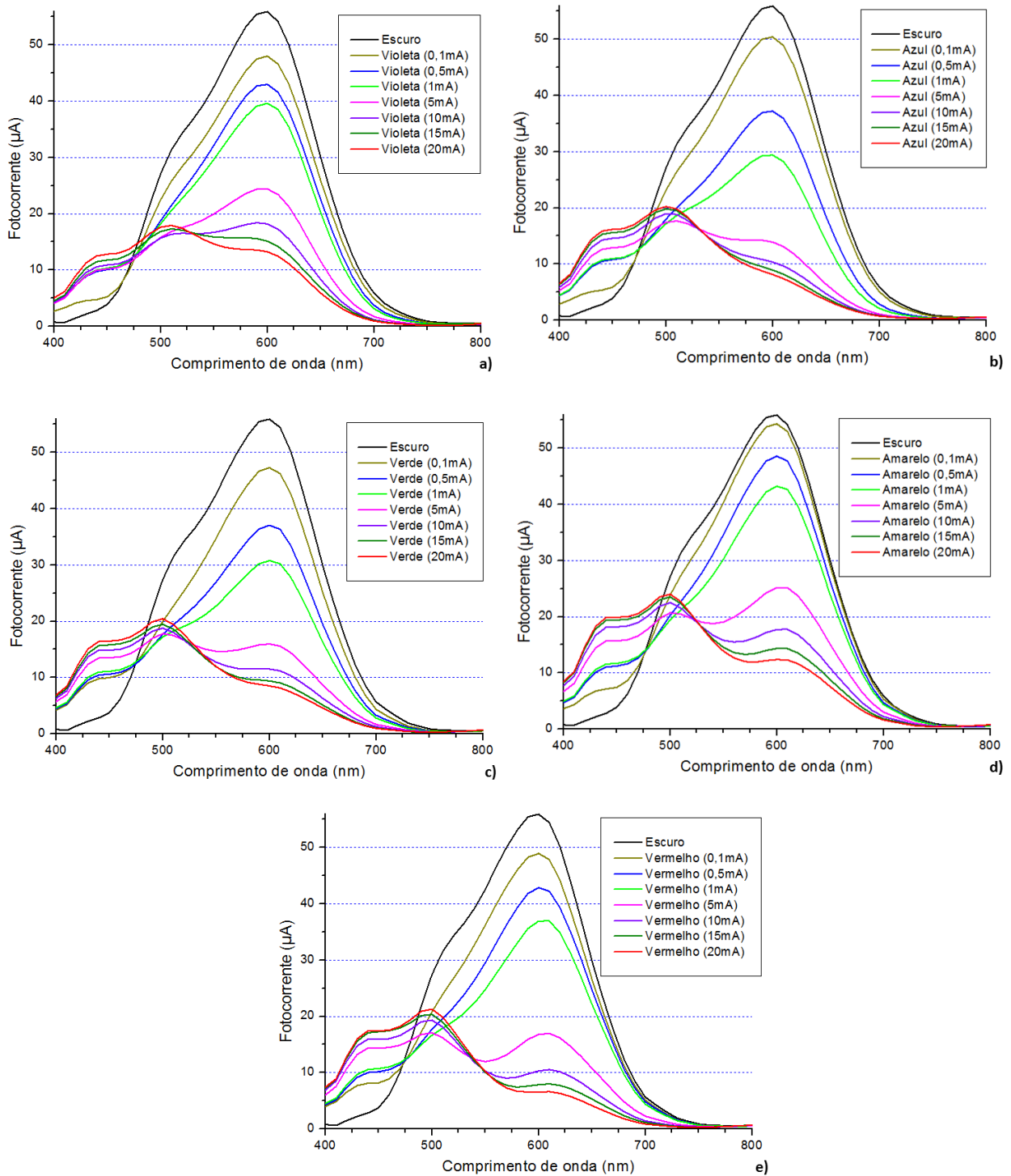


Figura 33 – Resposta espectral a uma frequência de 500Hz com luz de fundo posterior:

a) Violeta, b) Azul, c) Verde, d) Amarelo e e) Vermelho

Pela Figura 33 é possível verificar que incidindo uma luz de fundo pelo lado posterior da estrutura a uma frequência de 500Hz, independentemente da cor de fundo, a fotocorrente gerada acima dos comprimentos de onda de 475-500nm é sempre atenuada seja qual for a intensidade da iluminação de fundo, sendo a atenuação maior com o aumento da intensidade dessa mesma iluminação.

De modo inverso, para os comprimentos de onda abaixo dos 475-500nm, a fotocorrente gerada é superior ao valor de fotocorrente no escuro, sendo esse valor maior com o aumento da intensidade da iluminação de fundo.

Ao contrário do verificado na Figura 31 e Figura 32, o comportamento da estrutura semicondutora face à radiação da luz de fundo pelo lado posterior é independente da cor de fundo e a fotocorrente gerada é fortemente dependente da intensidade de iluminação de fundo.

3.3.2.2 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 3000Hz

Colocando a frequência do sinal incidente nos 3000Hz foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos (Figura 34) são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (Escuro).

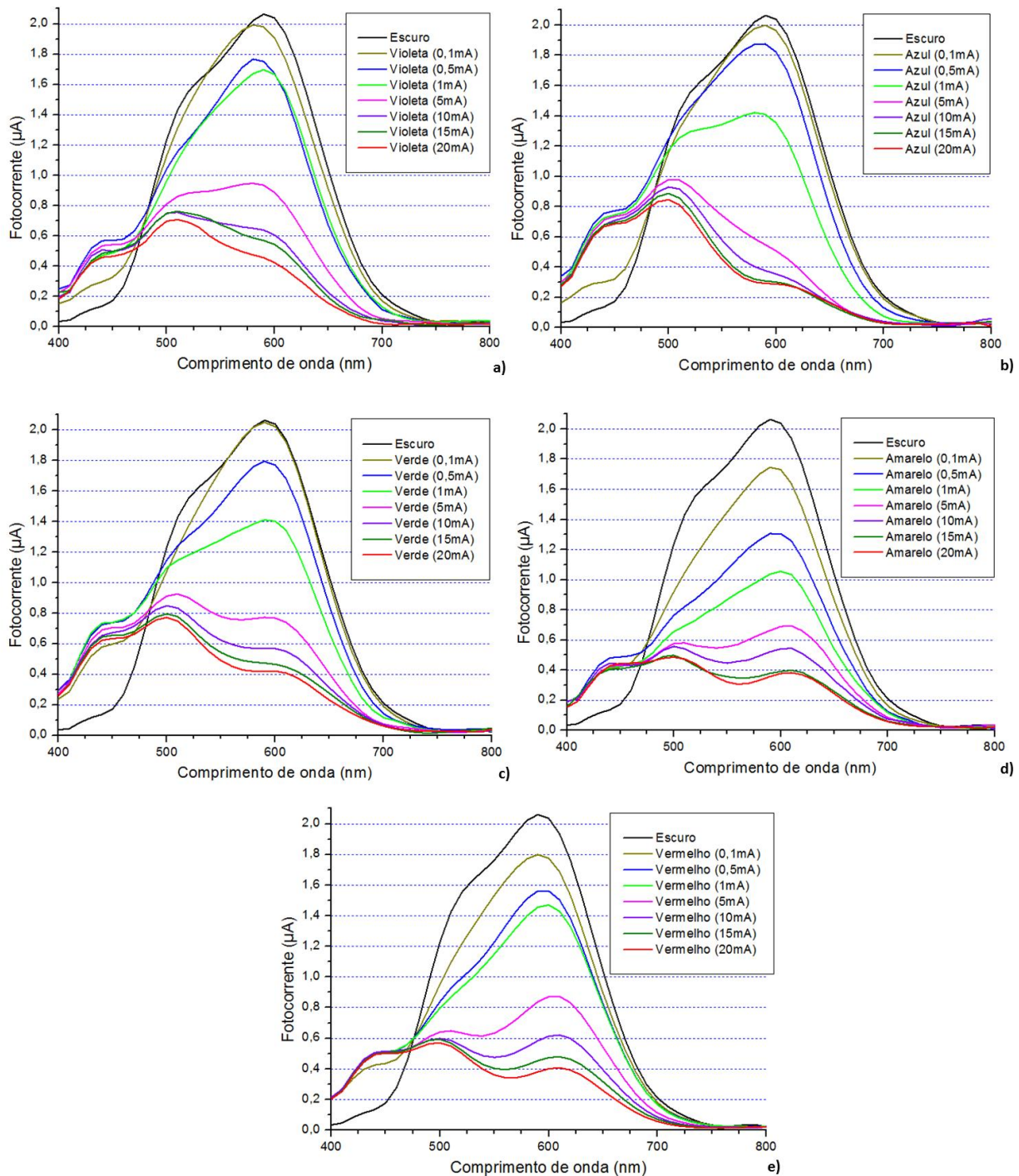


Figura 34 – Resposta espectral a uma frequência de 3000Hz com luz de fundo posterior:

a) Violeta, b) Azul, c) Verde, d) Amarelo e e) Vermelho

Tal como na Figura 33, a Figura 34 permite chegar às mesmas conclusões, sendo que a única diferença é os valores de fotocorrente gerada serem bastante inferiores. Este facto já tinha sido constatado anteriormente onde se verificou que aumentando a frequência do sinal incidente o sinal de fotocorrente gerada tende a diminuir.

Desta forma, qualquer que seja a cor da luz de fundo aplicada pelo lado posterior da estrutura a uma frequência de 3000Hz, a fotocorrente gerada acima dos comprimentos de onda de 475-500nm é sempre atenuada seja qual for a intensidade da iluminação de fundo, sendo a atenuação maior com o aumento da intensidade dessa mesma iluminação.

A fotocorrente gerada para os comprimentos de onda abaixo dos 475-500nm é superior ao valor de fotocorrente no escuro, sendo esse valor maior com o aumento da intensidade da iluminação de fundo.

Assim, é possível concluir que existe pouca dependência entre a cor de fundo e a fotocorrente gerada, existindo no entanto uma forte dependência com a intensidade da iluminação de fundo.

3.4 - Referências

- [1] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, V. Silva, and A. Fantoni, "Novel device for implementation of WDM in the visible spectrum". *2012 MRS Spring Meeting*, 2012.
- [2] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, and J. Costa, "Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications". *Advances in Photodiodes*, 2010.
- [3] P. Louro, V. A. Manuel, S. Amaral, M. Fernandes, J. Costa, and M. Vieira, "Integrated demultiplexer and photodetector for short range transmission in the visible range," in *Current topics in solid state physics*, Germany: WILEY-VCH, 2010.
- [4] H.-Z. B. f. M. u. Energie, "Numerical Simulation of Solar Cells and Solar Cell Characterization Methods: the Open-Source on Demand Program AFORS-HET". *Hahn-Meitner-Institut Berlin (HMI), Institut für Silizium Photovoltaik*, 2010.
- [5] H.-Z. B. f. M. u. Energie, "Open Source on Demand". *Hahn-Meitner-Institut Berlin (HMI), Institut für Silizium Photovoltaik*, 2010.
- [6] R. Stangl, M. Kriegel, and M. Schmidt, "AFORS-HET, a numerical PC program for simulation of (thin film) heterojunction solar cells". *Hahn-Meitner-Institut Berlin (HMI), Institut für Silizium Photovoltaik*, 2010.
- [7] H.-Z. B. f. M. u. Energie, "Diplomverteidigung," in *Hahn-Meitner-Institut Berlin (HMI), Institut für Silizium Photovoltaik*: Germany, 2010.

Capítulo 4 - Análise de sinais WDM

Nesta fase do trabalho pretende-se analisar a transmissão de sinais WDM e a utilização do dispositivo fotodetector como demultiplexador sob diferentes condições de iluminação, variando o *bitrate* e a intensidade dos LEDs geradores do sinal, bem como a intensidade, posição e comprimento de onda da radiação do LED de fundo.

De forma a ser possível caracterizar esta estrutura semicondutora como dispositivo demultiplexador foi feita a medição da fotocorrente gerada com um osciloscópio sob diferentes condições de iluminação de fundo. A montagem experimental encontra-se esquematizada na Figura 35.

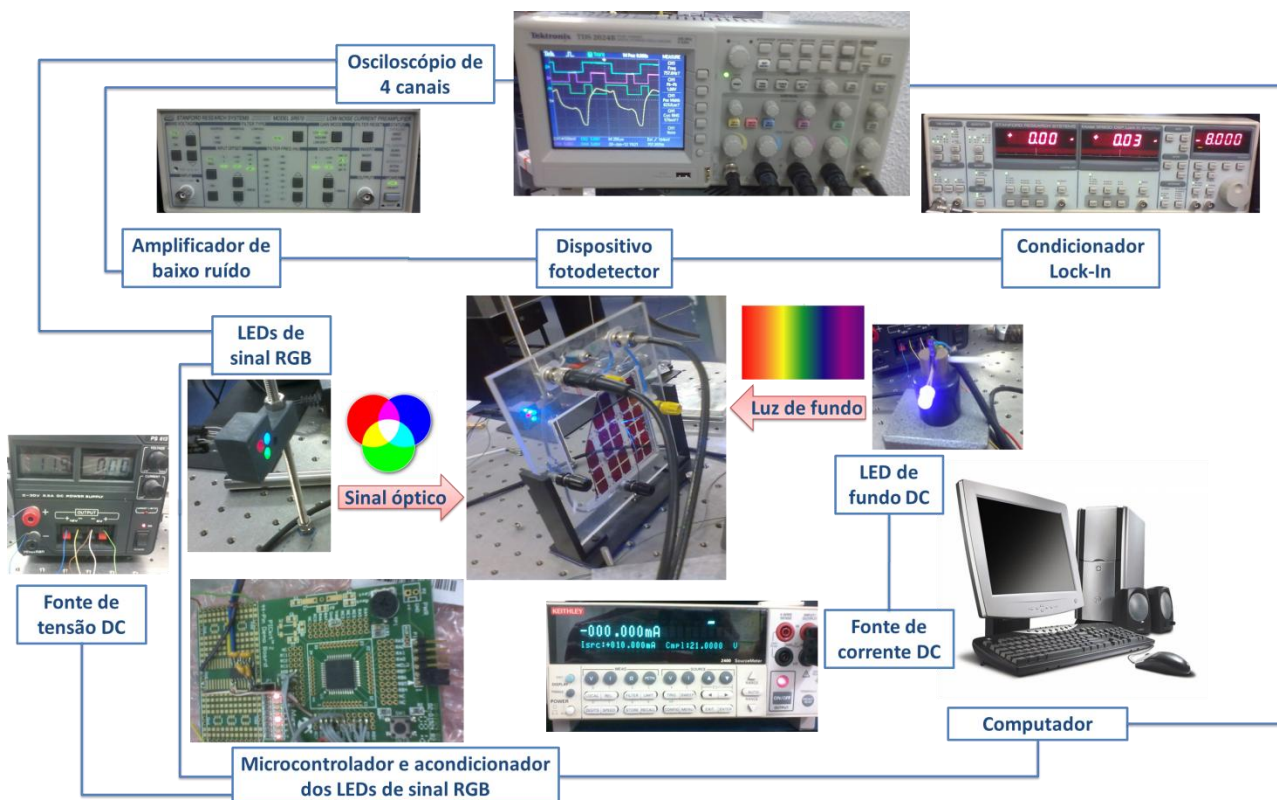


Figura 35 – Diagrama da montagem para o estudo dos sinais WDM.

Para a simulação dos três canais de transmissão de dados foram utilizados três LEDs de alto brilho com os respectivos comprimentos de onda que cobrem a região do espectro visível, luz vermelha (626nm), verde (525nm) e azul (470nm). Cada um destes LEDs irá representar um canal óptico diferente através de um sinal de onda quadrada que será controlado por uma placa microcontroladora ligada a um computador.

Esta placa é alimentada através de uma fonte DC de tensão e totalmente configurável através de uma ligação série de um computador. Através desta placa é possível definir e gerar as sequências

binárias individuais nos três canais e também regular a corrente de polarização desses mesmos LEDs emissores de sinal.

De forma a poder controlar a tensão de polarização do dispositivo fotodetector, é utilizado o dispositivo condicionador *Lock-In* configurado para uma determinada tensão DC fixa. Dado que o sinal de fotocorrente gerado pelo dispositivo fotodetector é bastante pequeno, é necessário efectuar a amplificação desse mesmo sinal. Para tal, é utilizado um dispositivo pré-amplificador de baixo ruído.

Para a leitura do sinal óptico emitido pelos três canais de transmissão de dados e também para a medição da fotocorrente gerada pelo dispositivo fotodetector, foi utilizado um osciloscópio digital de 4 canais, sendo possível com um *software* de captura de dados aceder a esta informação do osciloscópio através de um computador.

Dado que a leitura de valores por parte do osciloscópio é realizada em unidades de tensão (*Volt*) é necessário efectuar a conversão para as unidades de corrente (*Ampere*). Desta forma, é utilizado o factor de conversão proveniente do equipamento amplificador de baixo ruído, onde as unidades se expressam em $\mu\text{A}/\text{V}$. Ao longo das medições efectuadas tipicamente foram utilizados os valores de 1 e $2\mu\text{A}/\text{V}$ no amplificador de baixo ruído (consoante as medidas realizadas), o que permitiu que fosse utilizado esse respectivo factor de conversão para a apresentação de todos os resultados gráficos seguintes em que os valores de fotocorrente se expressam em μA .

Os LEDs de fundo que incidem no lado frontal e posterior são alimentados por uma fonte de corrente DC que permite controlar a sua respectiva intensidade luminosa e são também posicionados num suporte específico (Figura 36).

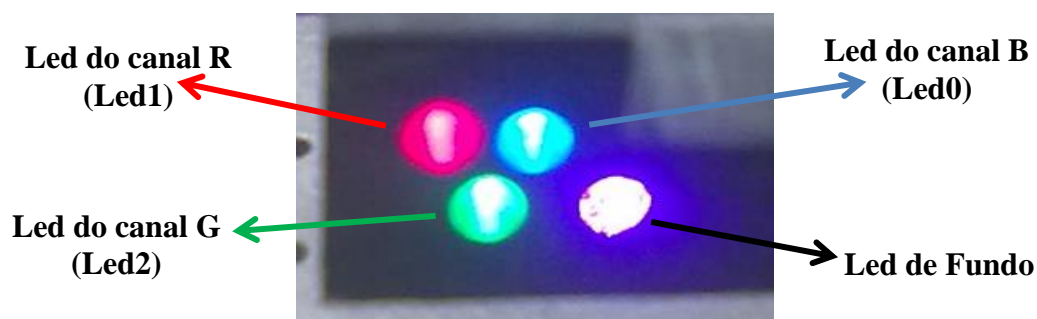


Figura 36 – Distribuição dos LEDs de sinal RGB e do led de fundo frontal.

A placa microcontroladora responsável por gerar as sequências binárias individuais nos três canais e também regular a corrente de polarização é controlada por um interface série de um computador tendo por base a atribuição da cor do LED ao identificador numérico do LED na respectiva

Capítulo 4 - Análise de sinais WDM

aplicação (Figura 37). Na aplicação é também definida a intensidade de corrente a aplicar ao LED, que varia de 1.56mA a 10.92mA, sendo que em todas as simulações efectuadas o valor de corrente de polarização do LED foi sempre fixo em 1.56mA. Este valor de intensidade de corrente corresponde a uma intensidade de potência óptica dos LEDs que é apresentada na Tabela 3.

LED0 Seq= 10101010; Corrente = 1 X 1.56 mA
LED1 Seq= 11110000; Corrente = 1 X 1.56 mA
LED2 Seq= 11001100; Corrente = 1 X 1.56 mA

Figura 37 – Configuração das sequências binárias individuais da placa controladora.

Intensidade de corrente	Potência óptica dos LEDs ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)		
	Azul	Vermelho	Verde
1.56mA	28,3	10,7	13,6
4.68mA	78,8	16,8	30,5
7.8mA	105	22	37,9

Tabela 3 – Potência óptica dos LEDs de sinais em função da intensidade de corrente.

Na definição das sequências binárias individuais dos três canais, foi criada uma sequência denominada de sequência padrão (Tabela 4), onde a frequência de modulação do LED0 (Canal B-Azul) é o dobro da frequência de modulação do LED2 (Canal G-Verde), e este por sua vez tem o dobro da frequência de modulação do LED1 (Canal R-Vermelho), formando uma sequência alternada entre os níveis lógicos “1” e “0” a 8 bits, com um determinado ritmo binário igual para todos os canais. Esta sequência é bastante importante pois permite testar as 8 combinações possíveis existentes utilizando os três canais de dados e assim poder perceber o comportamento da estrutura semicondutora, face ao comportamento individual e combinado dos canais, com e sem radiação luminosa de fundo.

Combinação Decimal		0	1	2	3	4	5	6	7
Combinação Binária	Canal R – Led Vermelho	1	1	1	1	0	0	0	0
	Canal G – Led Verde	1	1	0	0	1	1	0	0
	Canal B – Led Azul	1	0	1	0	1	0	1	0

Tabela 4 – Combinações RGB da sequência de transmissão padrão.

De salientar que todos os gráficos apresentados neste trabalho foram devidamente tratados, de forma a normalizar os valores da fotocorrente, isto é, o sinal a normalizar é decomposto nas suas duas componentes, tempo e amplitude. Na componente temporal, é adicionado o valor mínimo do tempo para que este tenha início no valor 0, enquanto na componente da amplitude soma-se ao sinal o valor mínimo do sinal.

4.1 - Análise de canais individuais

De forma a ser efectuada uma análise dos três canais ópticos de forma individual foi configurado cada LED no valor sempre fixo de corrente de polarização de 1.56mA. Esse valor de corrente de polarização nestes LEDs de alto brilho, correspondem às seguintes intensidades luminosas; $28.3\mu\text{W}/\text{cm}^2$ para o LED de cor azul, $10.7\mu\text{W}/\text{cm}^2$ para o LED de cor vermelha, e de $13.6\mu\text{W}/\text{cm}^2$ para o LED de cor verde.

Foi efectuada também uma análise da fotocorrente gerada pelo dispositivo quando este se encontra sem qualquer tipo de radiação luminosa de fundo e quando está sujeito a uma luz de fundo onde foram efectuadas medições com as cores; violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarelo (580nm) e vermelho (626nm), sendo que cada uma delas tem a sua influência específica sobre os comprimentos de onda incidentes dos canais individuais.

A tensão de polarização aplicada na estrutura semicondutora foi constante e com um valor de -8V, sendo o estudo efectuado com base na utilização da sequência padrão.

4.1.1 - Influência da luz de fundo pelo lado frontal

De forma a analisar a influência da luz de fundo pelo lado frontal, foram estudados dois cenários, fazendo variar a intensidade da luz de fundo do LED DC e fazendo também variar a frequência do sinal incidente.

Assim, foram feitas medições quando o dispositivo se encontra sem iluminação de fundo e quando é colocado um LED de fundo de uma determinada cor polarizado com uma corrente de 1mA e 10mA para uma frequência do sinal incidente de 500bps, 3000bps e 6000bps.

4.1.1.1 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 500bps

Colocando a frequência dos três LEDs que transmitem os canais ópticos nos 500bps foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (escuro).

Capítulo 4 - Análise de sinais WDM

De forma a analisar a influência dos vários fundos, foi feita a separação de cada um dos canais individuais, incidindo individualmente no dispositivo fotodetector apenas o sinal óptico do canal B, o sinal óptico do canal R e o sinal óptico do canal G, variando a cor da luz de fundo do LED DC e a corrente de polarização desse mesmo LED (Figura 38).

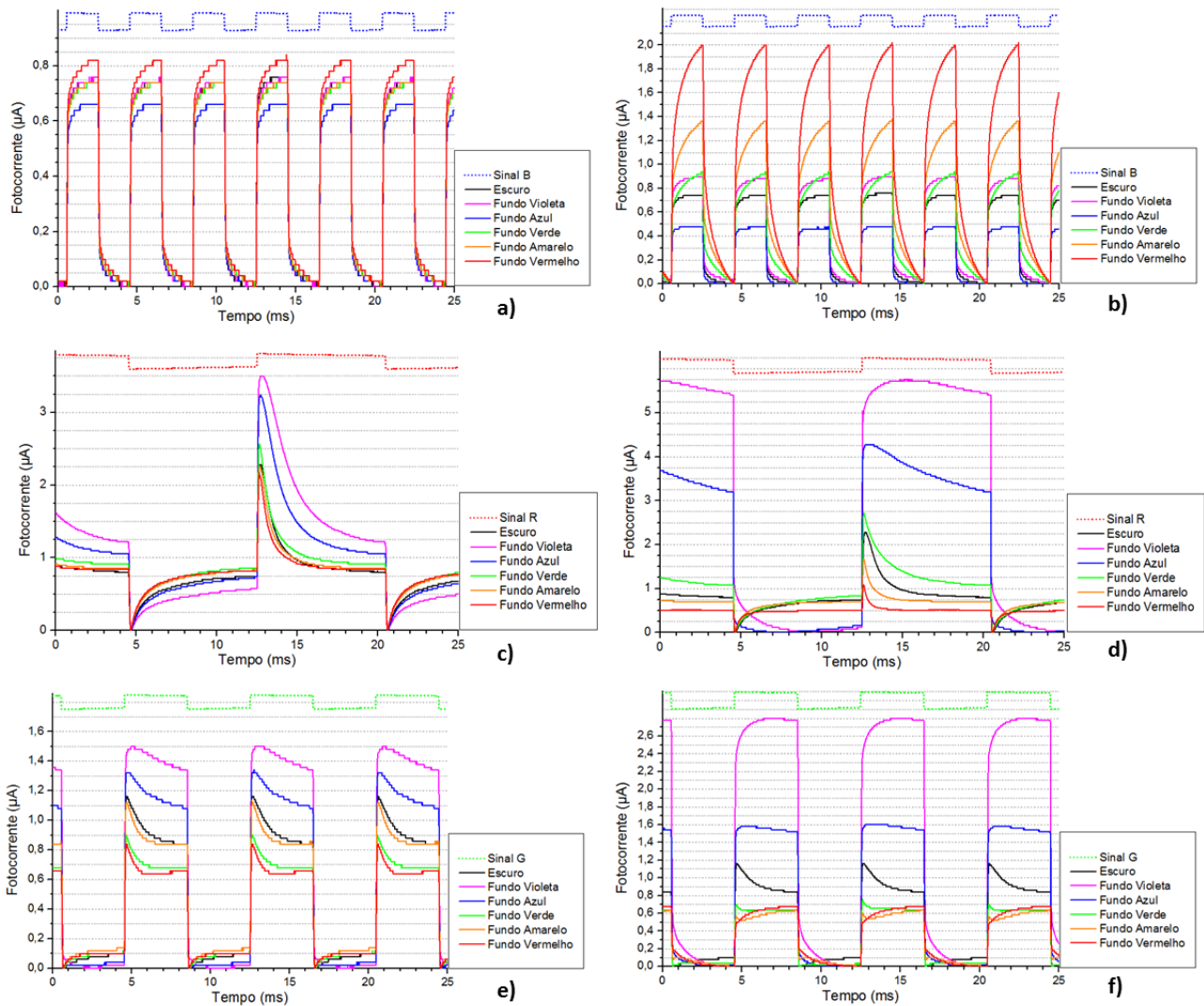


Figura 38 – Fotocorrente do sinal incidente a 500bps com luz de fundo frontal e corrente de polarização:

a) 1mA - canal B, b) 10mA - canal B, c) 1mA - canal R, d) 10mA - canal R, e) 1mA - canal G e f) 10mA - canal G.

Através das medições efectuadas aplicando vários fundos incidentes sobre o sinal do canal B a 500bps é possível verificar que o aumento da corrente de polarização do led de fundo aumenta o sinal de fotocorrente gerada excepto com a aplicação do fundo azul, que faz atenuar o sinal de fotocorrente (Figura 38 a) e b)). É também possível verificar que o fundo verde, amarelo e vermelho apresentam uma grande distorção do sinal gerado face ao impulso do canal incidente. Desta forma o fundo violeta revela-se a melhor opção pois amplifica o valor de fotocorrente sem apresentar distorção do sinal.

Para os canais incidentes R e G a 500bps, os sinais de fotocorrente gerada têm um aumento bastante acentuado face ao aumento da corrente de polarização do led de fundo (Figura 38 c), d), e) e f)) independentemente da respectiva cor. O fundo violeta revela-se a melhor opção pois amplifica o valor de fotocorrente sem apresentar distorções de sinal.

4.1.1.2 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 2000bps

Colocando a frequência dos três LEDs que transmitem os canais ópticos nos 2000bps foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (escuro).

De forma a analisar a influência dos vários fundos, foi feita a separação de cada um dos canais individuais, incidindo individualmente no dispositivo fotodetector apenas o sinal óptico do canal B, o sinal óptico do canal R e o sinal óptico do canal G, variando a cor da luz de fundo do LED DC e a corrente de polarização desse mesmo LED (Figura 39).

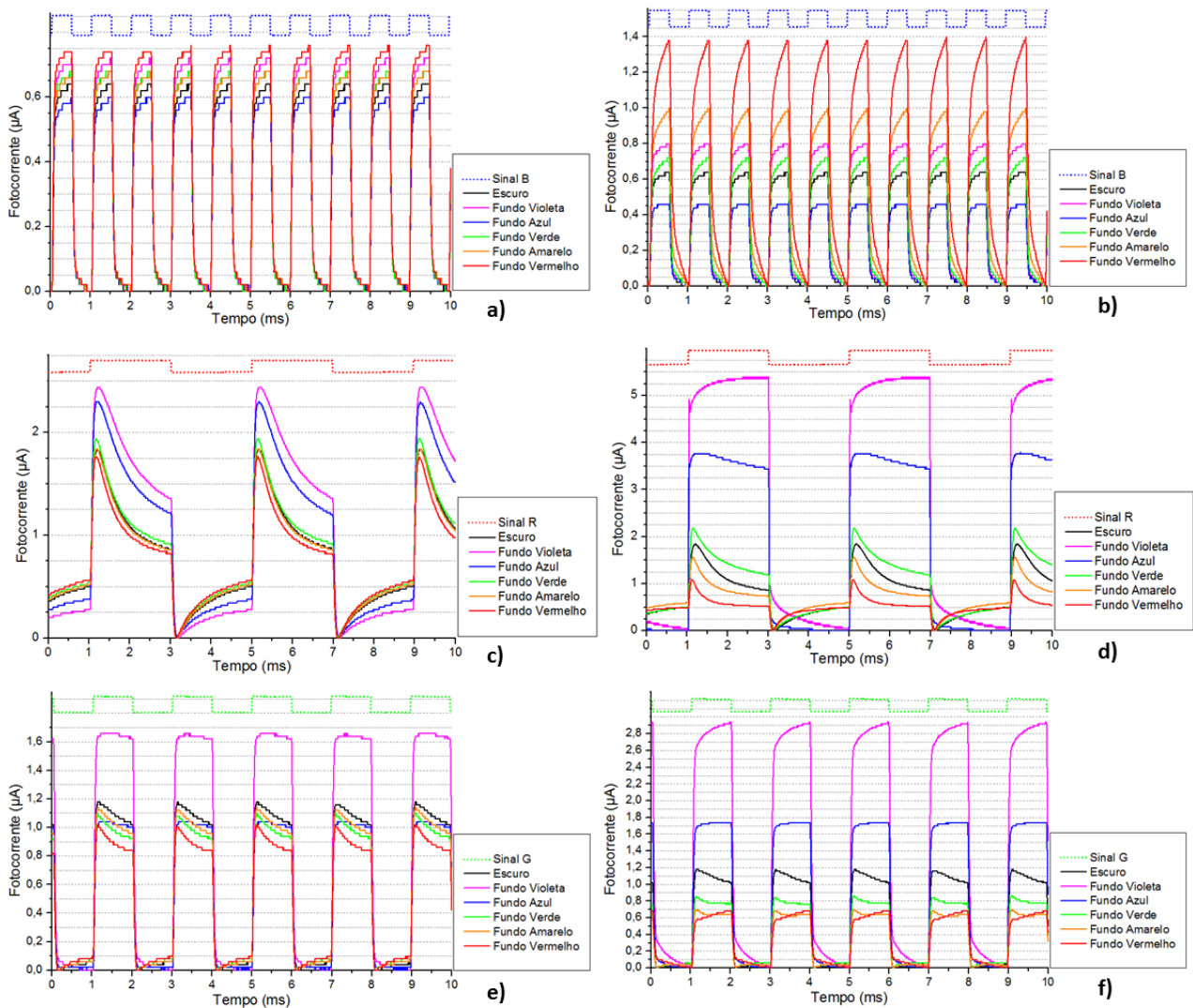


Figura 39 – Fotocorrente do sinal incidente a 2000bps com luz de fundo frontal e corrente de polarização:
 a) 1mA - canal B, b) 10mA - canal B, c) 1mA - canal R, d) 10mA - canal R, e) 1mA - canal G e f) 10mA - canal G.

Por análise dos fundos incidentes sobre o sinal do canal B a 2000bps é possível verificar que o aumento da corrente de polarização do led de fundo aumenta o sinal de fotocorrente gerada, no entanto é possível verificar que os fundos amarelo e vermelho apresentam uma grande distorção do sinal face ao impulso do canal. Desta forma, o fundo violeta revela-se a melhor opção pois amplifica o valor de fotocorrente sem apresentar distorção do sinal (Figura 39 a) e b)).

Nos fundos incidentes sobre o sinal do canal R e G a 2000bps é possível verificar que o aumento da corrente de polarização do led de fundo aumenta fortemente o sinal de fotocorrente gerada, sendo bastante notório na Figura 39 c), d), e) e f). O fundo violeta revela-se a melhor opção pois amplifica o valor de fotocorrente sem apresentar distorção do sinal.

4.1.1.3 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 6000bps

Colocando a frequência dos três LEDs que transmitem os canais ópticos nos 6000bps foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (escuro).

De forma a analisar a influência dos vários fundos, foi feita a separação de cada um dos canais individuais, incidindo individualmente no dispositivo fotodetector apenas o sinal óptico do canal B, o sinal óptico do canal R e o sinal óptico do canal G, variando a cor da luz de fundo do LED DC e a corrente de polarização desse mesmo LED (Figura 40).

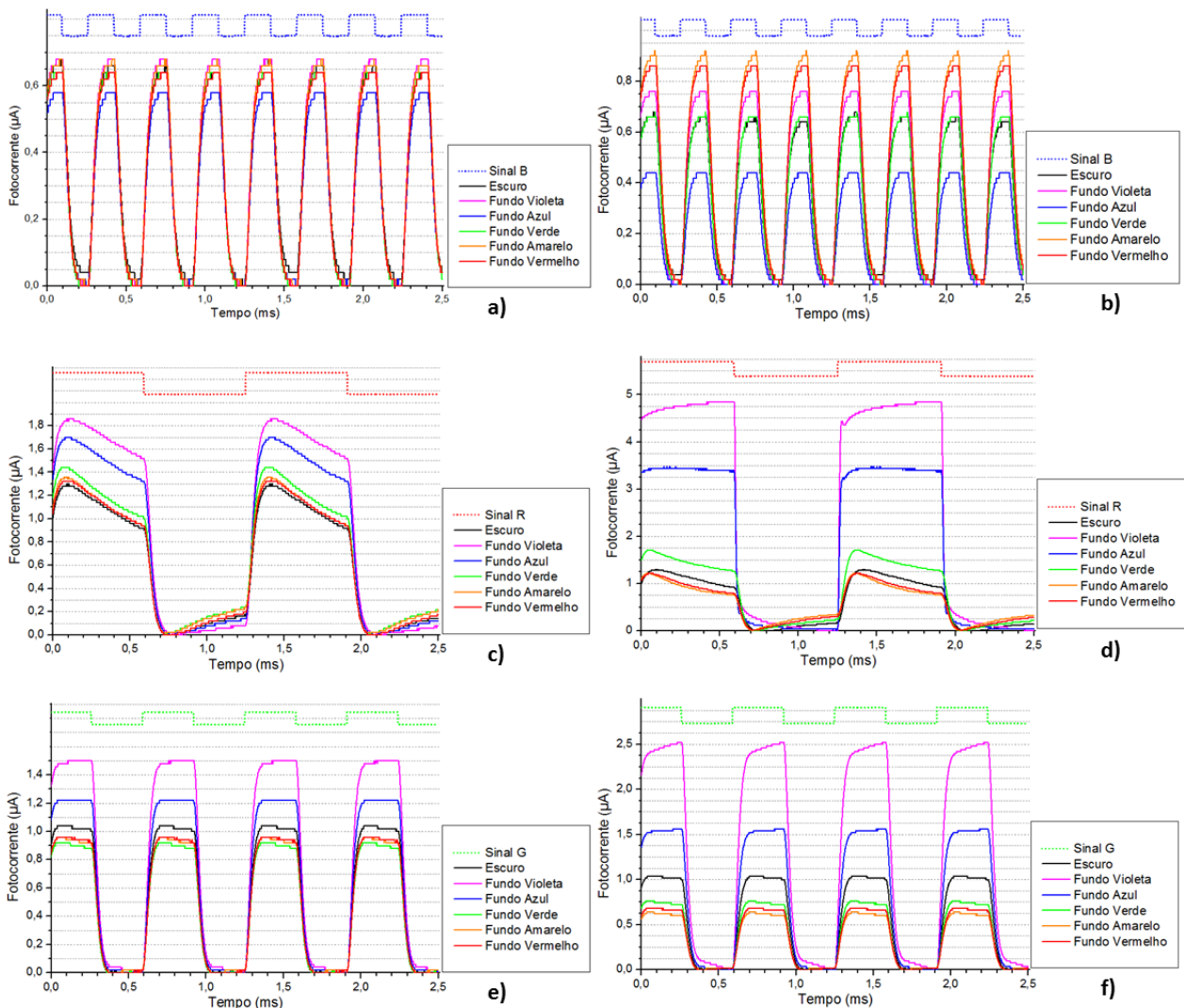


Figura 40 – Fotocorrente do sinal incidente a 6000bps com luz de fundo frontal e corrente de polarização:

a) 1mA - canal B, b) 10mA - canal B, c) 1mA - canal R, d) 10mA - canal R, e) 1mA - canal G e f) 10mA - canal G.

Analisando as medições efectuadas com a aplicação dos fundos incidentes sobre o sinal do canal B a 6000bps é possível verificar que o aumento da corrente de polarização do led de fundo aumenta o sinal de fotocorrente gerada, no entanto na Figura 40 a) e b) é possível verificar que o fundo amarelo apresenta uma grande distorção do sinal face ao impulso do canal. Desta forma o fundo violeta revela-se a melhor opção pois amplifica o valor de fotocorrente sem apresentar distorção do sinal.

Os sinais de fotocorrente gerada pelos canais R e G a 6000bps aumentam fortemente com o aumento da corrente de polarização do led de fundo, sendo bastante notório na Figura 40 c), d), e) e f). O fundo violeta revela-se a melhor opção pois amplifica o valor de fotocorrente sem apresentar distorção do sinal.

Desta forma é possível verificar que o fundo violeta com uma corrente de polarização de 10mA a incidir pelo lado frontal da estrutura semicondutora é a melhor opção de fundo, pois aumenta fortemente a fotocorrente gerada pelos sinais dos canais R e G, enquanto no canal B o resultado é bastante semelhante ao valor de fotocorrente no escuro, ou seja, o canal B revela-se pouco sensível à influência da radiação do fundo violeta.

4.1.2 - Influência da luz de fundo pelo lado posterior

De forma a analisar a influência da luz de fundo pelo lado posterior, foram estudados dois cenários, fazendo variar a intensidade da luz de fundo do LED DC e fazendo também variar a frequência do sinal incidente.

Assim, foram feitas medições quando o dispositivo se encontra sem iluminação de fundo e quando é colocado um LED de fundo de uma determinada cor polarizado com uma corrente de 1mA e 10mA para uma frequência do sinal incidente de 500bps, 3000bps e 6000bps.

4.1.2.1 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 500bps

Colocando a frequência dos três LEDs que transmitem os canais ópticos nos 500bps foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (escuro).

De forma a analisar a influência dos vários fundos, foi feita a separação de cada um dos canais individuais, incidindo individualmente no dispositivo fotodetector apenas o sinal óptico do canal B, o sinal óptico do canal R e o sinal óptico do canal G, variando a cor da luz de fundo do LED DC e a corrente de polarização desse mesmo LED (Figura 41).

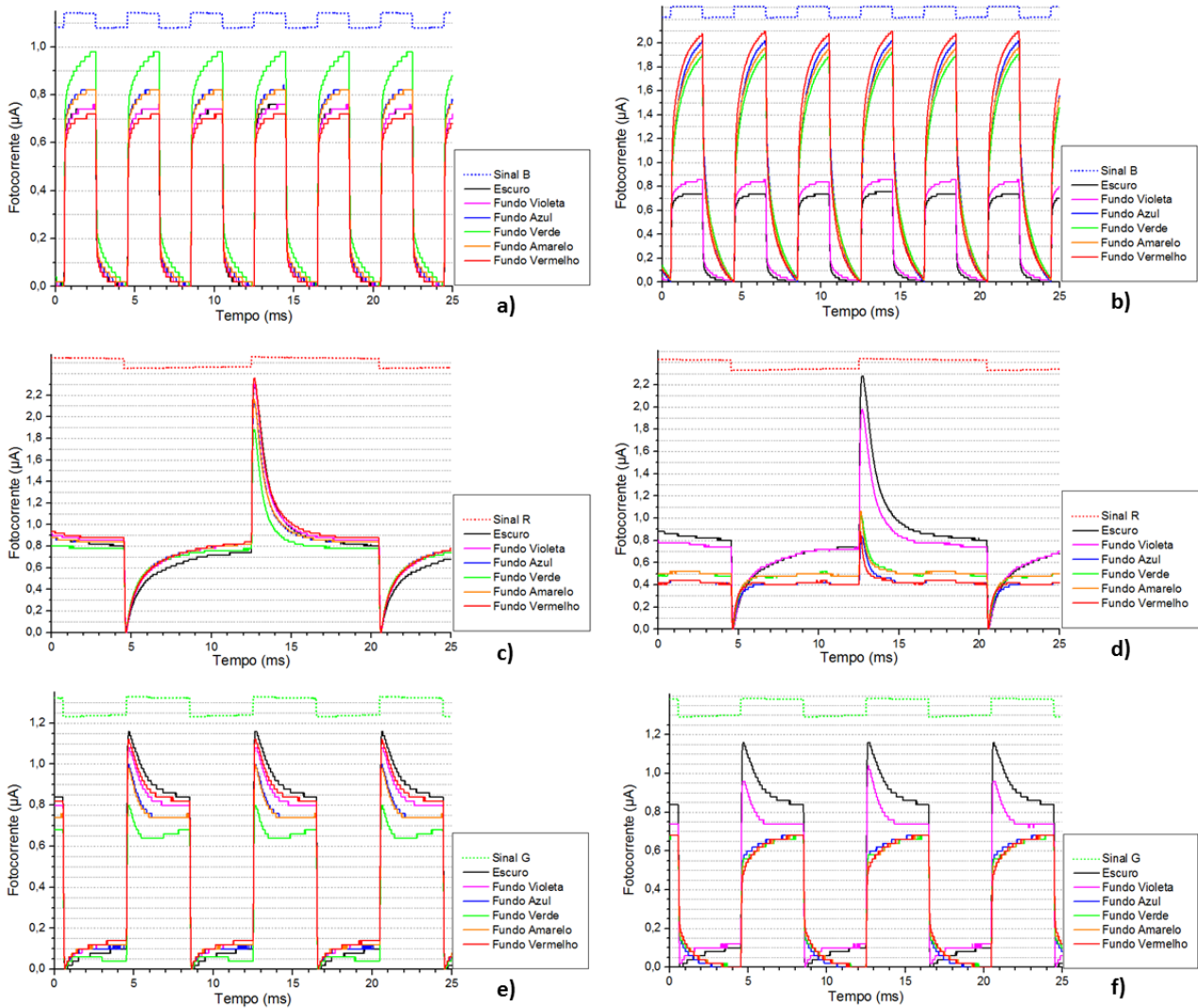


Figura 41 – Fotocorrente do sinal incidente a 500bps com luz de fundo posterior e corrente de polarização:
a) 1mA - canal B, b) 10mA - canal B, c) 1mA - canal R, d) 10mA - canal R, e) 1mA - canal G e f) 10mA - canal G.

Através das medições efectuadas aplicando vários fundos incidentes sobre o sinal do canal B a 500bps é possível verificar que o aumento da corrente de polarização do led de fundo aumenta o sinal de fotocorrente gerada. Na Figura 41 a) e b) é possível verificar dois patamares de nível de sinal, um que corresponde aos fundos azul, verde, amarelo e vermelho e onde é visível uma grande amplificação do sinal de fotocorrente gerada face ao valor medido no escuro e no outro patamar está o resultado da fotocorrente gerada com a aplicação do fundo violeta que é bastante próximo do valor medido no escuro.

Para os canais incidentes R e G a 500bps, os sinais de fotocorrente gerada têm uma atenuação face ao aumento da corrente de polarização do led de fundo (Figura 41 c), d) e) e f)). O fundo azul revela-se a melhor opção pois apesar de atenuar o sinal de fotocorrente gerada, apresenta uma menor distorção de sinal.

4.1.2.2 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 2000bps

Colocando a frequência dos três LEDs que transmitem os canais ópticos nos 2000bps foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (escuro).

De forma a analisar a influência dos vários fundos, foi feita a separação de cada um dos canais individuais, incidindo individualmente no dispositivo fotodetector apenas o sinal óptico do canal B, o sinal óptico do canal R e o sinal óptico do canal G, variando a cor da luz de fundo do LED DC e a corrente de polarização desse mesmo LED (Figura 42).

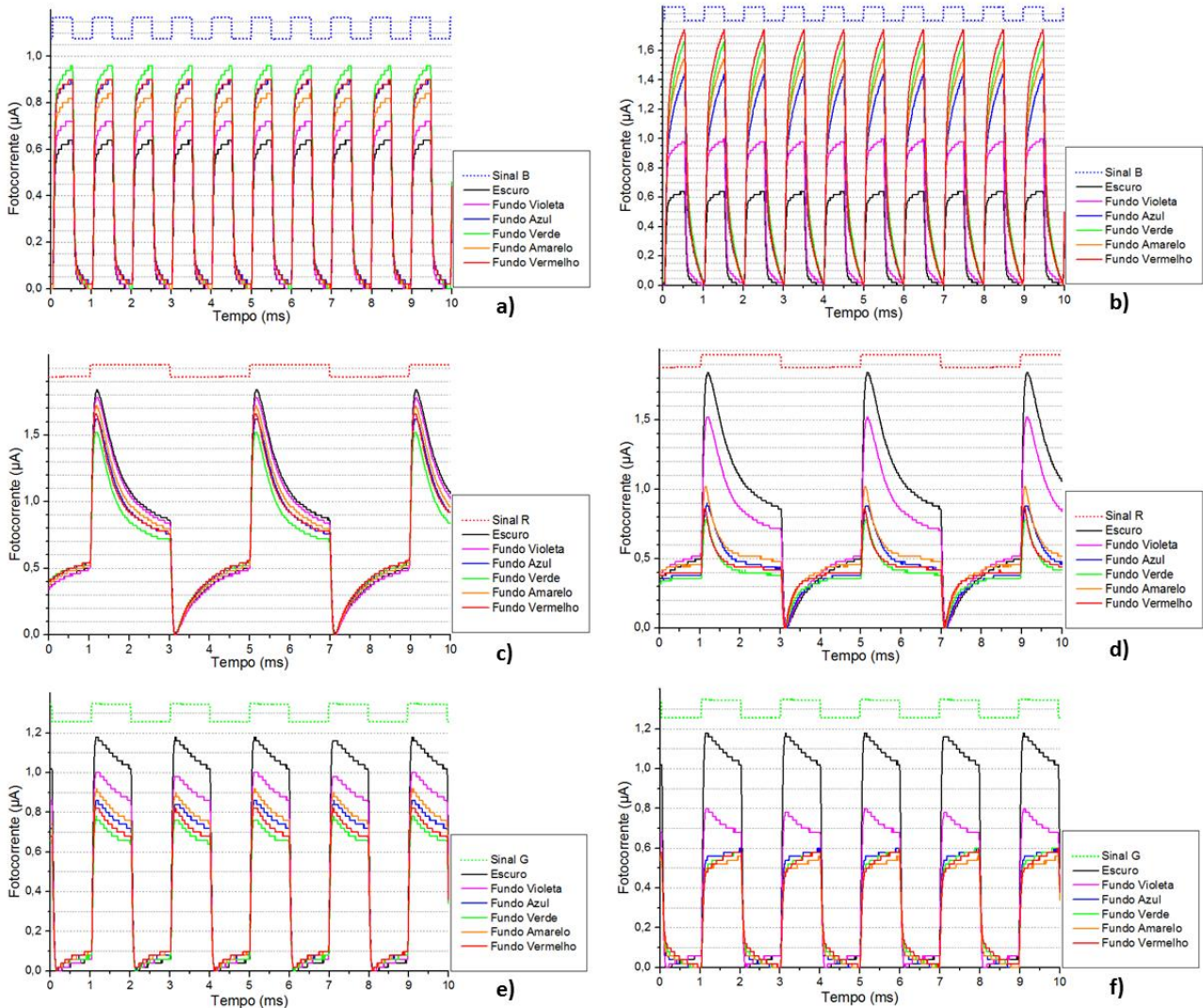


Figura 42 – Fotocorrente do sinal incidente a 2000bps com luz de fundo posterior e corrente de polarização:
a) 1mA - canal B, b) 10mA - canal B, c) 1mA - canal R, d) 10mA - canal R, e) 1mA - canal G e f) 10mA - canal G.

Por análise dos fundos incidentes sobre o sinal do canal B a 2000bps é possível verificar que o aumento da corrente de polarização do led de fundo aumenta ligeiramente o sinal de fotocorrente gerada, no entanto na Figura 42 a) e b) é possível verificar que apenas o fundo violeta não apresenta distorção face ao impulso do canal, apesar do fundo azul ter um bom comportamento também.

Nos fundos incidentes sobre o sinal do canal R e G a 2000bps é possível verificar que o aumento da corrente de polarização do led de fundo produz uma atenuação ligeira do sinal de fotocorrente gerada (Figura 42 c), d), e) e f)). No canal R o resultado é semelhante ao comportamento de um condensador a carregar e descarregar, não apresentando uma onda quadrada perfeita. Dado que o objectivo da iluminação posterior é a de minimizar o efeito dos canais R e G, a cor azul é aquela que produz uma boa atenuação destes sinais sem distorcer o sinal gerado.

4.1.2.3 - Variação da intensidade da luz de fundo - Sinal de 6000bps

Colocando a frequência dos três LEDs que transmitem os canais ópticos nos 6000bps foi analisada a influência da luz de fundo dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm) variando a sua respectiva intensidade através da variação da corrente de polarização. Os resultados obtidos são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (escuro).

De forma a analisar a influência dos vários fundos, foi feita a separação de cada um dos canais individuais, incidindo individualmente no dispositivo fotodetector apenas o sinal óptico do canal B, o sinal óptico do canal R e o sinal óptico do canal G, variando a cor da luz de fundo do LED DC e a corrente de polarização desse mesmo LED (Figura 43).

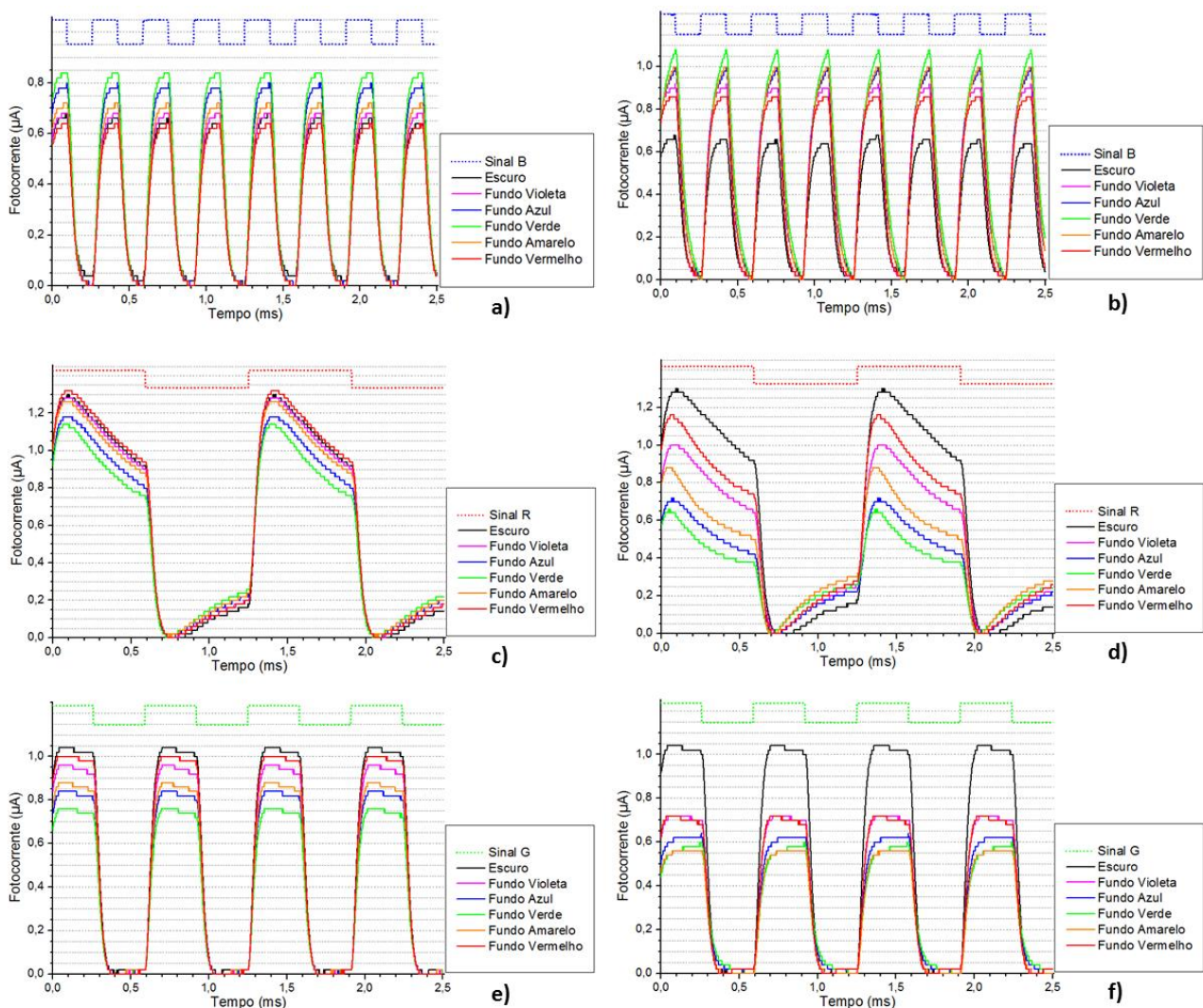


Figura 43 – Fotocorrente do sinal incidente a 6000bps com luz de fundo posterior e corrente de polarização:

a) 1mA - canal B, b) 10mA - canal B, c) 1mA - canal R, d) 10mA - canal R, e) 1mA - canal G e f) 10mA - canal G.

Analisando as medições efectuadas com a aplicação dos fundos incidentes sobre o sinal do canal B a 6000bps pelo lado posterior é possível verificar que o aumento da corrente de polarização do led de fundo aumenta ligeiramente o sinal de fotocorrente gerada, e efectua uma ligeira distorção do sinal (Figura 43 a) e b)). O fundo azul apresenta o melhor rácio entre valor de fotocorrente e distorção do sinal.

Os sinais de fotocorrente gerada pelos canais R e G a 6000bps diminuem ligeiramente com o aumento da corrente de polarização do led de fundo, sendo bastante notório na Figura 43 c), d), e) e f). Dado que se pretende diferenciar os canais R e G, o fundo azul revela-se a melhor opção, pois tem o melhor rácio entre valor de fotocorrente e distorção do sinal.

Com os resultados obtidos anteriormente é possível verificar que o fundo azul com uma corrente de polarização de 10mA a incidir pelo lado posterior da estrutura semicondutora é a melhor opção de fundo, pois aumenta ligeiramente a fotocorrente gerada pelo sinal do canal B, enquanto o resultado obtido no canal R e G é ligeiramente inferior ao valor de fotocorrente no escuro. Esta particularidade permite distinguir os canais R e G, do canal B, dado que é aquele que tem melhor desempenho com a aplicação do fundo azul pelo lado posterior da estrutura.

4.2 - Análise de canais combinados

Nas mesmas condições em que foi efectuada uma análise anterior sobre os canais individuais, foi também efectuada uma análise dos três canais ópticos de forma combinada. Esta análise incidiu na medição da fotocorrente gerada pelo dispositivo quando este se encontra sem qualquer tipo de radiação luminosa de fundo e quando está sujeito a uma luz de fundo onde foram efectuadas medições com as cores; violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarelo (580nm) e vermelho (626nm), sendo que cada uma delas tem a sua influência específica sobre os comprimentos de onda incidentes dos canais combinados.

A tensão de polarização aplicada na estrutura semicondutora foi constante e com um valor de -8V, sendo o estudo efectuado com base na utilização da sequência padrão.

De forma a analisar a influência de luz de fundo pelo lado frontal e posterior, foram estudados dois cenários, fazendo variar a intensidade da luz de fundo do LED DC e fazendo também variar a frequência do sinal incidente.

Assim, foram feitas medições quando o dispositivo se encontra sem iluminação de fundo e quando é colocado um LED de fundo de uma determinada cor polarizado com uma corrente de

1mA e 10mA para uma frequência do sinal incidente de 500bps, 3000bps e 6000bps.

4.2.1 - Influência da luz de fundo pelo lado frontal

De forma a analisar a influência dos vários fundos na configuração de canais combinados para cada umas das três frequências (500bps, 2000bps e 6000bps), incidiu no dispositivo fotodetec- tor o sinal óptico dos canais RGB e foi variada a cor da luz de fundo do LED DC e a intensidade de luz desse mesmo LED. Essa variação foi conseguida através da variação da corrente de polarização (1mA e 10mA) dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm). Os resultados obtidos são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (escuro) (Figura 44).

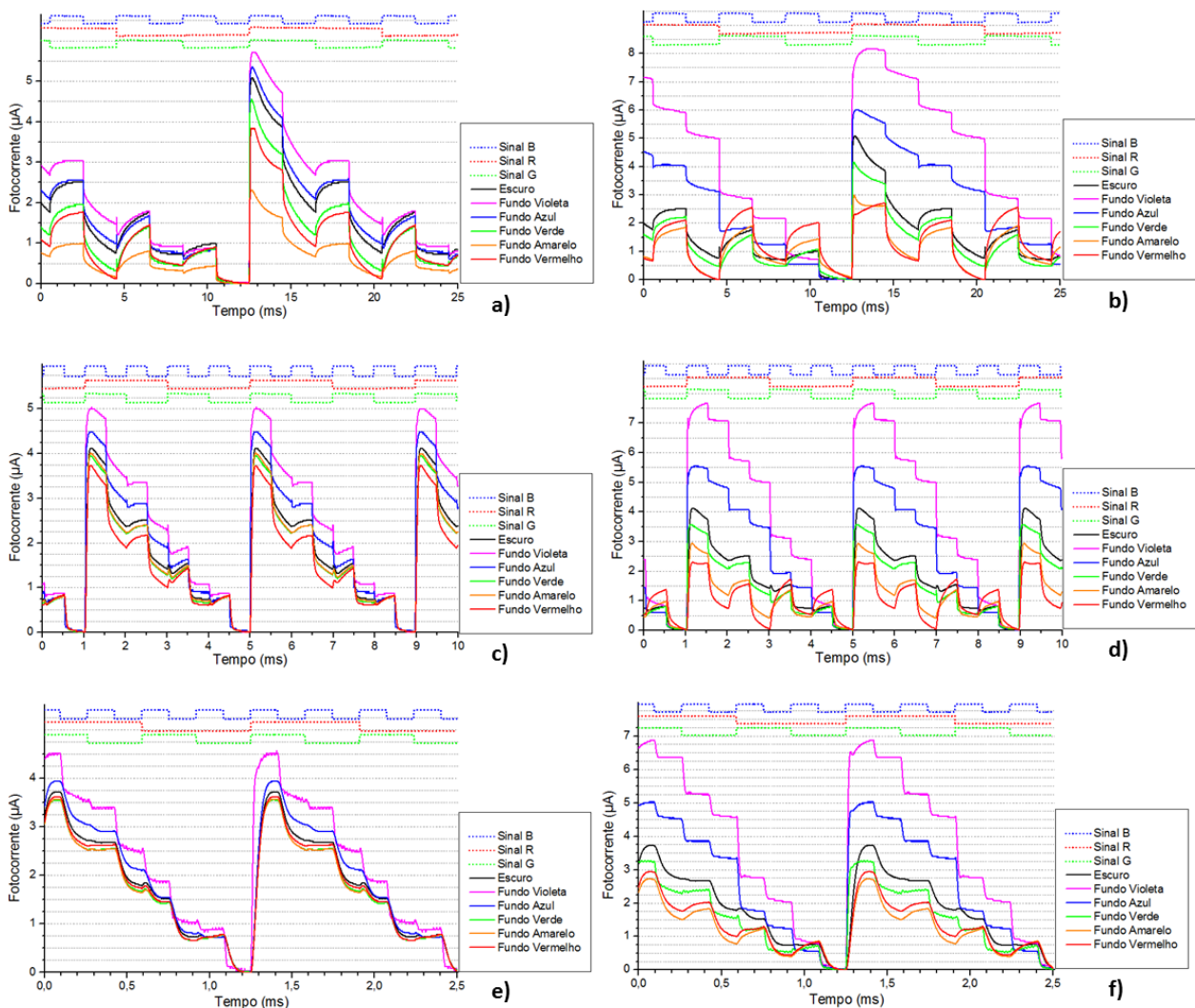


Figura 44 – Fotocorrente dos canais RGB incidentes com luz de fundo frontal e corrente de polarização:

a) 1mA – 500bps, b) 10mA - 500bps, c) 1mA - 2000bps, d) 10mA - 2000bps, e) 1mA - 6000bps e f) 10mA - 6000bps.

A análise de canais combinados utilizando a sequência padrão permite chegar às mesmas conclusões obtidas na análise individual de canais com a aplicação de fundo pelo lado frontal, onde o fundo violeta se revela a melhor opção pois permite mais facilmente distinguir os patamares dos canais R e G. Esses patamares são mais definidos com o aumento da corrente de polarização dos fundos, sendo que quanto menor o bit-rate mais definidos são esses patamares e com maior valor de fotocorrente gerada.

4.2.2 - Influência da luz de fundo pelo lado posterior

De forma a analisar a influência dos vários fundos na configuração de canais combinados para cada uma das três frequências (500bps, 2000bps e 6000bps), incidiu no dispositivo fotodetector o sinal óptico dos canais RGB e foi variada a cor da luz de fundo do LED DC e a intensidade de luz desse mesmo LED. Essa variação foi conseguida através da variação da corrente de polarização (1mA e 10mA) dos LEDs de cor violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarela (580nm) e vermelha (626nm). Os resultados obtidos são apresentados tendo sempre por base de comparação o valor da fotocorrente gerada quando o dispositivo não está sujeito a nenhuma iluminação de fundo (escuro) (Figura 45).

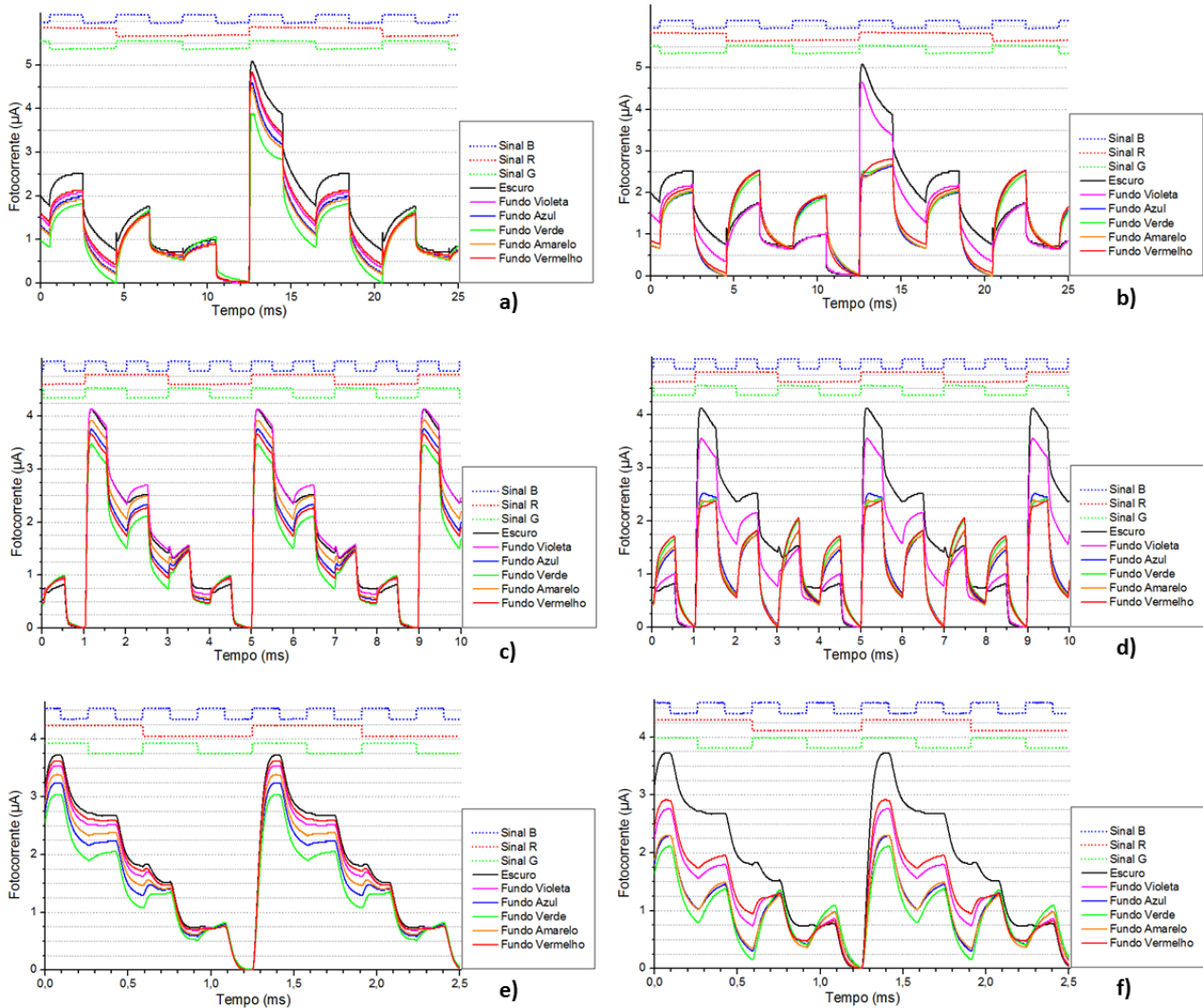


Figura 45 – Fotocorrente dos canais RGB incidentes com luz de fundo posterior e corrente de polarização:

a) 1mA – 500bps, b) 10mA - 500bps, c) 1mA - 2000bps, d) 10mA - 2000bps, e) 1mA - 6000bps e f) 10mA - 6000bps.

Analisando a influência da aplicação dos fundos pelo lado posterior da estrutura para os canais combinados utilizando a sequência padrão é possível chegar às mesmas conclusões obtidas na análise individual de canais com a aplicação de fundo pelo lado posterior, onde o fundo azul se revela a melhor opção pois permite mais facilmente distinguir a presença do canal B dos canais R e G. Esses patamares são mais definidos com o aumento da corrente de polarização dos fundos, sendo que quanto menor o bit-rate mais definidos são esses patamares e com maior valor de fotocorrente gerada.

4.3 - Análise de sinais com fibra POF

De forma a complementar a análise de sinais WDM no dispositivo semiconductor e explorar a utilização das fibras POF, foi criado um protótipo com um LED RGB de alto brilho de dimensões

reduzidas (5mm), sendo concebido um método de acoplamento desse LED ao conector da fibra POF.

Assim, foi utilizada uma fibra óptica de plástico que foi gentilmente cedida pela marca *Optral* com as características descritas na Tabela 5.

General Parameters	Values
Core Material	Polymethyl Methacrylate
Cladding Material	Fluorinated Polymer
Index Profile	Step Index
Diameter	1.0 mm
Attenuation (650 nm)	≤ 0.20 dB / m
Numerical Aperture	0.50
Bending Radius	> 20 mm
Temperature Range	-40 °C - +70 °C

Tabela 5 – Características da fibra POF utilizada.

Foi também utilizado um conector do tipo F-05 otimizado para aplicações que utilizam fibras ópticas de plástico com um diâmetro de núcleo de 1mm que permite um fácil e rápido acoplamento e oferece um bom desempenho óptico e mecânico, que foi gentilmente cedida pela marca *Ratioplast-Optoelectronics* (Figura 46).



Figura 46 – Conector F-05 acoplado a uma fibra POF.

O LED RGB de 5mm de alto brilho (Figura 47) utiliza uma configuração de ânodo comum com as características da Tabela 6.



Figura 47 – LED RGB de alto brilho.

Characteristics ($T_a=25^\circ\text{C}$, $I_R=I_G=I_B=20\text{mA}$)

Emitting Color	Wavelength (nm)	Lens Type	Forward Voltage (V)	Luminous Flux (lm)	Luminous Intensity (mcd)	Viewing Angle ($^\circ$)
Red	620 - 630	Water Clear	1.8 – 2.4	1.5 – 2.5	800 - 1000	95 ± 5
Green	515 - 525		3.0 – 3.6	3.0 – 4.0	1500 - 2000	75 ± 5
Blue	460 - 470		2.8 – 3.4	1.0 – 1.5	650 - 850	65 ± 5

Tabela 6 – Características do LED RGB utilizado.

De uma forma artesanal foi concebida uma placa de circuito impresso onde foi soldado o LED RGB de alto brilho com os respectivos conectores de ligação. Nessa placa de circuito impresso e de forma a acoplar o LED RGB ao conector POF foi utilizada uma união *Toslink* (Figura 48).

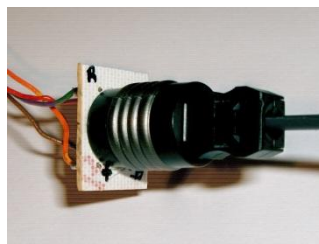


Figura 48 – LED RGB acoplado à fibra POF.

O resultado final desta montagem é apresentado na Figura 49, onde o conector terminal com a luz incidente do LED RGB acoplado à fibra POF é colocado sobre a estrutura semicondutora de forma a ser medida a fotocorrente gerada.



Figura 49 – Conector POF a incidir sobre a estrutura semicondutora.

De forma a analisar a transmissão dos sinais sobre as fibras POF, foi feita uma primeira análise dos canais individuais e também uma análise dos três canais ópticos de forma combinada. A tensão de polarização aplicada na estrutura semicondutora foi constante e com um valor de -8V , sendo o estudo efectuado com base na utilização da sequência padrão.

Para simular a transmissão dos sinais, o LED RGB foi ligado à placa microcontroladora e a frequência do sinal incidente foi colocada nos 6000bps. A corrente de polarização do LED RGB foi definida para os 10.92mA de forma a ser obtido o máximo desempenho do LED, sendo notório no entanto que a intensidade luminosa do mesmo é bastante inferior à dos LEDs utilizados na análise de sinais anterior (4.1 e 4.2).

Foram também efectuadas medições com o fundo violeta a incidir no lado frontal da estrutura e o fundo azul a incidir pelo lado posterior, ambos com uma corrente de polarização de 10mA. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 50.

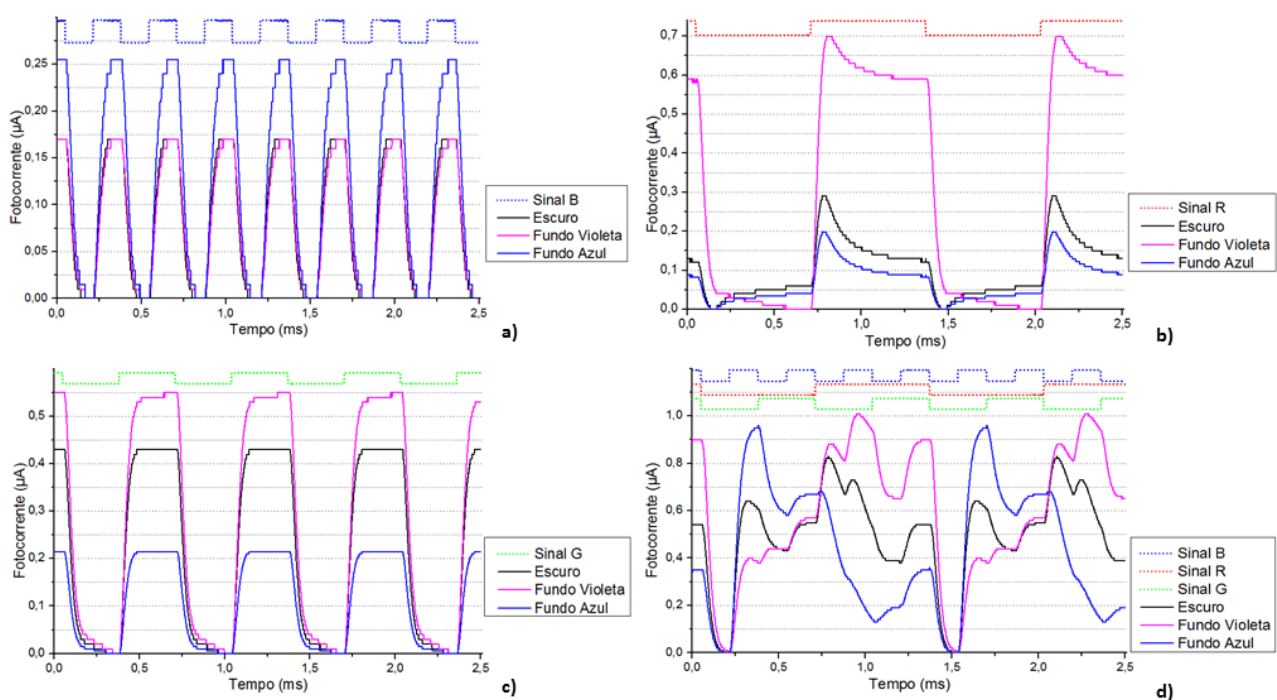


Figura 50 – Fotocorrente medida com a fibra POF:
a) Canal B, b) Canal R, c) Canal G e d) Canais RGB.

Pela análise da Figura 50, é possível verificar que o sinal de fotocorrente gerada pelo dispositivo semiconductor é bastante inferior face aos valores de fotocorrente medida na análise de sinais efectuada em 4.1 e 4.2. Este facto deve-se a que o LED RGB utilizado não é totalmente idêntico ao LED usado anteriormente, bem como ao acoplamento feito para ligar o LED ao conector de fibra POF, que terá também algumas perdas de luz.

No entanto, um outro factor que também contribuiu para um valor baixo de fotocorrente gerada é referente à área de incidência da luz no dispositivo semiconductor. Conforme a Figura 49 é notório um pequeno ponto de luz a incidir sobre a superfície do dispositivo semiconductor, em lugar

de um grande foco luminoso que incidia sobre uma maior área do dispositivo nas medições efectuadas em 4.1 e 4.2.

Apesar dos valores de fotocorrente medidos com a utilização da fibra POF serem bastante inferiores, o comportamento da estrutura semicondutora para os canais individuais é idêntico ao da análise de sinais efectuada anteriormente (4.1). Esse facto é visível sobretudo na Figura 50 a), b) e c), em que com o fundo violeta a incidir pelo lado frontal da estrutura, o sinal azul praticamente não se altera face ao valor medido no escuro, mas os sinais vermelho e verde têm um aumento na fotocorrente gerada, sendo sobretudo notório no sinal do canal vermelho.

Com a aplicação do fundo azul pelo lado posterior da estrutura, o sinal do canal azul é amplificado, enquanto os canais vermelho e verde têm uma ligeira atenuação do sinal, sendo mais notório no sinal do canal verde.

Na análise combinada dos sinais (Figura 50 d)), os resultados são ligeiramente diferentes dos medidos anteriormente (4.2), em que com a luz de fundo violeta a incidir pelo lado frontal, a fotocorrente máxima gerada não é obtida quando os três sinais estão no nível lógico “1” ao mesmo tempo. Com o fundo azul a incidir pelo lado posterior da estrutura é notória a influência do sinal do canal azul, apesar de existirem algumas variações.

O facto de estes resultados serem ligeiramente diferentes poderá ser devido às intensidades luminosas dos canais ficarem ligeiramente sobrepostas, dado que os três canais de dados estão agora acoplados numa fibra óptica de plástico, num mesmo núcleo de 1mm de espessura. Outra razão poderá também ser devido ao baixo valor de fotocorrente gerada e de um possível ruído que afecte o sinal resultante.

Capítulo 5 - Descodificação com Matlab

Após a análise dos sinais incidentes sobre o dispositivo semiconductor aplicando as diversas combinações de fundos e de intensidades de corrente é necessário proceder à sua descodificação de forma a poder recuperar a sequência de transmissão.

Na análise efectuada no Capítulo 4 apenas é visível a utilização da sequência padrão (Tabela 4) nos vários resultados apresentados, no entanto, para a criação do algoritmo desta aplicação gráfica foram testadas outras sequências de sinais de dados RGB aleatórias, mas com a obrigatoriedade de que exista uma combinação onde os canais combinados estejam todos em simultâneo no escuro (nível lógico “0”) de forma a poder definir esse valor, como o patamar mínimo de fotocorrente gerada.

5.1 - Desenvolvimento do algoritmo

Para o processo de descodificação do sinal era pretendido implementar uma aplicação informática na linguagem de programação *Matlab*, dado ser uma linguagem de engenharia e com grande potencial para a execução de cálculos científicos e que permite ainda a sua utilização em diferentes sistemas operativos.

A aplicação desenvolvida permite que com base nos valores de fotocorrente gerada pelo dispositivo semiconductor, seja possível recuperar a sequência de sinal transmitida por cada um dos três canais RGB. Os valores de fotocorrente gerada foram medidos sob a influência da luz de fundo violeta quando esta é aplicada pelo lado frontal (Vpin1) e também quando é aplicada uma luz de fundo de cor azul pelo lado posterior (Vpin2).

Conhecidas as características do dispositivo semiconductor, tendo por base a caracterização optoelectrónica efectuada no Capítulo 3, foi necessário ter em conta alguns aspectos para a caracterização dos patamares de fotocorrente gerada pelo dispositivo, nomeadamente a normalização dos dados, o cálculo da duração do bit de dados e o tempo de início de cada bit, para que os resultados obtidos permitissem obter o sinal transmitido por cada um dos três canais RGB.

5.1.1 - Normalização dos dados

Os resultados da medição experimental da fotocorrente gerada pelo dispositivo semiconductor sob a influência da luz de fundo foram obtidos com recurso a um osciloscópio digital de 4 canais

da marca *Tektronix* e transferidos para o computador através do *software OpenChoice* (Figura 51).

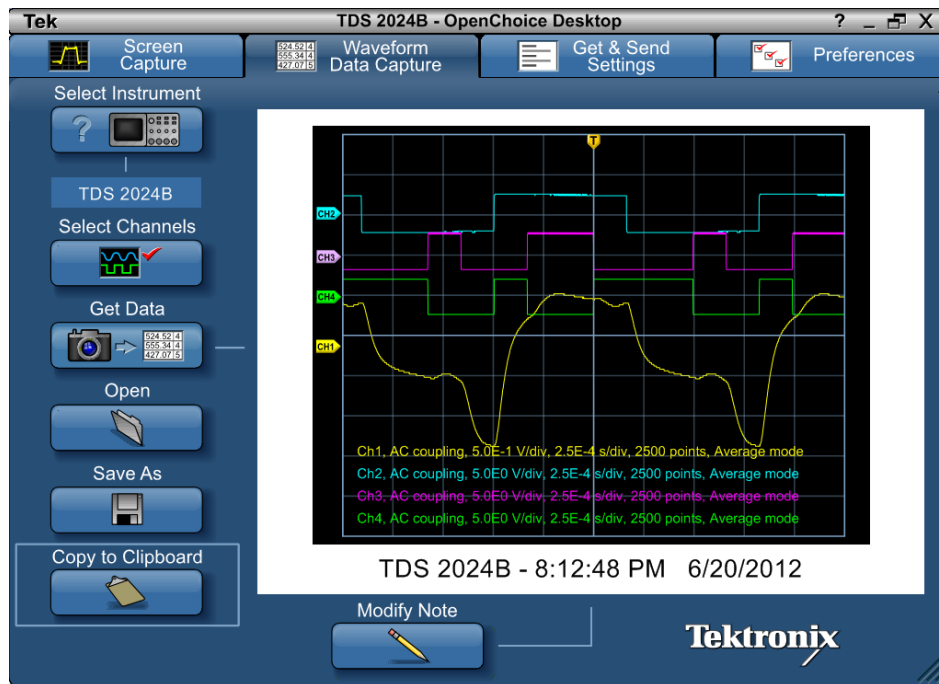


Figura 51 – Resultado gráfico da medição experimental obtido com o *software OpenChoice*.

Esses mesmos resultados obtidos foram tratados utilizando uma folha de dados *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 temporal, é adicionado o valor mínimo do tempo para que este tenha início no valor 0, enquanto na componente da amplitude soma-se ao sinal o valor mínimo do sinal e este é por sua vez dividido pelo valor máximo de V_{pin1} .

5.1.2 - Cálculo da duração do bit

Dado que o objectivo deste processo de descodificação pretende maximizar a taxa de transferência de dados, e tendo em conta as limitações do dispositivo semiconductor, o algoritmo definido tem em consideração o valor de *bit-rate* de 6000bps.

O processo de cálculo começa por saber quantas amostras são necessárias para ser obtido apenas 1 bit. Considerando que o bit-rate utilizado é de 6000bps, é possível calcular a duração de 1 bit, através da seguinte expressão:

$$\text{Tempo de bit} = \frac{1 \text{ bit}}{\text{bit - rate}} = \frac{1}{6000} \approx 166,7\mu\text{s}$$

De forma a ser obtido o tempo máximo de amostragem em que as 2500 amostras foram obtidas é necessário efectuar o seguinte cálculo:

$$\text{Tempo de amostragem} = n^{\circ} \text{ amostras} \times \text{intervalo de amostragem} = 2500 \times 1^{-6} = 2,5\text{ms}$$

Considerando que 1 bit tem a duração de $166,7\mu\text{s}$, pode então ser calculado o número de amostras necessárias por cada bit de dados da seguinte forma:

$$N^{\circ} \text{ de amostras/bit} = \frac{n^{\circ} \text{ amostras} \times \text{tempo de bit}}{\text{tempo de amostragem}} = \frac{2500 \times 166,7\mu}{2,5\text{m}} = 166,7$$

Obtém-se o resultado de que cada bit de dados é constituído por 167 amostras de sinal, resultando então que um período de sinal, constituído por 8 bits (1byte) contém o seguinte número de amostras:

$$N^{\circ} \text{ de amostras de 1 byte} = n^{\circ} \text{ amostras/bit} \times \text{número de bits} = 167 \times 8 = 1336$$

5.1.3 - Início do bit

Pela análise do cálculo da duração do bit, concluímos que das 2500 amostras obtidas, apenas teremos de considerar 1336 para a transmissão da uma sequência de 1 byte, e apenas 167 amostras para apenas 1 bit de informação. Desta forma as restantes amostras iniciais obtidas estarão algures entre o início e o fim desta sequência de transmissão, o que implica que o primeiro bit da sequência não corresponda precisamente à primeira amostra obtida (Figura 52).

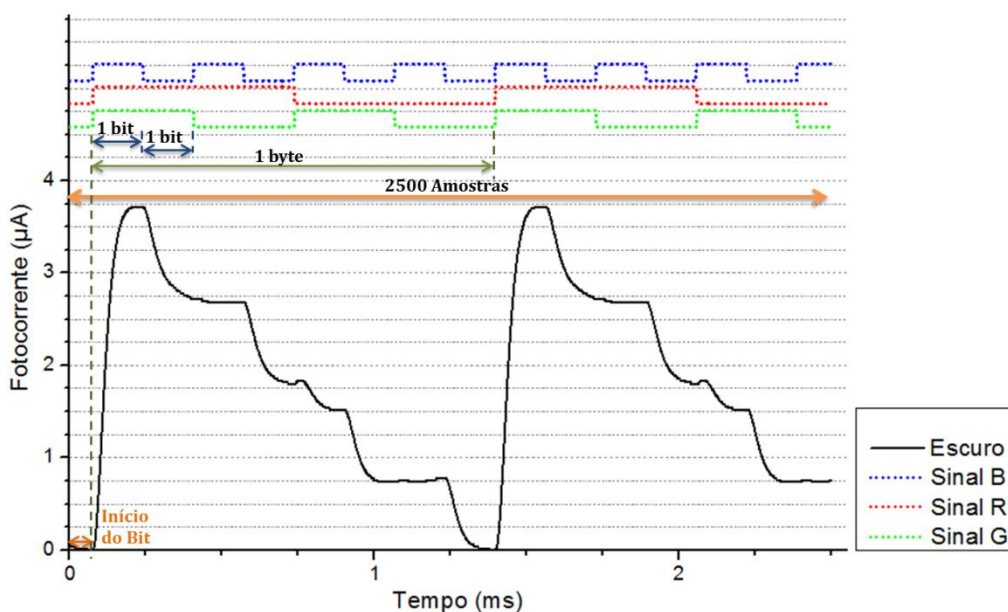


Figura 52 – Representação gráfica do início do bit de uma amostragem.

De uma forma matemática, o tempo de início do bit é calculado em função da derivada da variação dos valores da fotocorrente, sendo que estes representam a taxa de variação instantânea. Onde existir uma maior taxa de variação instantânea será esse o valor de início do primeiro bit de dados. No entanto para a aplicação do algoritmo este valor, é um valor fixo de $75\mu\text{s}$, sendo que todas as medições efectuadas foram ajustadas desta forma no osciloscópio.

5.1.4 - Medição de distâncias

O algoritmo definido na aplicação *Matlab* pressupõe a utilização de um ficheiro de calibração, onde foi previamente medida a fotocorrente gerada pelo dispositivo com a sequência padrão (Tabela 4), em que o respectivo tempo de início de bit é perfeitamente conhecido. O ficheiro de calibração servirá de base para a descodificação dos canais, e o início do bit, como foi indicado anteriormente tem um valor fixo de $75\mu\text{s}$.

Na execução do algoritmo é feita a decomposição de cada um dos valores dos bits do ficheiro de calibração dado que é conhecida essa sequência dos canais (sequência padrão), e guardada a informação das amostras correspondentes a cada bit. Com base nessa informação é calculada a média de valores para cada bit.

De igual forma é feita a decomposição de cada um dos valores dos bits do ficheiro onde se pretende descodificar os canais, mas dado que não é conhecida a sequência de transmissão é necessário que seja feita uma comparação dos resultados face ao resultado obtido com o ficheiro de calibração. Desta forma, é também guardada a informação das amostras correspondentes a cada bit, e com base nessa informação é feita a média de valores para cada bit.

Tendo as informações de cada bit, do ficheiro de calibração e do ficheiro de dados são calculadas duas coordenadas por cada símbolo, uma correspondente à soma ($V_{pin1}+V_{pin2}$) e a outra correspondente à diferença entre ambos ($V_{pin1}-V_{pin2}$). Com base nessas coordenadas calculadas é medida a distância no espaço vectorial bidimensional entre o símbolo que se pretende descodificar e os símbolos existentes na sequência padrão do ficheiro de calibração. Com base na distância mínima medida é atribuído o código RGB correspondente ao sinal de dados e considerado esse o sinal transmitido.

Para uma melhor percepção dos dados é feito um ajuste dos sinais no gráfico, sendo posteriormente apresentada toda a informação do sinal medido com a aplicação do fundo violeta pelo lado frontal e com a aplicação do fundo azul pelo lado posterior. É ainda apresentado o sinal binário re-

sultante da descodificação, bem como a representação do sinal descodificado para cada um dos canais RGB.

5.1.5 - Exemplo do algoritmo

Para uma melhor compreensão do método de atribuição dos patamares de sinal através da medição das distâncias, e a comparação face ao gráfico de sinal medido quando o dispositivo semiconductor está sujeito a uma radiação de fundo pelo lado frontal e posterior, são apresentados de seguida dois exemplos de cálculo.

- **Exemplo 1**

Como procedimento inicial e efectuadas as respectivas medições nas condições indicadas, basta colocarmos no mesmo gráfico a representação do sinal quando sujeito a uma radiação de fundo pelo lado frontal (Vpin1) e quando sujeito a uma radiação de fundo pelo lado posterior (Vpin2) (Figura 53).

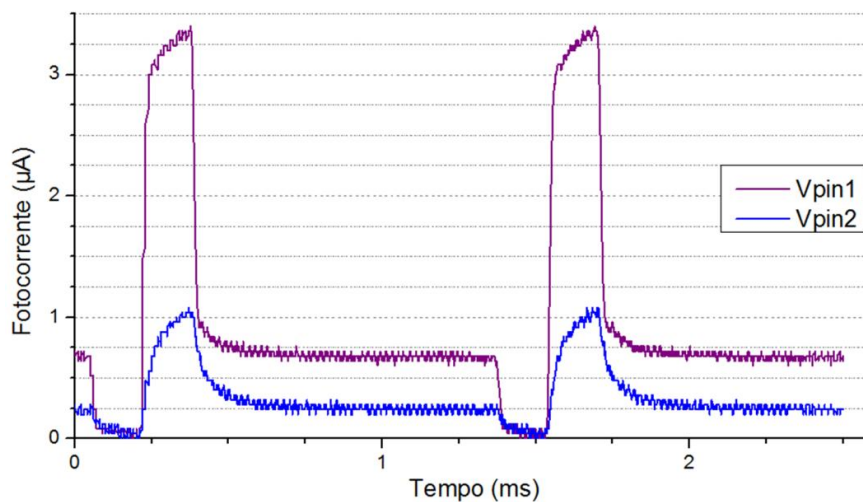


Figura 53 – Representação do sinal quando sujeito a uma radiação de fundo.

O primeiro passo será marcar no gráfico os “*time-slots*” relativos aos bits dos sinais de dados da sequência, de forma a ser verificado onde começa e acaba cada um deles e permitir ser feita uma análise mais correcta.

De seguida, é necessário marcar os patamares do sinal Vpin1, onde neste caso encontramos três níveis, sendo que estes níveis indicam que a sequência gerada pelos canais RGB tem um número idêntico de combinações diferentes, neste caso existem três combinações diferentes na sequência de transmissão. Assim, marcamos o 1º patamar em cima como tendo activo o sinal vermelho (**R**) e marcamos os outros dois patamares como não tendo activo o sinal vermelho (**0**). Os patamares do

sinal vermelho podem ser distinguidos devido aos seus valores de fotocorrente bastante altos face aos restantes (Figura 54).

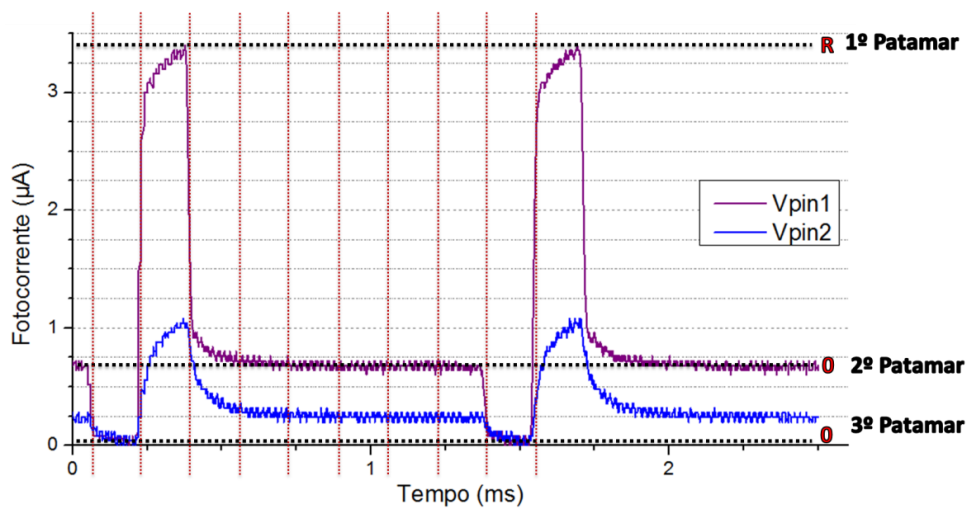


Figura 54 – Representação dos patamares de sinal com identificação do canal R.

O passo seguinte será identificar os patamares onde existe a presença do sinal azul (B) através da análise do sinal de V_{pin2} . Considerando que um dos requisitos das sequências é a existência de um patamar com todos os níveis a 0, marcamos o 3º patamar como não tendo o nível azul activo (0). No 1º patamar, verificamos que o sinal de V_{pin2} é o mais alto e tendo em conta a diferença face ao nível anterior, podemos concluir que existe a presença do sinal azul. No 2º patamar verificamos que o sinal tem um decréscimo bastante acentuado face ao nível anterior e desta forma concluímos que nesse patamar não existe a presença do sinal azul (Figura 55).

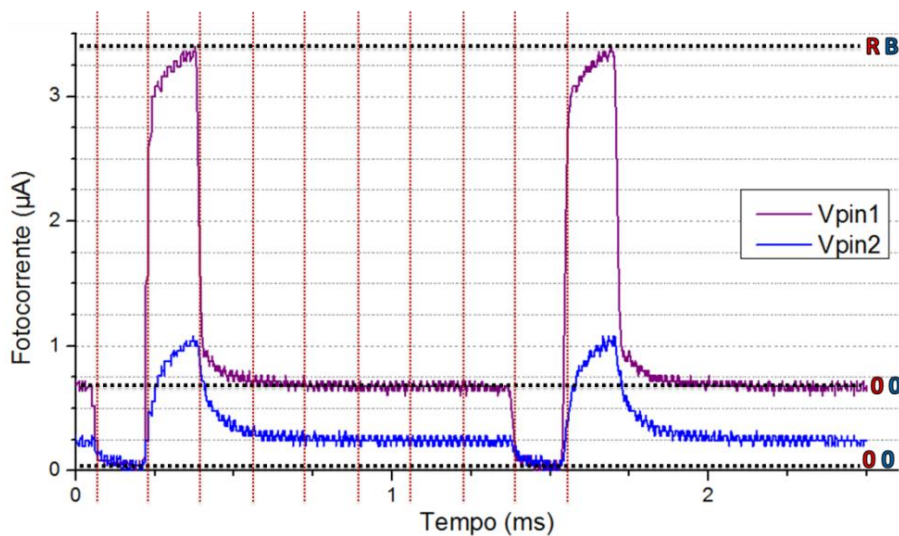


Figura 55 – Representação do sinal com identificação do canal B.

O último passo será efectuar uma comparação entre os dois gráficos e entre os patamares identificados, de forma a ser possível identificar os patamares onde existe a presença do sinal verde

(G). O 3º patamar não tendo a presença do sinal verde é marcado como (0) e comparando esse com o 2º patamar verificamos que existe uma variação decrescente de sinal de Vpin2, onde não está presente o sinal vermelho e azul, logo o único sinal que está presente será o sinal verde. No 1º patamar, que corresponde ao sinal mais alto, é possível identificar que existe a presença do sinal verde, face à não existência de nenhuma transição quando o sinal passa do 1º para o 2º patamar. Este facto, leva a que se consiga identificar de que a única variação existente entre estes dois patamares é apenas o facto de que o sinal vermelho e azul deixem de estar activos (Figura 56).

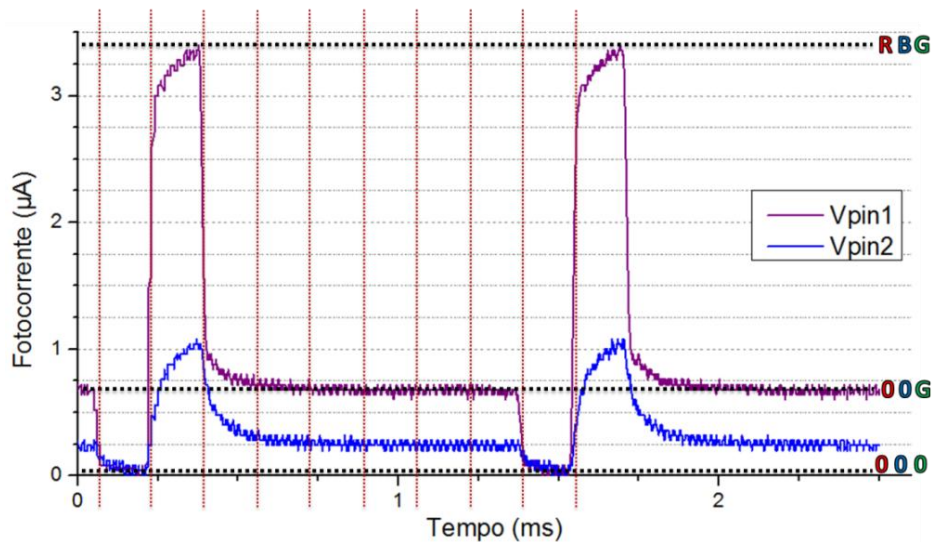


Figura 56 – Representação do sinal com identificação do canal G.

Obtidas as correspondências de sinal em cada um dos patamares, foi colocada a sequência gerada com a indicação de cada nível de sinal em cada um dos oito bits que compõem a sequência de transmissão (Figura 57).

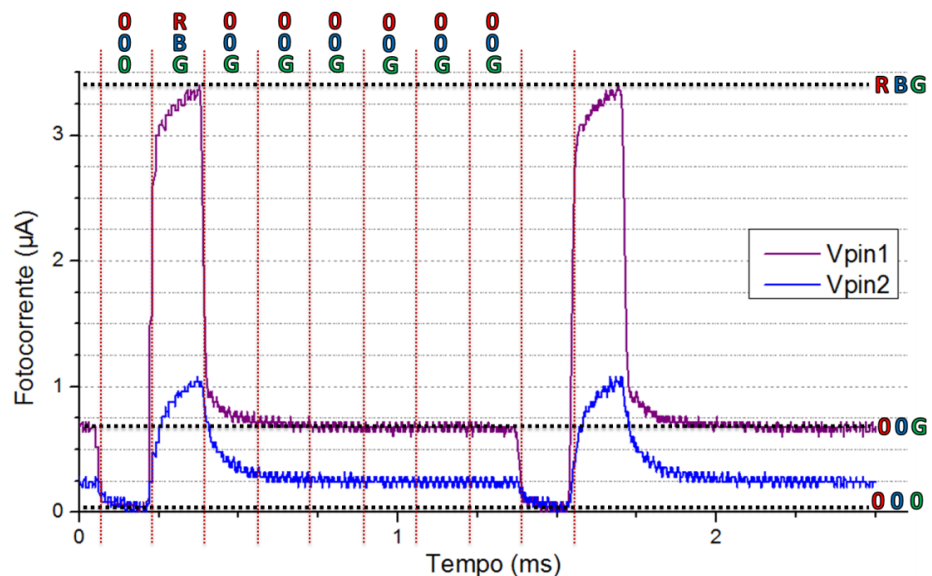


Figura 57 – Representação do sinal com identificação dos três canais RGB.

• Exemplo 2

Este exemplo irá ilustrar o sinal da sequência padrão que serve de referência para a calibração do sinal. Como procedimento inicial e efectuadas as respectivas medições nas condições indicadas, basta colocarmos no mesmo gráfico a representação do sinal quando sujeito a uma radiação de fundo pelo lado frontal (Vpin1) e quando sujeito a uma radiação de fundo pelo lado posterior (Vpin2) (Figura 58).

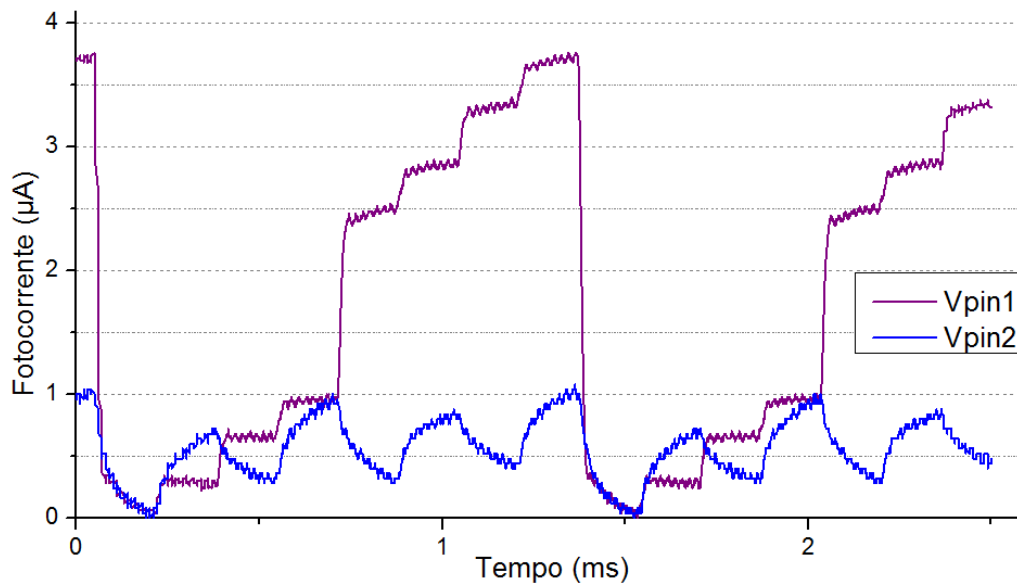


Figura 58 – Representação do sinal quando sujeito a uma radiação de fundo.

O primeiro passo para efectuar a análise será marcar no gráfico os “*time-slots*” relativos aos bits dos sinais de dados da sequência, de forma a ser verificado onde começa e acaba cada um deles e permitir ser feita uma análise mais correcta.

De seguida, é necessário marcar os patamares do sinal Vpin1, onde neste caso encontramos oito níveis, sendo que estes níveis indicam que a sequência gerada pelos canais RGB tem um número idêntico de combinações diferentes, neste caso existem oito combinações diferentes na sequência de transmissão. Verificamos pela imagem que existe uma diferença bastante acentuada nos valores de fotocorrente entre os patamares 1 a 4 e os patamares 5 a 8, logo podemos considerar que os patamares 1 a 4 têm activo o sinal vermelho (**R**) e marcamos os outros quatro patamares (5 a 8) como não tendo activo o sinal vermelho (**0**) (Figura 59).

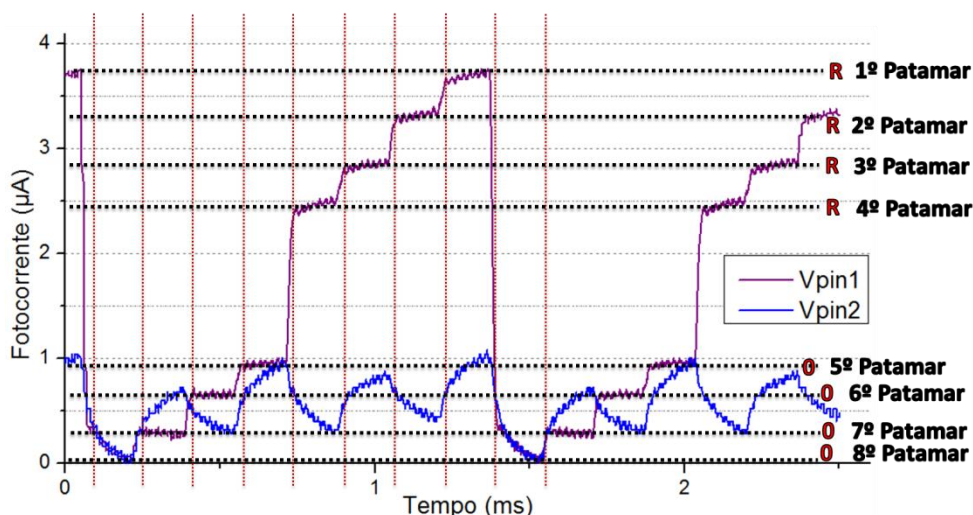


Figura 59 – Representação dos patamares de sinal com identificação do canal R.

O passo seguinte será identificar os patamares onde existe a presença do sinal azul (**B**) através da análise do sinal de Vpin2. Considerando que um dos requisitos das sequências é a existência de um patamar com todos os níveis a 0, marcamos o 8º patamar como não tendo o nível azul activo (0). Verificando os restantes patamares é notória a presença de “picos” de sinal de Vpin2 bastante acentuada nos patamares 1, 3, 5 e 7 e tendo em conta as diferenças face aos níveis anteriores, podemos concluir que existe a presença do sinal azul nestes patamares (Figura 60).

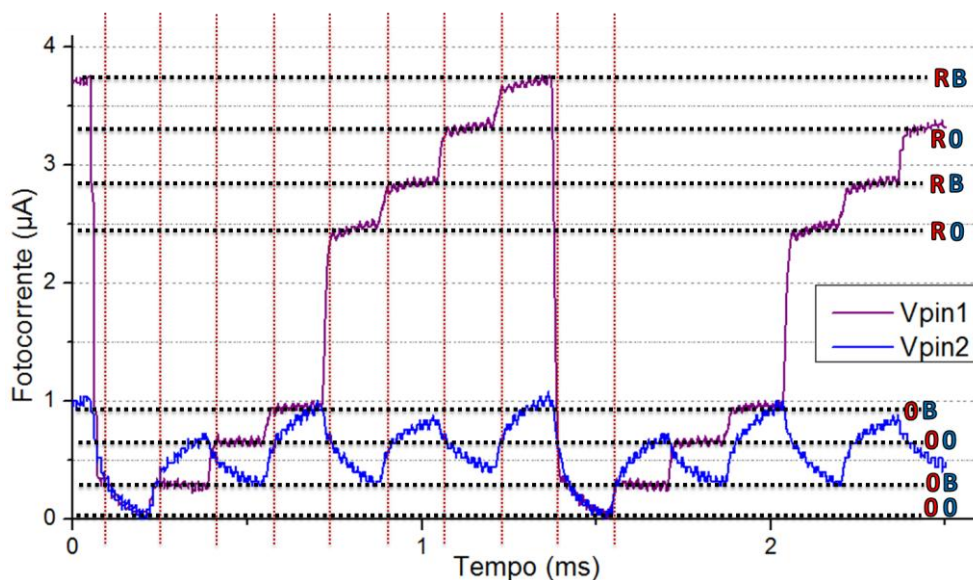


Figura 60 – Representação do sinal com identificação do canal B.

O último passo será efectuar uma comparação entre os dois gráficos e entre os patamares identificados, de forma a ser possível identificar os patamares onde existe a presença do sinal verde (**G**). O 8º patamar não tendo a presença do sinal verde é marcado como (0) e comparando esse com o 7º patamar verificamos que existe uma variação crescente de sinal de Vpin2, onde não está presente o sinal vermelho e existe azul. Comparando este patamar com o 6º patamar verificamos um

Capítulo 5 - Descodificação com Matlab

decréscimo de sinal onde não está presente nem o sinal vermelho nem o azul, logo concluímos que o 7º patamar não tem a presença do sinal verde, mas o 6º patamar tem, que no caso será o único sinal que está presente nesse patamar.

No 5º patamar é fácil identificar um acréscimo de sinal face ao sinal do 7º patamar onde apenas existia a presença do sinal azul. Considerando que a presença do sinal vermelho com a iluminação de fundo posterior de cor azul é quase irrisória podemos considerar que o 5º patamar tem a presença dos sinais verde e azul.

Nos patamares 1 a 4 já foi identificada a presença do sinal vermelho, e no caso dos patamares 3 e 4, é possível verificar que não existe influência do sinal verde, devido à comparação com o patamar 5 onde se verifica que existindo a presença simultânea do sinal azul e verde, o sinal de Vpin2 é superior.

Sabendo que no patamar 2 apenas temos o sinal vermelho e tendo em conta o sinal de Vpin2, confirma-se a existência do sinal verde nesse mesmo patamar. Por fim, sendo o patamar 1, aquele que tem maior valor de fotocorrente gerada e tendo a presença do sinal vermelho e azul, pode-se concluir que existe a presença do sinal verde nesse mesmo patamar (Figura 61).

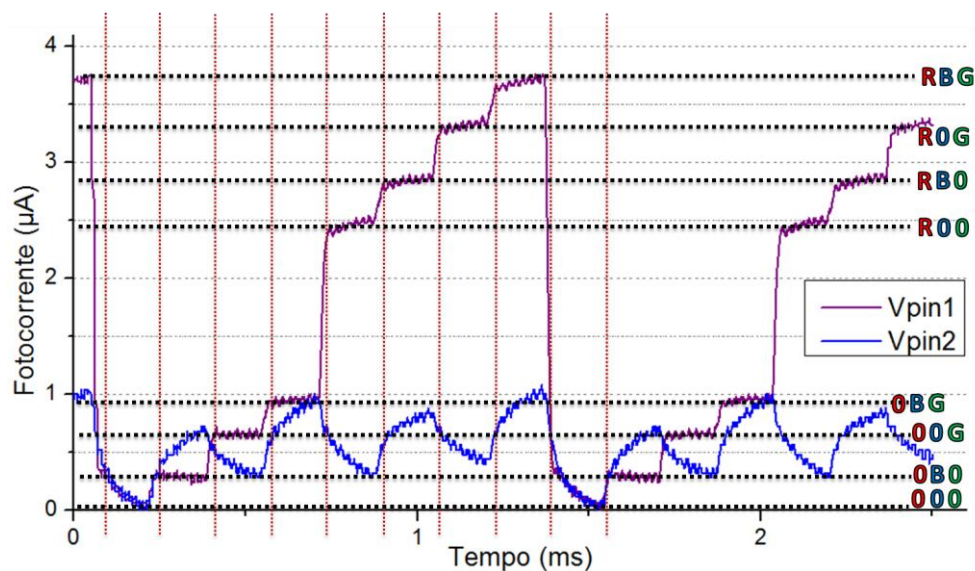


Figura 61 – Representação do sinal com identificação do canal G.

Obtidas as correspondências de sinal em cada um dos patamares, foi colocada a sequência gerada com a indicação de cada nível de sinal em cada um dos oito bits que compõem a sequência de transmissão (Figura 62).

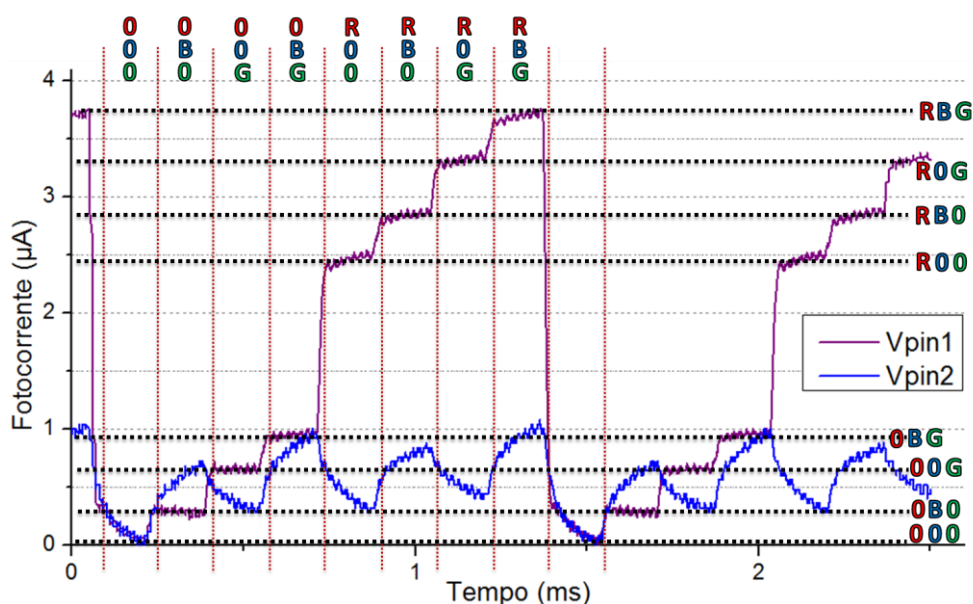


Figura 62 – Representação do sinal com identificação dos três canais RGB.

5.2 - Desenvolvimento da aplicação

Considerando o algoritmo definido para a descodificação dos canais de dados, foi necessário construir o código da aplicação gráfica respectiva, para que seja possível na prática obter esses mesmos resultados e efectuar o reconhecimento autónomo da informação transmitida por cada canal através da leitura do sinal da fotocorrente gerada pelo dispositivo, com a aplicação de radiação de fundo incidente no lado frontal e posterior da estrutura.

Nos dados de leitura do sinal de fotocorrente gerada é utilizado um ficheiro de calibração com a sequência padrão (Tabela 4) e com o respectivo tempo de início de bit perfeitamente validado, que servirá de base para a descodificação dos dados de leitura, onde foram aplicados os fundos para a descodificação do sinal.

A utilização do ficheiro de calibração é importante para que seja possível comparar o comportamento do dispositivo semiconductor com uma sequência conhecida e definir os seus respectivos patamares, de forma a poder através do algoritmo criado efectuar uma comparação com este último e obter o sinal transmitido numa sequência perfeitamente aleatória onde apenas é obrigatória a existência de uma combinação de zeros de forma a simular o “escuro”.

O diagrama de blocos do programa criado é apresentado na Figura 63, de forma a mostrar as etapas existentes desde o início até ao fim da execução do programa.

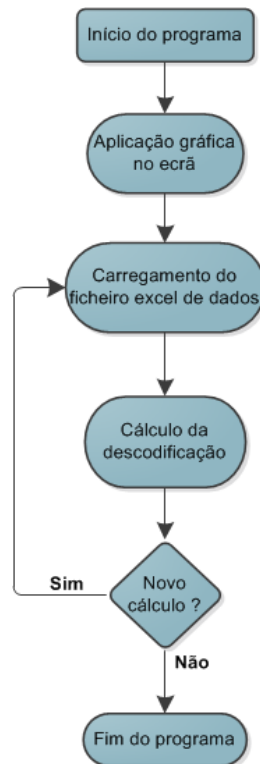


Figura 63 – Diagrama de blocos do programa decodificador WDM de 3 canais.

O programa é iniciado com uma janela gráfica de apresentação (Figura 64), que representa o ecrã principal do simulador, sendo este o ponto central de todo o sistema. Nesse mesmo ecrã existe uma barra de menus superior onde é possível aceder às várias funções desta aplicação utilizando também as teclas de atalho do *Windows* para a execução das respectivas funções desejadas (Figura 65).

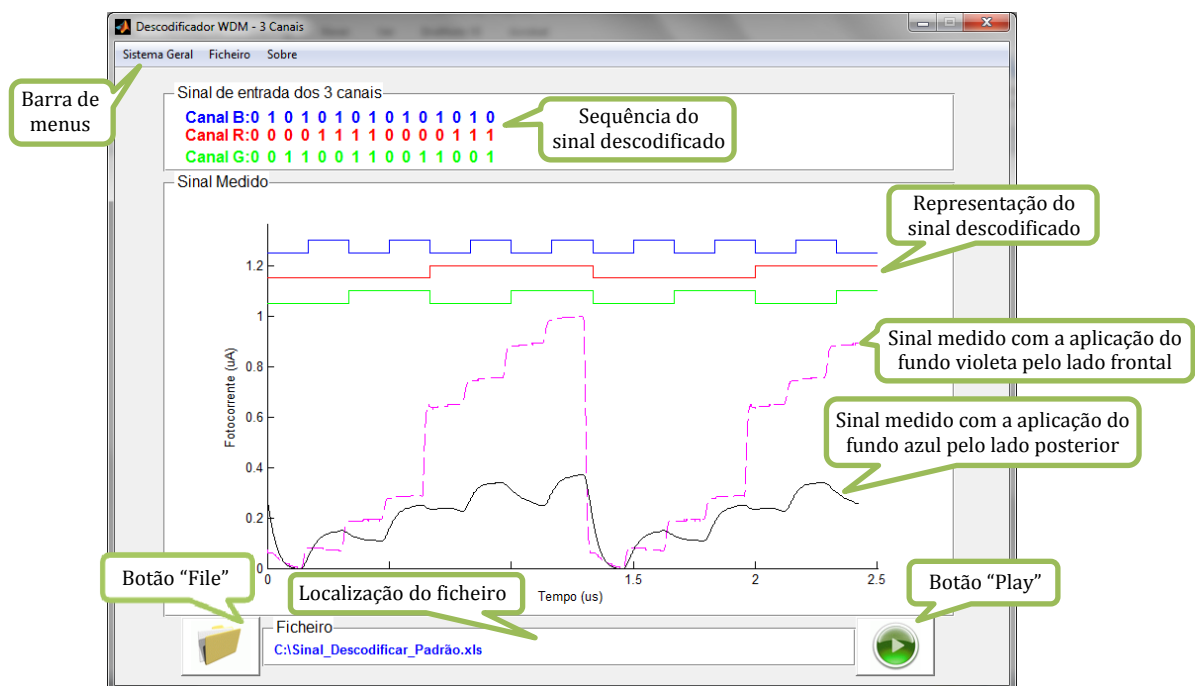


Figura 64 – Janela principal da aplicação gráfica do decodificador WDM de 3 canais.

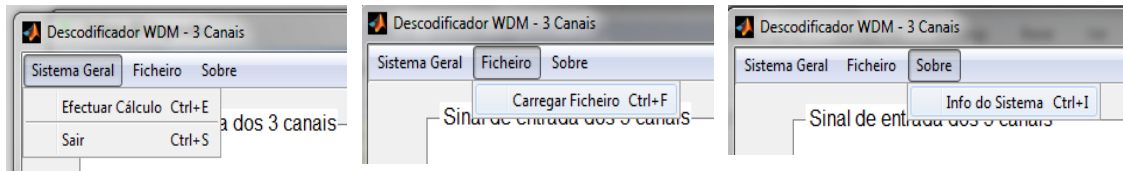


Figura 65 – Barra de menus da aplicação gráfica do descodificador WDM de 3 canais.

Para que possam ser obtidos os resultados da descodificação é necessário que seja efectuado o carregamento do ficheiro de dados *Excel* do sinal a descodificar (Figura 66) e proceder à sua respectiva execução, para que após o seu processamento, a aplicação possa apresentar a sequência do sinal descodificado, de uma forma binária e também a nível de representação gráfica. Nesta aplicação é ainda apresentado graficamente o sinal medido proveniente do ficheiro de medidas *Excel* para que possa ser visível o comportamento do dispositivo semiconductor.

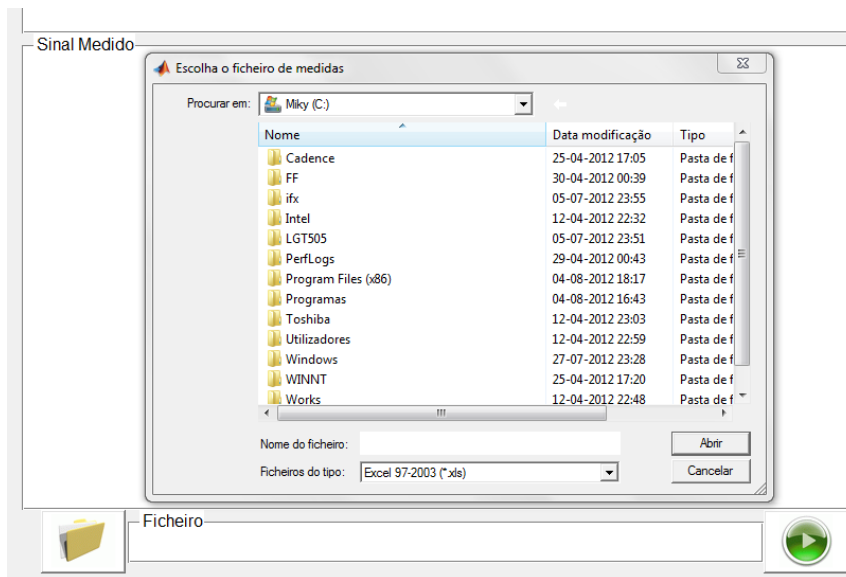


Figura 66 – Escolha do ficheiro de medidas do descodificador WDM de 3 canais.

De forma a ser mais facilmente compreensível o funcionamento de cada um dos blocos apresentados na Figura 63, é apresentado na Figura 67, um diagrama detalhado de cada uma das funções incluídas em cada um desses blocos principais da aplicação e as respectivas validações que são feitas na sua execução.

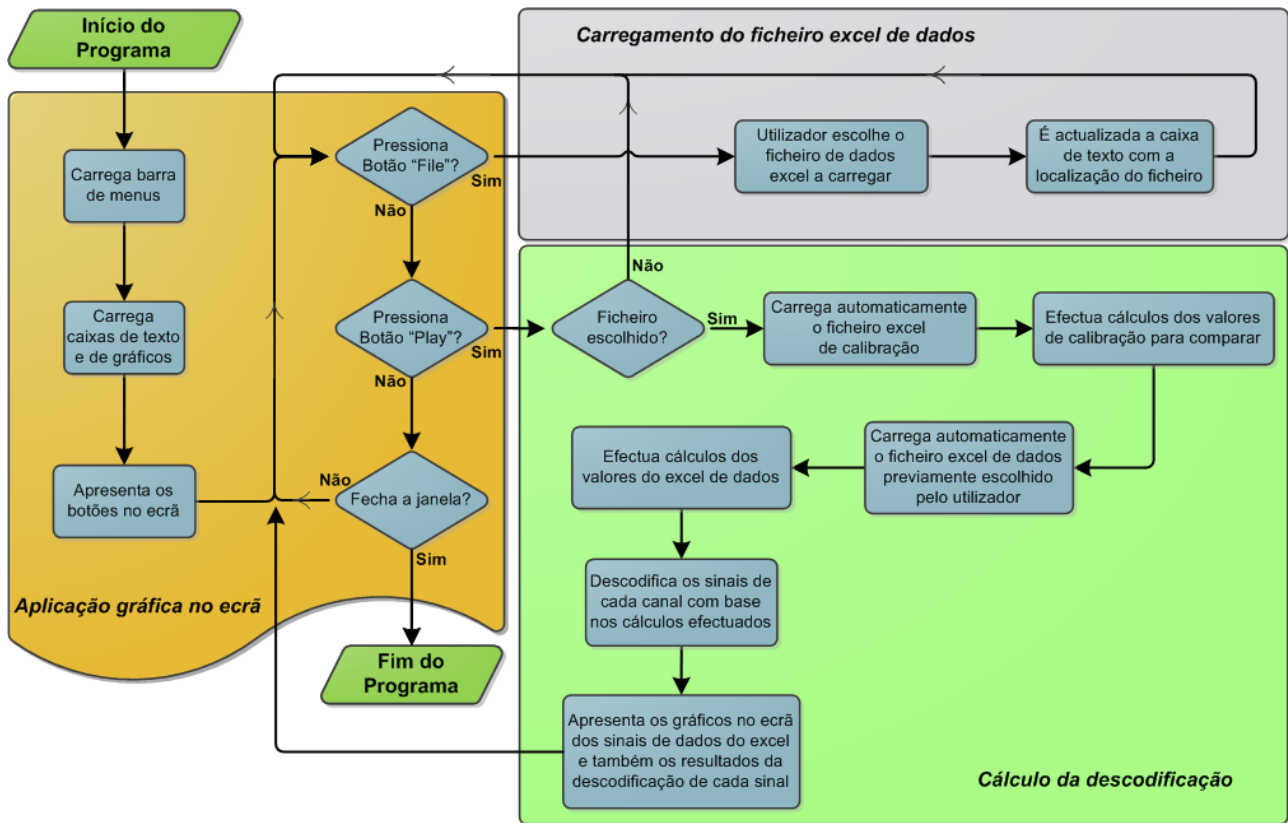


Figura 67 – Diagrama de funções do programa descodificador WDM de 3 canais.

A apresentação da aplicação gráfica no ecrã marca o início do programa de forma a permitir utilizar o interface de execução. Consoante a função escolhida pelo utilizador é executada uma determinada acção, sendo que no caso de ser pretendido efectuar o carregamento do ficheiro *Excel* de dados com as medições efectuadas, é apresentado um interface gráfico que permite escolher a pasta onde esse mesmo ficheiro se encontra guardado. Ao ser escolhido esse ficheiro *Excel* é actualizada a caixa de texto da aplicação gráfica que mostra a localização do ficheiro no computador.

Caso o utilizador pretenda efectuar a execução dos cálculos para a descodificação do sinal, é feita uma validação prévia sobre a existência do ficheiro *Excel*, sendo que em caso do ficheiro não se encontrar ainda escolhido não é efectuada qualquer acção. Com o ficheiro escolhido a aplicação pode executar os cálculos internos para a descodificação do sinal e são apresentadas na aplicação gráfica as formas de onda do sinal de fotocorrente gerada com a aplicação dos fundos. É também representado na aplicação o sinal descodificado com a respectiva sequência binária.

Capítulo 6 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

A transmissão na região visível do espectro electromagnético vem permitir explorar uma faixa de comprimentos de onda, até então inutilizada devido à sua incompatibilidade para com as características intrínsecas das fibras ópticas de sílica. Desta forma, começaram a surgir as fibras ópticas de plástico que possuem uma atenuação muito menor nessa região do espectro e possibilitam que exista comunicação óptica no domínio do visível.

Aliada a esta possibilidade de comunicação óptica no domínio do visível existe também a possibilidade de multiplexagem WDM nessa zona do espectro, tornando-se particularmente útil em aplicações como sistemas de comunicação dentro de automóveis e na ligação das redes internas locais (LAN) que requerem ligações em distâncias relativamente pequenas.

A apresentação deste trabalho vem colmatar essa lacuna e consistiu na continuação do estudo em trabalhos anteriores, de uma estrutura semicondutora baseada em a-SiC:H e a-Si:H que funciona como demultiplexador WDM de sinais transmitidos na zona visível do espectro e que tem como objectivo a sua aplicação futura em sistemas de comunicações, baseados em fibras ópticas de plástico onde visa permitir o reconhecimento dos canais de entrada.

Para ser possível o reconhecimento dos canais de entrada que incidem sobre o dispositivo semicondutor, foi inicialmente efectuado um estudo exaustivo sobre o comportamento deste dispositivo face aos comprimentos de onda incidentes e tendo em conta a utilização de uma radiação luminosa de fundo incidente que permitiu caracterizar opticamente este dispositivo semicondutor. Ao longo deste estudo foi variada a polarização óptica, que consistiu na variação da radiação de fundo, variando as cores dos fundos, variando o lado incidente do fundo sobre a estrutura semicondutora e variando também a intensidade desses mesmos fundos. Desta forma foram utilizados os seguintes LEDs como luz de radiação de fundo; violeta (420nm), azul (470nm), verde (525nm), amarelo (580nm) e vermelho (626nm), sendo que cada um deles tem a sua influência específica sobre os comprimentos de onda dos canais ópticos.

Com esta análise, foi possível identificar a influência que cada LED de radiação de fundo tem sobre o espectro de frequência do domínio visível e ficou notório de que fazendo incidir um LED de cor violeta pelo lado frontal da estrutura, a fotocorrente gerada acima dos comprimentos de

Capítulo 6 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

onda de 500nm é sempre amplificada seja qual for a intensidade da iluminação de fundo. Por outro lado, para os comprimentos de onda abaixo dos 500nm a fotocorrente gerada é ligeiramente inferior ao valor de fotocorrente no escuro.

De igual forma, este estudo permitiu concluir que fazendo incidir um LED de cor azul pelo lado posterior da estrutura, a fotocorrente gerada acima dos comprimentos de onda de 480nm é sempre atenuada independentemente da intensidade da iluminação de fundo, sendo que nos comprimentos de onda abaixo dos 480nm a fotocorrente gerada é ligeiramente superior ao valor de fotocorrente no escuro, factor que será bastante importante pois irá permitir distinguir os canais ópticos.

Com base neste estudo já era possível prever o comportamento da estrutura semicondutora, e como tal, foi efectuado um outro estudo que recaiu sobre a análise dos sinais dos canais ópticos de forma individual e combinada face à influência da radiação de fundo, onde foi variada a cor de fundo, a intensidade luminosa, a posição da radiação e o *bit-rate* do sinal óptico incidente. Assim foi possível confirmar quais os LEDs de radiação de fundo que melhor permitem o reconhecimento dos canais de entrada.

Para a recuperação do sinal óptico do canal vermelho, a utilização do LED violeta com uma corrente de polarização de 10mA incidindo pelo lado frontal do dispositivo semicondutor revelou-se ideal, pois faz a amplificação da fotocorrente gerada por este LED e não faz grande alteração na fotocorrente gerada pelo sinal do canal óptico azul. Quando sujeito a esta mesma radiação de fundo, a fotocorrente gerada pelo sinal óptico do canal verde aumenta mas não de uma forma tão intensa como a do sinal óptico vermelho.

Ficou também perceptível de que fazendo incidir uma radiação luminosa de fundo azul pelo lado posterior do dispositivo semicondutor com uma corrente de polarização de 10mA seria possível amplificar um pouco o sinal do canal óptico azul, mas sobretudo atenuar os sinais dos canais ópticos vermelho e verde, o que permite criar patamares de níveis de forma a permitir através de um mecanismo de cálculo perceber onde se encontra cada canal óptico e qual a respectiva sequência de transmissão.

Desta forma, foi desenvolvida uma aplicação gráfica na linguagem de engenharia *Matlab*, que com base num algoritmo definido permite o reconhecimento de forma autónoma do sinal óptico transmitido por cada canal de dados, através da leitura da fotocorrente gerada pelo dispositivo semi-

condutor quando este é sujeito à radiação de fundo frontal e posterior que foi inicialmente estudada ao longo deste trabalho.

Por fim, foi também efectuada uma análise de sinais com a utilização de fibras POF a incidir directamente sobre a estrutura semicondutora, no entanto os resultados obtidos demonstram que existe uma perda de sinal considerável, o que resulta em valores de fotocorrente bastante reduzidos.

A melhoria do comportamento da estrutura semicondutora com a utilização de fibras POF será algo que poderá ser desenvolvido futuramente estudando uma melhor forma de acoplamento do conector POF, tanto no LED RGB utilizado, como na estrutura semicondutora. Outro ponto de evolução seria poder efectuar uma descodificação directamente do sinal medido sem ser necessário efectuar o tratamento dos dados em *Excel*.

Capítulo 7 - Anexos

Todos os documentos anexos poderão ser consultados no CD anexado ao relatório.

Anexo A – Datasheets.

Anexo A.1 – *Agilent* HLMP-Cxxx InGaN LED.

Anexo A.2 – *Agilent* HLMP-ELxx AlInGaP LED.

Anexo A.3 – *Roithner* B5B-433-20 AlGaInP LED.

Anexo A.4 – *Roithner* LED420-series InGaN LED.

Anexo A.5 – Super Flux RGB common anode LED.

Anexo A.6 – Conector F-05 para fibra POF.

Anexo A.7 – Conectores e fibras *Ratioplast-Optoelectronics*.

Anexo A.8 – Fibra POF *Optral* ETW04004i.

Anexo B – Programa da aplicação informática *MatLab*.

Anexo B.1 – Código *Matlab*.

Anexo C – Manual de medições sobre o dispositivo fotodetector.

Anexo C.1 – Manual de funcionamento.