

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E  
TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES

# **DESMULTIPLEXAGEM ÓPTICA CONTROLADA POR TENSÃO (DOV)**

**Cátia Susana Gonçalves Francisco**

(Bacharel)

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES

Orientadora: Doutora Paula Maria Garcia Louro Antunes  
Co-Orientador: Doutor Manuel Martins Barata

Júri:

Presidente: Coordenador do Mestrado  
Vogais: Doutor Guilherme António Rodrigues Lavareda  
Doutora Paula Maria Garcia Louro Antunes  
Doutor Manuel Martins Barata

Janeiro de 2009



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**DESMULTIPLEXAGEM ÓPTICA  
CONTROLADA POR TENSÃO (DOV)**

**Cátia Susana Gonçalves Francisco**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA NO INSTITUTO SUPERIOR DE  
ENGENHARIA DE LISBOA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ENGENHARIA ELECTRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES



À memória do meu Pai  
que pode escolher este tema comigo,  
mas já não assistiu ao seu término.



## ABSTRACT

This paper presents the optoelectronic characterization of a structure p-i-n based in a-Si:H and/or a-SiC:H that works as a color sensor in the visible spectrum. The study of this sensor has, as a final target, the multiplexing and de-multiplexing of an optical signal (WDM Wavelength-division multiplexing). The WDM process characterization has the objective of using multiple channels for short length signal transmission.

This model shall integrate the fiber-optics as a transmitting method, which will improve the WDM system optimization allied with the sensor characteristics, that has a spectral sensibility in the visible region which is modulated by the electrical tension signal applied.

The fact that this devices work as filters of color controlled tension, allows to control the spectral selectivity in the transmitting channel which regulates the regeneration of the transmitted optical signal. The system of signal processing for de-multiplexing was created for three optical signals with the respective wavelengths (Red-626 nm, Green-525 nm and Blue-470nm).

**Key words:** Optical Multiplexer/Demultiplexer, Semiconductors devices, Optoelectronic

## RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização optoelectrónica de uma estrutura p-i-n baseada em a-Si:H e/ou a-SiC:H que funciona como sensor de cor no espectro visível. O estudo do sensor tem como objectivo a multiplexagem e desmultiplexagem de um sinal óptico (WDM Wavelength-division multiplexing). A caracterização do processo de WDM tem em vista a utilização de vários canais para a transmissão de sinais a curta distancia.

Este modelo deverá integrar como meio de transmissão a fibra óptica, que constituirá uma importante mais valia na optimização do sistema WDM. Aliada as características do sensor cuja sensibilidade espectral na região do visível é modulada pelo sinal de tensão eléctrico aplicado.

O facto destes dispositivos funcionarem como filtros de cor controlados por tensão, permite controlar a selectividade espectral no canal de transmissão, o que regula a regeneração do sinal óptico transmitido. O sistema do processamento de sinal para a desmultiplexagem foi feito para três sinais ópticos com os respectivos comprimentos de onda (Vermelho-626 nm, Verde-525 nm e Azul-470 nm).

**Palavras chave:** Multiplexagem/Desmultiplexagem óptica, Dispositivos semicondutores, Optoelectrónica

## Agradecimentos

Gostaria de deixar uma palavra de profunda gratidão a todos aqueles que, de uma forma directa ou indirecta, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Dr.<sup>a</sup> Paula Louro pelo modo como perspectivou e supervisionou este trabalho, pelas “dicas” e encorajamento em momentos decisivos, pela leitura minuciosa deste manuscrito, pela amizade dispensada durante este ano.

Ao Dr. Manuel Barata pelo incentivo nos momentos de crise, pelas proveitosas discussões científicas que ajudaram a concretizar parte significativa deste trabalho, e pela disponibilidade em partilhar a sua vasta experiência.

Ao Eng.<sup>o</sup> Miguel Fernandes agradeço a disponibilidade demonstrada e a contribuição para a realização deste trabalho.

Ao Carlos e ao Nuno Graça pela amizade, pelas sugestões, brincadeiras e numerosas discussões científicas durante esta fase. A alegria ilumina a vida e os nossos bons momentos de animação ajudaram a ultrapassar todos os maus momentos.

Ao Eng.<sup>o</sup> João Pedro Rodrigues e ao meu colega José Lopes da Portugal Telecom pela força, durante todo este período de estudo.

A minha mãe Irene Francisco e irmã Carla Francisco por nesta fase “difícil” não estar muito presente e pelo apoio dado.

A minha cara-metade Filipe Machado a paciência sem limites, a cumplicidade e o enorme amor. Agradeço, também, pelas palavras, pelo silêncio, pelo apoio e por ser capaz de compreender de uma forma impar o “sonho de uma vida”.

Aos amigos, o mais sincero agradecimento, pois sem vocês a vida vale muito pouco.

# Índice

Lista de Figuras .....	X
Lista de Tabelas .....	XV
Lista de Símbolos .....	XVI
Lista de acrónimos e termos .....	XVIII
Capítulo 1 - Introdução .....	1
1.1 - Enquadramento .....	2
1.2 - Apresentação da tese.....	3
1.3 - Grandezas Frequentemente Utilizadas .....	4
1.4 - Referências .....	4
Capítulo 2 - Dispositivos Semicondutores para detecção de radiação.....	5
2.1 - Técnicas de decomposição química de vapores assistida por um plasma de r.f. (PECVD) 11	
2.2 - Espectro electromagnético.....	12
2.3 - Fotodíodo .....	14
2.3.1 - Fotodíodo PIN.....	17
2.3.2 - Princípio da detecção óptica. ....	18
2.3.3 - Responsividade e eficiência quântica. ....	21
2.3.4 - Efeito da temperatura.....	23
2.3.5 - Tempo de resposta. ....	23
2.3.6 - Circuito eléctrico equivalente e modos de funcionamento do fotodíodo.....	25
2.4 - Referências .....	28
Capítulo 3 - Características optoelectrónicas do fotodetector .....	29
3.1 - Sensor .....	29

3.2 -	Caracterização optoelectrónica .....	31
3.2.1 -	Resposta da fotocorrente em função do comprimento de onda.....	31
3.2.2 -	Características Corrente Tensão.....	35
3.3 -	Referências .....	44
Capítulo 4 -	Tecnologia WDM .....	45
4.1 -	Multiplexagem .....	47
4.1.1 -	Análise do sinal óptico na frequência .....	47
4.1.2 -	Análise do sinal óptico em tensão .....	53
4.1.3 -	Análise dos sinais ópticos Vermelho, Azul e Verde .....	55
4.2 -	Referências .....	57
Capítulo 5 -	Descrição do sistema .....	58
5.1 -	Emissor .....	64
5.1.1 -	Modulador do sinal de óptico .....	64
5.1.2 -	Sinal Óptico .....	65
5.2 -	Meio de transmissão.....	66
5.3 -	Receptor .....	67
5.3.1 -	Sensor .....	67
5.3.2 -	Pré – Amplificador .....	69
5.3.3 -	Sistema de Aquisição .....	69
5.3.4 -	Aplicação .....	71
5.4 -	Resultados experimentais - Processamento.....	81
5.4.1 -	Características de aquisição .....	81
5.5 -	Tecnologias existentes no mercado.....	92
5.6 -	Referências .....	97
Capítulo 6 -	Conclusão e desenvolvimentos futuros.....	98
ANEXOS .....		100

# Lista de Figuras

Figura 1- Ligações químicas do silício amorfo hidrogenado.....	7
Figura 2 - Diagrama da densidade de estados de energia de um semiconductor cristalino e amorfo (modelo de Mott). .....	7
Figura 3 - Espectro de absorção óptica de um filme a-Si:H.....	8
Figura 4 – Transições entre estados de energia durante os processos de absorção dos semicondutores amorfos. ....	10
Figura 5 – Espectro electromagnético [12]. ....	12
Figura 6 – Espectro do Visível.....	13
Figura 7 – Comprimento de onda. ....	13
Figura 8 – Junção PN directamente polarizada. ....	15
Figura 9 – Junção PN inversamente polarizada.....	16
Figura 10 – Esquema Equivalente de um Fotodíodo PIN. ....	17
Figura 11 – Estrutura do fotodíodo p-i-n baseado em a-Si:H.....	18
Figura 12 – Diagrama das Bandas de Energia de um Fotodíodo PIN com Heterojunção. ....	20
Figura 13 – Curva típica da resposividade para os fotodiodos p-i-n de silício. ....	22
Figura 14 – Curva típica da eficiência quântica para os fotodiodos p-i-n de silício. ....	22
Figura 15 – Variação incremental percentual de $\eta$ com a temperatura. ....	23
Figura 16 – Circuito eléctrico equivalente de um fotodíodo.....	25
Figura 17 – Curva I-V de um fotodíodo, mostrando o efeito da resistência de carga (linha a vermelho).....	25
Figura 18 – Circuito fotovoltaico básico.....	26
Figura 19 – Circuito de polarização nula.....	26

Figura 20 – Circuitos de polarização de um fotodíodo: (a) polarização negativa; (b) polarização positiva.....	27
Figura 21 – Equipamento de PECVD existente no ISEL/GIAMOS.....	29
Figura 22 – Geometria do dispositivo. ....	30
Figura 23 – Resultado da reflexão de diferentes ondas de luz numa grelha de difracção. ....	32
Figura 24 – Esquema da montagem para obtenção da resposta espectral.....	33
Figura 25 – Gráfico da fotocorrente para diferentes variações de tensão. ....	34
Figura 26 – Gráfico da fotocorrente para uma tensão de -5V e diferentes frequências.....	34
Figura 27 – Esquema da montagem experimental em regime AC. ....	36
Figura 28 – Gráfico da fotocorrentes dos comprimentos onda vermelho( $\lambda_R=626$ nm), Azul( $\lambda_B=470$ nm), vermelho( $\lambda_R=626$ nm) & azul( $\lambda_B=470$ nm) para as frequências (15Hz;1.5KHz). ....	37
Figura 29 – Gráfico de fotocorrentes das várias combinações do sinal óptico para as frequências (750Hz;1.5KHz e 3KHz).....	38
Figura 30 – Esquema da montagem experimental em regime DC. ....	39
Figura 31 – Gráfico da fotocorrente em função da tensão para as luzes Vermelho, Azul e os dois em simultâneo (escala Linear) em dc. ....	39
Figura 32 – Gráfico da fotocorrente em função da tensão para as luzes Vermelho, Azul e em simultâneo (escala Logaritmica) em dc.....	40
Figura 33 – Gráfico da fotocorrente em função da tensão para iluminação com leds ( $\lambda_R=626$ nm), ( $\lambda_B=470$ nm) e ( $\lambda_G=525$ nm).....	41
Figura 34 – Gráfico da fotocorrente para diferentes comprimentos de ondas desde o vermelho até ao violeta.....	42
Figura 35 – Gráfico da fotocorrente para diferentes valores de combinações da luz incidente: vermelho; verde; azul; vermelho & verde( $\lambda_R=626$ nm & $\lambda_G=525$ nm); vermelho & azul ( $\lambda_R=626$ nm & $\lambda_B=470$ nm); azul & verde ( $\lambda_G=525$ nm & $\lambda_B=470$ nm) e (RGB).....	43
Figura 36 – Configuração do dispositivo WDM para o modo multiplexagem.....	47
Figura 37 – Gráfico com modulação dos Led's verde e verde para uma frequência de 200Hz .....	48
Figura 38 – Gráfico com modulação dos Led's verde e verde para uma frequência de 2KHz .....	48
Figura 39 – Gráfico com modulação dos Led's verde e verde para uma frequência de 20KHz. ....	49

Figura 40 – Gráfico com modulação dos Led's verde e verde para uma frequência de 200KHz. ....	49
Figura 41 – Gráfico com modulação dos Led's verde e azul para uma frequência de 2KHz. ....	50
Figura 42 – Gráfico com modulação dos Led's verde e azul para uma frequência de 20 KHz. ....	50
Figura 43 – Gráfico com modulação dos Led's verde e azul para uma frequência de 200KHz. ....	51
Figura 44 – Gráfico do sinal multiplexado com c.d.o Verde e Vermelho para diferentes frequências .....	52
Figura 45 – Gráfico do sinal multiplexado para as diferentes tensões (-5V<V<+2V) e com comprimentos de onda, Vermelho & Azul ( $\lambda_{V, A} = 626 \text{ nm}, 470\text{nm}$ ) com frequência 1.5 KHz para o vermelho e 750 HZ para o azul .....	54
Figura 46 – Gráfico do sinal multiplexado para as diferentes tensões (-5V<V<+2V) e com comprimentos de onda, Vermelho & Azul ( $\lambda_{V, A} = 626 \text{ nm}, 470\text{nm}$ ) com Frequência 15 Hz para o vermelho e 7.5 HZ para o azul .....	55
Figura 47 – Gráfico WDM com as combinações dos comprimentos de onda (RGB).....	56
Figura 48 – Técnicas de Modulação.....	58
Figura 49 – Modulação em Amplitude (AM) .....	59
Figura 50 – Modulação em Frequência (FM).....	60
Figura 51 – Sinal OOK-NRZ. ....	61
Figura 52 – Sinal OOK-RZ.....	62
Figura 53 – Sinal 4-PAM. ....	62
Figura 54 – Diagrama de blocos.....	63
Figura 55 – Esquema do circuito de controlo dos Led's a frequências múltiplas.....	64
Figura 56 – Variação temporal da tensão de polarização dos Leds.....	65
Figura 57 – Imagem dos leds. ....	65
Figura 58 – Imagem da montagem dos leds .....	66
Figura 59 – Triplexer wdm.....	67
Figura 60 – Imagem do “array” de sensores. ....	68
Figura 61 – Imagem do sensor utilizado. ....	68
Figura 62 – Módulo de aquisição de dados NI_DAQ (USB 6008). ....	70

Figura 63 – Consola do utilizador. ....	71
Figura 64 – Consola do utilizador para o sinal normalizado e sinal modulador.....	73
Figura 65 – Aplicação “Controlo dos Leds”. ....	74
Figura 66 – Sinal sem “aliasing”.....	75
Figura 67 – Sinal com “aliasing”.....	75
Figura 68 – Componentes em frequência do sinal óptico.....	76
Figura 69 – Aplicação “Evento Aquisição”.....	77
Figura 70 – Aplicação “Normalização”.....	78
Figura 71 – Ilustração das respectivas cores para os 8 diferentes estados. ....	79
Figura 72 – Aplicação “Processamento”. ....	80
Figura 73 – Sinal obtido apenas com o comprimento de onda Vermelhos. ....	82
Figura 74 – Sinal normalizado obtido com o comprimento de onda Vermelhos.....	82
Figura 75 – Sinal do sensor obtido apenas com o comprimento de onda Verde.....	83
Figura 76 – Sinal normalizado obtido apenas com o comprimento de onda Verde.....	83
Figura 77 – Sinal modulador obtido para o sinal óptico Verde após usar a aplicação processamento. ....	84
Figura 78 – Sinal obtido apenas com o comprimento de onda Azul. ....	84
Figura 79 – Sinal normalizado apenas com o comprimento de onda Azul.....	85
Figura 80 – Sinal obtido com o comprimento de onda em simultâneo na gama Azuis e do Vermelho.....	86
Figura 81 – Sinal obtido com o comprimento de onda em simultâneo na gama do Verde e do Vermelho.....	86
Figura 82 – Sinal obtido com o comprimento de onda em simultâneo na gama do Verde e do Azul. .....	87
Figura 83 – Sinal modulador obtido para o sinal óptico verde e azul após usar a aplicação processamento. ....	88
Figura 84 – Sinal obtido com os três comprimentos de onda em simultâneo, o verde, azul e vermelho. ....	89

Figura 85 – Sinal normalizado. ....	90
Figura 86 – Sinal modulador obtido após usar a aplicação processamento. ....	91
Figura 87 – Sinal reconstruído .....	92
Figura 88 – Rede Ethernet.....	94
Figura 89 – Equipamento de cliente (Media Converter – MC7).....	94
Figura 91 – Interfaces SFP (Small Form-Factor Plug-in).....	95
Figura 92 – Vista frontal do <i>Transiver</i> óptico - SFP .....	95
Figura 93 – Sinal Normalizado. ....	100
Figura 94 – Aplicação “Processamento Frequência” .....	101
Figura 95 – Sinal modelador.....	101

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do $c - Si$ e $a - Si : H$ .....	10
Tabela 2 – Mostra o comprimento de onda máximo para o Si-c, a-Si:H e a-SiC:H.....	20
Tabela 3 – Níveis de fotocorrente para os sinais verde e azul .....	53
Tabela 4 – Configuração da aplicação.....	72
Tabela 5 – Tabela de codificação para o Processamento. ....	79
Tabela 6 – Frequências e amplitudes do sinal de fotocorrente medido sob diferentes condições iluminação. ....	89
Tabela 7 – Características dos diferentes SFP ópticos. ....	96

# Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
$c$	Velocidade da onda electromagnética	m/s
$c_0$	Velocidade da onda electromagnética no vazio	m/s
$d$	Espessura de um material	m
$E$	Campo eléctrico	V/m
$E$	Energia	J
$E_0$	Energia de Urbanch	J
$eo$	Tensão	V
$f$	Frequência	Hz
$C$	Condensador	F
$cd$	Capacidade da junção do Fotodíodo	F
$h$	Constante de <i>Planck</i>	J s
$I$	Intensidade da onda de luz	J s/m
$I$	Corrente eléctrica	A
$I_s$	Corrente de entrada	A
$I_n$	Ruído da corrente	A
$I_i$	Corrente de Fuga	A
$J$	Densidade de Corrente	A
$n$	Índice de refração	-
$n$	Semicondutor tipo $n$ com electrões como portadores maioritários	-

$p$	Semicondutor tipo $p$ com lacunas como portadores maioritários	-
$pn$	Junção entre um semicondutor do tipo $p$ e outro do tipo $n$	-
$pin$	Junção entre um semicondutor intrínseco do tipo $p$ e outro do tipo $n$	-
$q$	Carga	C
$Rd$	Resistência de shunt	$\Omega$
$RI$	Resistência de carga	$\Omega$
$Rs$	Resistência serie do Fotodíodo	$\Omega$
$T$	Tempo	s
$t$	Tempo de recombinação	s
$tr$	Tempo de transito dos portadores	s
$V$	Tensão	V
$v$	Velocidade	m/s
$\alpha(E)$	Coeficiente de absorção em função da energia	-
$\alpha_0$	Coeficiente de absorção à energia nula	-
$\epsilon$	Permitividade eléctrica	F/m
$\epsilon_0$	Permitividade eléctrica no vazio	F/m
$\eta$	Eficiência quântica	-
$\lambda$	Comprimento de onda da luz	nm
$\lambda_0$	Comprimento de onda da luz no vácuo	nm
$\mathfrak{R}$	Responsividade	A/W

# Lista de acrónimos e termos

---

Acrónimo / termo	Designação
a-SI:H	Silício Amorfo Hidrogenado
a-SIC:H	Silíceto Amorfo Hidrogenado
AC	Alternating Current
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BNC	Bayonet Neill Concelman connector
c.d.o	Comprimento de Onda
CPE	Customer Premises Equipment
DC	Direct Current
$E_c$	Limiar da banda de condução
$E_{op}$	Hiato óptico
$E_v$	Limiar da banda de valência
FDM	Frequency division Multiplexing
H	Hidrogénio
IP	Internet Protocol
I(V)	Corrente (Tensão)
ITO	Indium-Tin Oxide
N(E)	Densidade de estados de energia
NI	National Instruments
LED	Light Emitting Diode
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

---

PAM	Pulse Amplitude Modulation
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
POF	Plastic Optical Fiber
RGB	Red, Green and Blue
r.f.	Radio frequência
Si	Silício
SiH	Silício Hidrogenado
SiO <sub>2</sub>	Sílica
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDM	Space Division Multiplexing
TDM	Time Division Multiplexer
USB	Universal Serial Bus
UTP	Unshielded Twisted-Pair
VI	Virtual Instruments
WDM	Wavelength Division Multiplexer



# Capítulo 1 - Introdução

No domínio das comunicações, as tecnologias tendem a evoluir de uma forma prodigiosamente rápida, o que constitui um pré-requisito na sociedade actual pois o consumo de informação assume hoje em dia proporções gigantescas, tornando a necessidade de comunicar cada vez mais, e mais depressa, o que exerce uma pressão constante sobre aqueles que desenvolvem as tecnologias.

A evolução das tecnologias analógicas para as digitais trouxe consigo amplas possibilidades de inovação e melhoramento das comunicações. O desejo crescente que a sociedade desenvolveu de comunicar de forma fiável e rápida, levou ao surgimento de redes complexas de comunicação que asseguram quase instantaneamente meios de comunicação entre variadíssimos locais, independentemente da sua localização geográfica.

De modo a comunicar de forma mais eficaz entre locais remotos e possibilitar que a informação pudesse percorrer amplas distâncias sem que o seu conteúdo se degradasse, começaram a utilizar-se ondas electromagnéticas sinusoidais variantes, denominadas de portadoras, onde se mapeava a informação através de um processo de modulação. O sinal obtido adquiria assim características melhores, nomeadamente maior robustez às interferências e podia ser enviado através do canal de informação sendo posteriormente desmodulado no receptor. Como a quantidade de informação que se pode transmitir é directamente proporcional ao intervalo de frequências onde a portadora opera, um aumento da frequência dessa portadora teoricamente aumenta a largura de banda de transmissão disponível, ou seja, permite um fluxo de informação maior. Este simples facto levou a que progressivamente se fossem utilizando frequências cada vez mais altas (comprimentos de onda mais pequenos).

Assim, foram-se definindo intervalos de utilização de frequências cada vez mais elevados até que se atingiu um limite, tendo em conta os meios que se tinha para a transmissão. Surgiu então uma nova tecnologia: a tecnologia óptica.

A descoberta desta tecnologia foi, sem dúvida, um dos marcos da tecnologia das comunicações. Trata-se de um conceito radicalmente novo em que impulsos luminosos em vez de impulsos eléctricos caracterizam a informação e daí advém um aumento estrondoso de velocidade e de capacidade de comunicação. Os sistemas ópticos eram inicialmente apenas constituídos pelas fontes ópticas, o meio de transmissão – a fibra óptica - e por fotodetectores.

Todo o restante processamento era feito por componentes electrónicos. Actualmente surgiram diversos componentes totalmente ópticos que tiram cabal partido dos enormes recursos que esta tecnologia oferece, proporcionando a possibilidade de restauração do sinal, encaminhamento de comunicação, comutação de informação entre vários canais da rede, controlo de tráfego, etc. No entanto existem ainda bastantes sistemas em desenvolvimento que permitirão, num futuro próximo, retirar ainda melhor partido da tecnologia óptica.

As redes de comunicação baseadas em tecnologias ópticas, oferecem uma solução bastante eficiente para a crescente procura de largura de banda. No entanto, a evolução destes sistemas ópticos tem tido como objectivo as longas distâncias. Assim sendo os sistemas a curtas distâncias ainda têm muito para ser explorado.

Dentro destes objectivos de curta distância, técnicas como a multiplexagem/desmultiplexagem do comprimento de onda (WDM) têm sido consideradas como favoritas, e é sobre esta técnica WDM utilizando como dispositivo uma estrutura p-i-n baseada em a-Si:H e/ou a-SiC:H na configuração simples ou empilhada que se irá debruçar esta investigação.

### **1.1 - Enquadramento**

Os sistemas de comunicação óptica convencionais utilizam as fibras ópticas como canal de transmissão e díodos emissores de luz (LEDs) ou díodos laser para o emissor. Como na região dos infravermelhos as fibras ópticas exibem menor atenuação e dispersão, a transmissão utiliza este intervalo espectral. A fim de aumentar a capacidade de transmissão e de permitir comunicações bidireccionais na fibra óptica, utiliza-se a multiplexagem por divisão no comprimento de onda (WDM) [1]. A multiplexagem é a transmissão simultânea de dois ou mais sinais, com diferentes comprimentos de onda, usando o mesmo canal de comunicação, que neste caso é a fibra óptica. Um sistema WDM utiliza um multiplexer no transmissor para juntar os sinais ópticos e um demultiplexer no receptor para recuperar os sinais ópticos transmitidos.

Para a comunicação óptica no domínio do visível, utilizam-se fibras ópticas de polímero (POF) [2,3] pois estas apresentam menor atenuação nesta região do espectro.

Em comparação com as fibras de vidro, as POF oferecem maior eficiência, melhor flexibilidade na instalação e baixo custo. Estas características abriram novas possibilidades para os sistemas de comunicação de curta distância.

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

Neste trabalho apresentam-se resultados sobre a otimização de uma heteroestrutura de multicamadas de a-Si:H/a-SiC:H, para a multiplexagem por divisão no comprimento de onda, no espectro visível.

O sistema previsto centra-se na comunicação a curta distância através de fibras ópticas de plástico como por exemplo ligações internas de pequenas empresas, redes domésticas e redes de transmissão de informação em veículos, bem como aplicações industriais devido ao baixo custo associado às tecnologias envolvidas (a-Si:H/a-SiC:H e POF).

## 1.2 - Apresentação da tese

Neste trabalho, realiza-se multiplexagem/demultiplexagem para a transmissão de sinais ópticos (domínio do visível) recorrendo à utilização de um dispositivo optoelectrónico. O estudo do dispositivo revela-se de grande interesse, devido as características obtidas, na demultiplexagem.

O capítulo 2 apresenta uma descrição dos dispositivos semicondutores para a detecção de radiação. Faz-se um enquadramento teórico dos fotodíodos e caracteriza-se o dispositivo p-i-n/p-i-n constituído por filmes finos de semicondutores baseados em silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) e ligas amorfas de siliceto de carbono (a-SiC:H).

No capítulo 3 é descrita a caracterização optoelectrónica do dispositivo, realizada com fontes de luz moduladas monocromáticas na região do espectro visível. As tarefas experimentais desenvolvidas nesta fase contemplaram a determinação das características corrente-tensão (I-V) em regime DC e AC sob diferentes condições de iluminação (comprimento de onda e potência), a determinação e análise das características de responsividade versus comprimento de onda (resposta espectral) no domínio do visível sob diferentes tensões de polarização aplicadas, e a análise em frequência.

No capítulo 4 é apresentada a caracterização do dispositivo p-i-n/p-i-n para multiplexagem e demultiplexagem de sinais.

O dispositivo foi testado tendo em conta a caracterização do sinal de saída para sinais ópticos de diferentes comprimentos de onda do espectro visível; a análise do sinal de saída em função da tensão aplicada; e a análise em frequência do sinal de saída.

No capítulo 5 descreve-se o modelo desenvolvido para o processo de multiplexagem e demultiplexagem no espectro visível tendo em vista a utilização de vários canais para a transmissão de sinais. É apresentado o diagrama de blocos funcional e descrição dos módulos multiplexador e demultiplexador. Descreve-se a aplicação desenvolvida em LabVIEW para recuperação do sinal.

Por fim no Capítulo 6 são apresentadas algumas dificuldades encontradas que limitam o desempenho do dispositivo bem como algumas soluções para as ultrapassar. É dado também, um pequeno parecer crítico sobre o próprio LabVIEW e até que ponto correspondeu às expectativas iniciais. Por último, apresentam-se algumas perspectivas de trabalho futuro.

### **1.3 - Grandezas Frequentemente Utilizadas**

Carga do electrão,  $q$ :  $1,6 \times 10^{-19}$  C.

Constante de Plank,  $h$ :  $6,63 \times 10^{-34}$  Js ou  $4,14 \times 10^{-15}$  eV

Hiato energético do silício monocristalino,  $E_g$ : 1,1 eV.

Massa do electrão,  $m_e$ :  $9,11 \times 10^{-31}$  kg.

Velocidade da luz no vazio,  $c$ :  $3 \times 10^{10}$  cm/s (=  $3 \times 10^8$  m/s).

### **1.4 - Referências**

[1] - Michael Bas, Fiber Optics Handbook, Fiber, Devices and Systems for Optical Communication, Chap, 13, Mc Graw-Hill, Inc. 2002.

[2] - Mark G. Kuzyk, Polimer Fiber Optics, Materials Physics and Applications, Taylor and Francis Group, LLC; 2007.

[3] - O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow, W. Daum, POF Handbook, Optical Short Range Transmission Systems, Springer, 2nd Ed., 2008.

## Capítulo 2 - Dispositivos Semicondutores para detecção de radiação

Os dispositivos semicondutores constituem, sem dúvida alguma, uma verdadeira revolução no campo da tecnologia dos componentes electrónicos. Os dispositivos semicondutores têm revelado uma grande importância para a detecção da luz visível.

A luz (ou radiação) de diferentes c.d.o. possui diferentes energias e diferentes propriedades de interacção com a matéria. A detecção da radiação é feita com base nesta interacção. Por exemplo, a detecção da luz visível pode fazer-se na retina do olho, a detecção de radiação infravermelha pode ser feita com a pele (calor), a luz ultravioleta com uma célula foto-eléctrica (efeito de ejeção de electrões de um metal iluminado). As ondas de rádio são detectadas com antenas, a passagem da onda induz uma oscilação de electrões, a qual constitui uma corrente eléctrica ou voltagem.

Para que haja detecção da luz do visível por dispositivos semicondutores é necessário conhecer as suas características e quais os materiais mais apropriados.

O silício é o elemento mais abundante na Terra sendo obtido a partir de SiO<sub>2</sub> (sílica). Este material é um semiconductor cujas propriedades físicas e químicas possibilitaram a produção de um dos grandes inventos do séc. XX por exemplo o transistor (1947). Devido ao desenvolvimento da indústria da Micro electrónica foi possível produzir dispositivos de reduzidas dimensões dos circuitos integrados.

O silício amorfo hidrogenado é um material de grande interesse tecnológico, dadas as aplicações futuras em que pode vir a ser utilizado, nomeadamente células solares de baixo custo, transístores de película fina, sensores de cor, sensores de imagem, electrofotografia, sensores de gases, etc..

O silício amorfo hidrogenado é um semiconductor amorfo, em que a rede é constituída por átomos de silício ligados entre si através de ligações covalentes, e por uma pequena percentagem de átomos de hidrogénio ligados ao silício [1].

Nos materiais amorfos nem todas as ligações são preenchidas, o que dá origem a ligações flutuantes que constituem centros de armadilhamento e/ou recombinação de portadores de carga.

O estabelecimento de ligações de hidrogénio/silício permitem eliminar estas ligações flutuantes, o que contribui para reduzir o número de defeitos do material e favorecer as suas propriedades de condução eléctrica e de absorção óptica, uma vez que a mobilidade dos portadores é maior. O hidrogénio desempenha assim um papel muito importante na passivação das ligações flutuantes.

O hidrogénio pode incorporar-se na matriz amorfa de silício de várias formas. O modo mais comum é em zonas substitucionais isoladas, em que um átomo de silício pode estabelecer ligações com um, dois ou três átomos de hidrogénio originando a formação de grupos SiH,  $SiH_2$  ou  $SiH_3$ , respectivamente. A presença de grupos  $SiH_2$  e  $SiH_3$  dá origem a uma certa deformação da rede, pois como não são mais volumosos que o grupo SiH necessitam de mais espaço para se acomodarem. Estes grupos deterioram as propriedades optoelectrónicas do material.

Em determinadas condições de deposição, o hidrogénio pode ainda incorporar-se na rede amorfa sob a forma de cadeias de polímeros, em que grupos  $(SiH_2)_{n>1}$  se ligam entre si ao longo da rede formando cadeias longas de polissilanos. Estas cadeias são responsáveis pela deterioração das propriedades das películas. O hidrogénio pode ainda ligar-se ao silício através de superfícies internas existentes na malha. Quando um átomo de silício estabelece as quatro ligações covalentes que lhe são possíveis, diz-se que as ligações são saturadas. Quando existem ligações por estabelecer, estas dizem-se flutuantes.

Em determinadas condições de deposição, o silício hidrogenado amorfo apresenta uma estrutura porosa, devido à formação na rede de microvazios, que favorecem a oxidação das películas, pois a porosidade da estrutura facilita a incorporação do oxigénio. Os microvazios tal como as cadeias de polímeros e grupos  $SiH_2$  e  $SiH_3$  podem deteriorar as propriedades optoelectrónicas das películas.

O silício amorfo hidrogenado é um material semicondutor com uma fotocondutividade e uma mobilidade dos portadores de carga muito superior à do silício amorfo, devido à passivação, pelo hidrogénio atómico, das ligações flutuantes (“dangling bonds”). A Figura 1 ilustra as ligações para o silício amorfo hidrogenado.

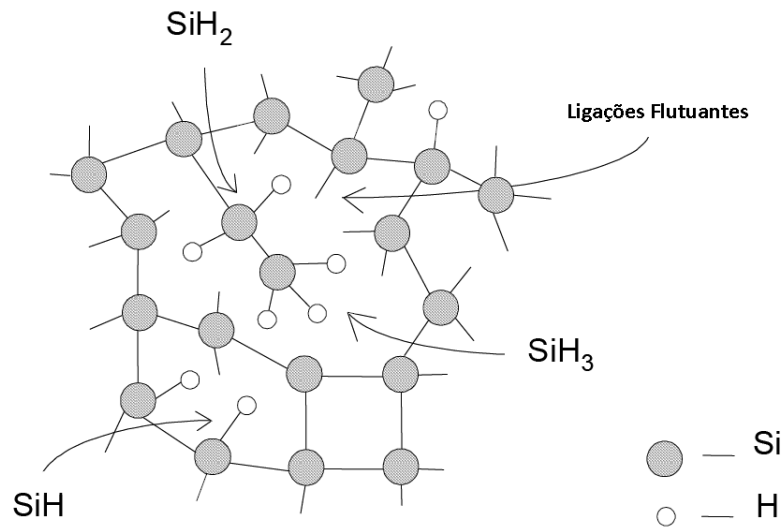


Figura 1- Ligações químicas do silício amorfo hidrogenado.

Nos semicondutores amorfos a desordem estrutural e composicional modifica a distribuição de estados de energia, relativamente aos semicondutores cristalinos. Uma das principais diferenças reside no aparecimento de uma distribuição contínua de estados de energia entre a banda de valência e a banda de condução, ao passo que nos semicondutores cristalinos a densidade de estados na banda proibida é nula.

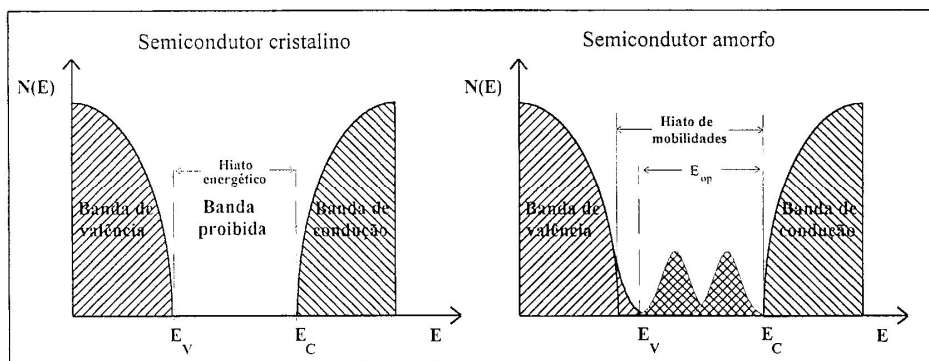


Figura 2 - Diagrama da densidade de estados de energia de um semicondutor cristalino e amorfo (modelo de Mott).

Os níveis Energia de valência  $E_v$  e Energia de condução  $E_c$  representam as energias do topo da banda de valência e do fundo da banda de condução, a densidade de estados de energia  $N(E)$  representa a densidade de estados associados a cada nível de energia. Nos materiais amorfos deixa de existir banda proibida, à qual correspondia nos semicondutores cristalinos um hiato energético.

A excitação de portadores da banda de valência para a banda de condução passa então a estar associada a um pseudo-hiato energético, denominado hiato óptico ou hiato de mobilidades. Deste modo, nos semicondutores amorfos o hiato energético, característico dos semicondutores cristalinos, é substituído por um hiato de mobilidades. Os estados energéticos do hiato de mobilidades denominam-se estados localizados ou estados profundos, e estão associados à presença de defeitos, como por exemplo ligações flutuantes, ligações não compensadas, etc., que funcionam como armadilhas e/ou centros de recombinação de portadores.

Nos semicondutores amorfos os limiares das bandas de valência e de condução deixam também de ser abruptos, para terem um decrescimento acentuado. Os estados energéticos associados à cauda da banda de valência e da banda de condução denominam-se estados superficiais. De um modo geral, a cauda da banda de valência é mais larga que a da banda de condução, o que se deve ao facto da energia de ligação dos estados ligantes ser mais sensível a flutuações angulares da estrutura que a dos anti-ligantes. Os estados da banda de valência e da banda de condução denominam-se estados extensos ou deslocalizados.

O silício amorfo hidrogenado, apesar de possuir propriedades eléctricas inferiores às do silício cristalino, tem a vantagem de possuir um elevado coeficiente de absorção óptica no espectro visível como se ilustra na Figura 3.

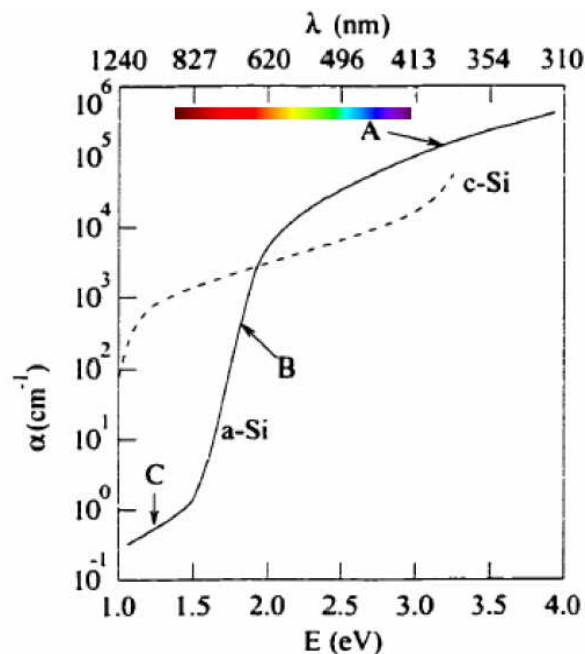


Figura 3 - Espectro de absorção óptica de um filme a-Si:H.

A curva de absorção óptica de um semiconductor amorfo Figura 3 pode-se dividir-se, basicamente, em três regiões distintas às quais estão associados os diferentes processos de absorção que correm no semiconductor amorfo.

A região A do espectro de absorção corresponde à zona de forte absorção ( $\alpha > 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ) em que os portadores dos estados deslocalizados efectuem transições da banda de valência para a banda de condução (transição 1 da Figura 4). Nesta região, a curva de absorção tem um andamento quadrático.

A região B corresponde à zona de média absorção ( $\alpha$  compreendido entre  $10^0 \text{ cm}^{-1}$  e  $10^3 \text{ cm}^{-1}$ ) vulgarmente designada por região de absorção exponencial ou limiar de Urbach, uma vez que o andamento corresponde a transições dos estados da cauda da banda de valência para a banda de condução (transição 2 da Figura 4), o que está relacionado com a desordem estrutural do material. A absorção é descrita por [2]:

$$\alpha(E) = \alpha_0 \cdot e^{(E/E_0)} \tag{1}$$

em que:

$\alpha(E)$  - Coeficiente de absorção em função da energia;

E - energia

$E_0$  - Energia de Urbach;

$\alpha_0$  - Coeficiente de absorção à energia nula.

Nesta aproximação, a energia de Urbach traduz a largura energética associada à densidade de estados da cauda da banda associada ao transporte de portadores de carga maioritários. Para películas intrinsecas amorfas de “boa qualidade” este valor ronda os 50 m eV.

A região C corresponde à região de fraca absorção em que  $\alpha$  ronda os  $10^0 \text{ cm}^{-1}$ . Está associada à absorção de fótons, nos estados localizados do hiato de mobilidades, e corresponde a transições de portadores de carga dos estados localizados, para os estados superficiais da cauda da banda de condução (transição 3 da Figura 4).

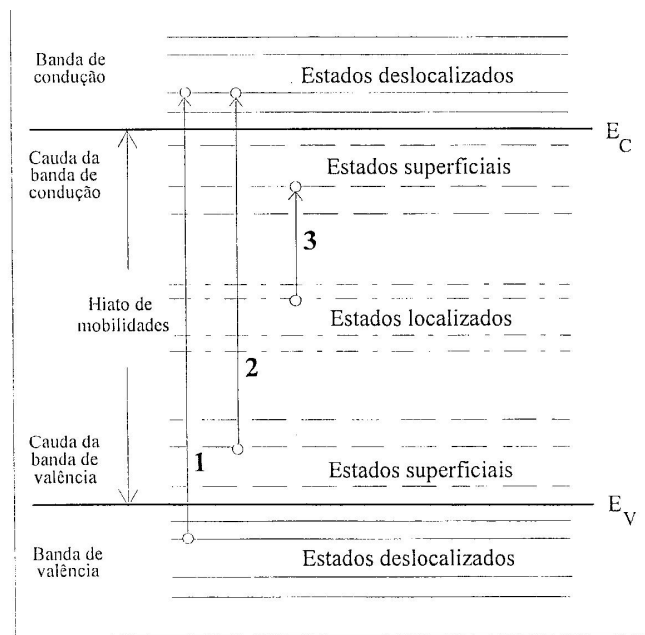


Figura 4 – Transições entre estados de energia durante os processos de absorção dos semicondutores amorfos.

A comparação eléctrica das propriedades para c-Si e a-Si:H está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do *c-Si* e *a-Si:H*<sup>1</sup>.

	<i>c-Si</i>	<i>a-Si:H</i> <sup>2</sup>
Banda de valência (eV)	1.1	1.7-1.8
Condutividade a 300 K ( $\Omega^{-1}cm^{-1}$ )	$4 \times 10^{-6}$	$10^{-11}$
Mobilidade dos electrões à deriva ( $cm^2V^{-1}S^{-1}$ )	$10^3$	1.0
Mobilidade das Lacunas à deriva ( $cm^2V^{-1}S^{-1}$ )	$10^{-2}$	$10^{-3} - 10^{-2}$
Permitividade	11.9	$\approx 11.9$

<sup>1</sup> O valor exacto para o a-Si:H depende das condições do depósito. Estes valores de referência são bons para a qualidade electrónica do a-Si:H [3].

<sup>2</sup> Concentração do hidrogénio: 10 at %

Comprimento da difusão do Electrão ( $\mu\text{m}$ )	300	< 10
Comprimento da difusão da Lacuna ( $\mu\text{m}$ )	200	$\approx 0.1$
Media do tempo de vida do Electrão (ões)	$2.5 \times 10^{-3}$	$10^{-6}$
Media do tempo de vida da Lacuna (s)	$2.5 \times 10^{-3}$	$10^{-6}$

O silício amorfo hidrogenado pode ser depositado uniformemente de um modo bastante mais económico, tecnologicamente menos exigente e sobre uma grande variedade de substratos tais como vidro, metais, polímeros e cerâmicas.

Estas características do silício amorfo hidrogenado estimularam a utilização num vasto campo de aplicações, tais como em transístores de filme fino usados nos painéis de cristais líquidos a cores, em sensores de imagem e de radiação, e em células solares foto voltaicas, etc. [4]

## 2.1 - Técnicas de decomposição química de vapores assistida por um plasma de r.f. (PECVD)<sup>3</sup>

Existem diversos métodos para a deposição de filmes finos de a-Si:H. A técnica de descargas luminosas de rádio frequência é um dos processos de deposição mais usados, que permite obter filmes com boas propriedades optoelectrónicas.

Esta técnica baseia-se na decomposição de uma mistura gasosa induzida pela formação de um plasma gerado por descarga luminosa de r.f. acoplada ao gás [5] [6].

Esta técnica é conhecida por PECVD (“Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition”) [7] e tem sido usada para depositar vários tipos de materiais, em particular o silício amorfo, micro ou nano cristalino hidrogenado (a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ / $\text{nc-Si:H}$ ), a partir de misturas gasosas à base de hidrogénio.

---

<sup>3</sup> “Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition” – PEVCD, na terminologia Inglesa

Os processos responsáveis pela deposição, começam pela dissociação do silano e do hidrogénio molecular por impacto electrónico, com a consequente criação de espécies neutras (moléculas, radicais) e carregadas (electrões, iões), cujos choques com a superfície do substrato aquecido dão origem ao processo de crescimento do filme. No substrato aquecido os radicais são absorvidos, sendo incorporados no filme ou recombina-se dando origem a espécies estáveis que regressam ao plasma, dependendo das probabilidades de adesão na superfície [8] [9] [10] [11].

## 2.2 - Espectro electromagnético

Segundo a literatura, a palavra espectro (do latim "spectrum", que significa fantasma ou aparição) foi usada por Isaac Newton, no século XVII, para descrever a faixa de cores que apareceu, quando numa experiência a luz do Sol atravessou um prisma de vidro e viu refractadas as várias cores. Actualmente chama-se espectro electromagnético à faixa de frequências e respectivos comprimentos de ondas que caracterizam os diversos tipos de ondas electromagnéticas. A gama do espectro electromagnético estende-se desde os raios cósmicos até às ondas de radiofrequência, com comprimentos de onda de  $10^{-14}$  m a  $10^4$  m, respectivamente, ilustrado na Figura 5. Para a detecção da radiação electromagnética os dispositivos a utilizar são influenciados pela região espectral onde se centra o interesse da medida.

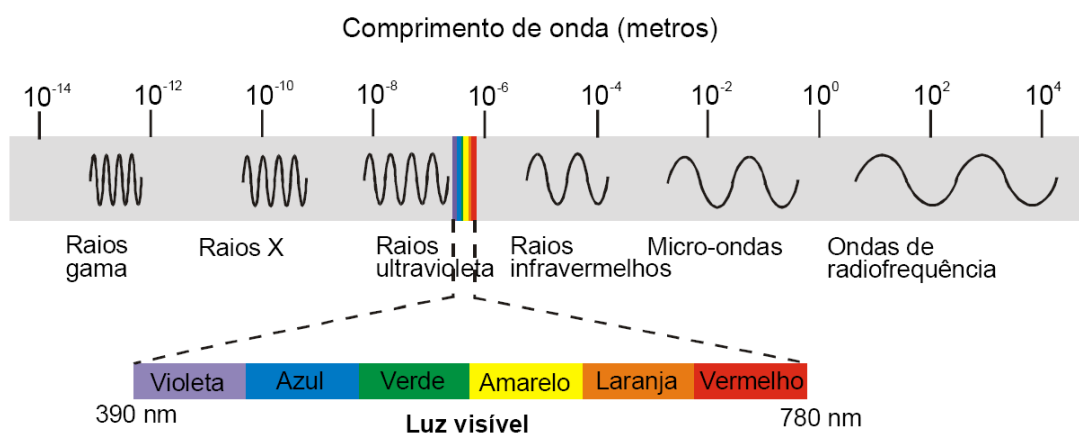


Figura 5 – Espectro electromagnético [12].

A Luz visível, que é detectável pelo olho humano, é constituída por um intervalo de comprimentos de onda que varia entre os 400 nm até 700 nm.

Aos comprimentos de onda mais altos do espectro correspondem a cor vermelha e ao outro extremo corresponde a cor violeta. No entanto existem outras cores dentro do espectro: laranja, amarelo, verde, azul e azul-escuro.

Na Figura 6 está ilustrado o espectro electromagnético para região do visível com os respectivos comprimentos de onda para as diferentes cores que o constituem.

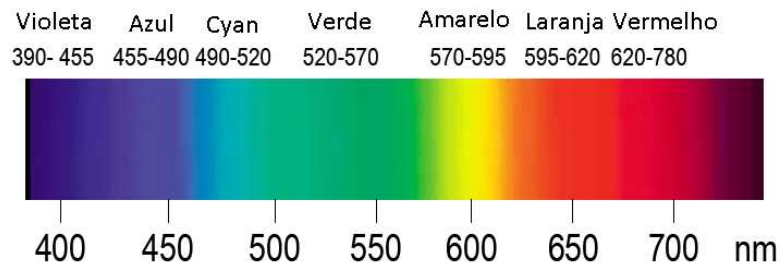


Figura 6 – Espectro do Visível.

A radiação electromagnética propaga-se como ondas electromagnéticas e como partículas (fotões). A distância entre dois picos adjacentes da onda é definida como o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da luz (  $Y$  é a amplitude da onda).

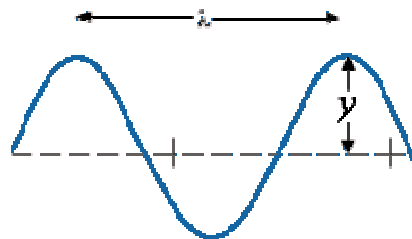


Figura 7 – Comprimento de onda.

O comprimento de onda  $\lambda$  (m) relaciona-se com a frequência  $f$  (Hz) e a velocidade, segundo a equação (2). O comprimento de onda é igual à velocidade da onda dividida pela frequência da onda. Quando se lida com radiação electromagnética no vácuo, essa velocidade é igual à velocidade da luz 'c', para sinais (ondas) no ar, essa velocidade é a velocidade a que a onda viaja. Esta relação é dada por:

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2}$$

onde,  $\lambda$  é o comprimento de onda electromagnética,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo (299.792,458 km/s), arredondando este valor fica-se com 300.000 km/s que é igual a 300.000.000 m/s ou  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  e  $f$  corresponde à frequência da onda [1/s] ou [Hz].

A velocidade de uma onda pode portanto ser calculada com a seguinte fórmula:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (3)$$

$v$  = velocidade da onda [ $\text{m/s}^{-1}$ ] e  $T$  é o período da onda [s].

O inverso do período,  $1/T$  [ $\text{s}^{-1}$ ], é chamado de frequência de onda [Hz]:  $F=1/T$  e mede o número de ciclos (repetições) por segundo executados pela onda. É medida em Hertz (ciclos/segundo).

Para caracterizar uma onda, portanto, é necessário conhecer apenas duas quantidades, a velocidade e o comprimento de onda ou a frequência e a velocidade, já que a terceira quantidade pode ser determinada da equação acima.

Quando ondas de luz (e outras ondas electromagnéticas) entram num dado meio, o seu comprimento de onda é reduzido por um factor igual ao índice de refração  $n$  do meio, mas a frequência permanece inalterada. O comprimento de onda no meio,  $\lambda$  é dado por:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (4)$$

onde,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da onda no vácuo. Para o caso do ar o  $n=1$ , desta forma  $\lambda = \lambda_0$ . Caso o meio de propagação se altere, o valor de  $n$  também altera, assim o valor do comprimento de onda varia consoante o meio de propagação.

## 2.3 - Fotodíodo

O fotodíodo é um dispositivo semiconductor, de junção baseado em função p-n ou p-i-n utilizado, para a detecção de radiação luminosa. Num material semiconductor do tipo p os portadores maioritários são as lacunas no sentido em que existem mais lacunas disponíveis para a condução do que electrões. Já para o material semiconductor do tipo n verifica-se o contrário, existem mais electrões livres do que lacunas para a condução.

No momento em que estes dois tipos de semicondutores são unidos, e devido à agitação térmica, dá-se na região de junção um fenómeno de recombinação dos electrões em excesso do material n com as lacunas em excesso do material p. Como resultado verifica-se, em ambos os lados da superfície de contacto, uma redução da concentração dos portadores de carga livres. Mais ainda verifica-se que, em torno da junção, existe uma região no material do tipo p em que predominam electrões e uma região no material do tipo n em que predominam lacunas.

Os iões positivos na região n e os iões negativos na região p produzem um campo eléctrico que se opõe à difusão de cargas adicionais através dessa barreira de potencial. Desta forma obtém-se um equilíbrio entre a corrente de difusão e a corrente induzida por esse campo eléctrico não se verificando, em regime estático, a passagem de portadores de carga de um material para outro.

O fotodíodo funciona no modo fotovoltaico (polarização directa) ou no modo fotocondutivo (polarizado inversamente).

O fotodíodo é um dispositivo de dois terminais, designados de cátodo (lado n) e o ânodo (lado p), em que o modo de polarização é idêntico ao de uma junção díodo normal. Isto é, em polarização directa o ânodo está ligado ao terminal positivo e em polarização inversa, o ânodo está ligado ao terminal negativo da fonte de excitação.

Na polarização directa o pólo positivo atrairá os electrões livres do lado N, fazendo-os vencer a barreira de potencial, originando assim uma corrente de electrões do pólo negativo para o positivo da bateria, sendo esta última adoptada, para fins de análise, em circuitos com dispositivos semicondutores. Neste caso, o material tem características condutivas, pois apresenta uma resistência ohmica de valor baixo (na ordem de algumas dezenas de ohm) permitindo a circulação de uma corrente. Devido aos iões formados na barreira, aparecerá uma diferença de potencial entre os terminais de junção, que para os semicondutores de silício está compreendida entre 0,5 V e 0,8V.

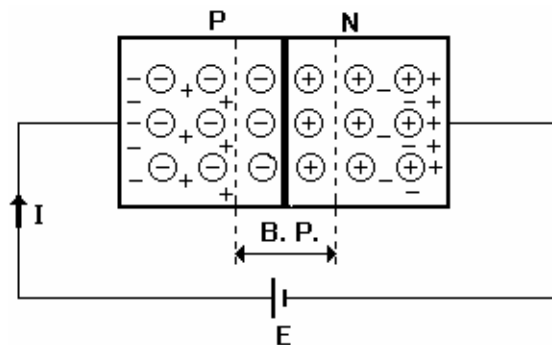


Figura 8 – Junção PN directamente polarizada.

Entende-se por efeito fotovoltaico o efeito pelo qual a radiação electromagnética associada a um feixe luminoso é convertida em energia eléctrica (corrente e tensão) ao incidir na superfície de uma dada junção semicondutora. No processo de conversão, a energia da luz incidente forma cargas móveis (livres) no semiconductor as quais são separadas dentro do dispositivo pelo campo eléctrico da junção, produzindo uma corrente eléctrica externa. No modo fotovoltaico, o fotodíodo funciona com polarização directa conforme foi descrito acima.

A polarização inversa consiste em ligar o pólo positivo de uma fonte ao lado N e o negativo ao lado P, conforme mostra a Figura 9.

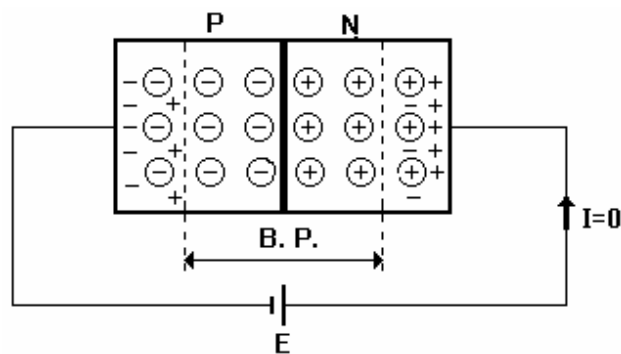


Figura 9 – Junção PN inversamente polarizada.

Neste tipo de polarização, o pólo positivo atrairá os electrões e o pólo negativo as lacunas, aumentando assim a barreira de potencial. Portanto, não haverá condução de corrente eléctrica devido aos portadores maioritários, existindo apenas uma corrente devido aos portadores minoritários (denominada de corrente de fuga) que para o semiconductor de silício é da ordem dos nanoamperes (nA) tornando-se desprezável. Neste caso, o material apresentará características isolantes pois, devido ao aumento da barreira de potencial, não haverá corrente, sendo sua resistência ohmica e de elevado valor.

No modo fotocondutivo a junção é polarizada inversamente e o dispositivo funciona como uma fonte de corrente controlada pela luz.

O transdutor fotocondutivo não é mais do que uma resistência feita de material do tipo semiconductor cujo valor é dependente da intensidade luminosa que sobre ele incide. Isto é, quanto maior for a intensidade do feixe luminoso incidente, menor será o seu valor. Os seus valores variam de várias ordens de grandeza, apresentando normalmente uma resistência elevada nas condições de forte iluminação (quase curto circuito). O tipo de semiconductor a utilizar é em função do comprimento de onda da luz a utilizar.

Para utilizações no visível ou do infravermelho próximo, utiliza-se o silício cristalino ou amorfo. Nestes casos, para baixos níveis de iluminação, existe uma relação linear entre o fotocorrente e o nível da intensidade luminosa utilizada. Quando se utilizam intensidades luminosas muito elevadas, a relação deixa de ser linear. No extremo, a foto-corrente varia com a raiz quadrada da intensidade luminosa utilizada. Este tipo de dispositivos é utilizado como sensor óptico, nomeadamente em sistemas de abertura e fecho de circuitos, por interrupção de um feixe de luz, tal como acontece com a abertura e fecho de muitas portas, de forma automática.

Desta forma, como estamos a estudar um dispositivo baseado em heteroestruturas p-i-n de filme fino amorfo vamos incidir o estudo sobre o fotodíodo PIN (P-dopado, I-intrínseco, N-dopado) e no modo de funcionamento fotocondutivo.

### 2.3.1 - Fotodíodo PIN.

O fotodíodo PIN é um fotodíodo PN com material intrínseco colocado entre o material tipo p e tipo n e opera com polarização inversa, de modo que os fotões incidentes são absorvidos numa região de depleção contendo um campo eléctrico muito intenso. A presença deste campo eléctrico assegura que os pares electrão/lacuna criados a partir dos fotões absorvidos sejam rapidamente separados e colectados nos terminais do fotodetector antes de ocorrer a sua recombinação. A Figura 10 ilustra o esquema equivalente de um fotodíodo p-i-n.

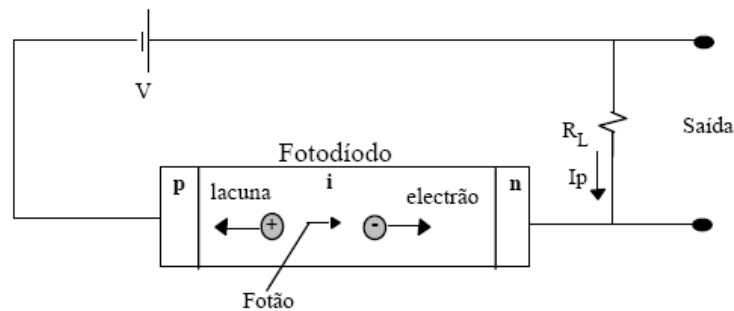


Figura 10 – Esquema Equivalente de um Fotodíodo PIN.

O fotodíodo p-i-n baseado em silício amorfo hidrogenado é usado como um dispositivo fotosensor e tira partido da alta eficiência quântica, da baixa corrente de polarização inversa e da heteroestrutura de finos filmes. A Figura 11 ilustra a estrutura comum do a-Si:H.

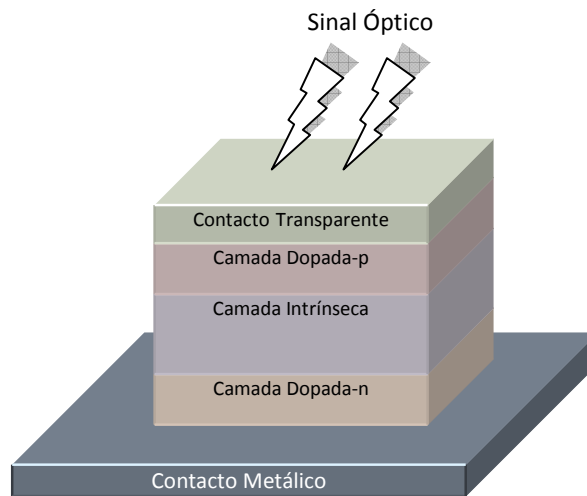


Figura 11 – Estrutura do fotodíodo p-i-n baseado em a-Si:H.

A heteroestrutura é constituída por uma camada muito fina dopada do tipo p e de uma camada dopada do tipo n. Entre estas existe uma camada intrínseca mais espessa.

O campo eléctrico (magnético) é uma grandeza vectorial que é definida em qualquer ponto do espaço e em cada instante, que (para excitações variáveis no tempo) se propaga sob a forma de uma onda (onda electromagnética) e que transporta energia no vácuo (ar). Permite transmitir informação a grandes distâncias sem a necessidade de existência de qualquer suporte material.

### 2.3.2 - Princípio da detecção óptica.

O princípio da detecção óptica do fotodíodo baseia-se na absorção óptica, isto é, quando um feixe de luz incide no dispositivo semiconductor, a luz pode ser absorvida (ou não) dando origem à geração de portadores de carga.

A energia de um fóton é inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz,

$$E = hv = h \frac{c}{\lambda} \quad (5)$$

donde, E é a energia de um fóton em Joules e h é a constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  J s ou  $4,14 \times 10^{-15}$  eV).

A unidade de trabalho ou energia, chamada electrão-Volt (eV) é definida como:

$$1 \text{ eV} \equiv 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (6)$$

O joule (J) é a unidade de energia do sistema mks (metro-kilograma-segundo). Nalguns problemas de engenharia esta unidade é muito pequena e utiliza-se um factor de  $10^3$  ou  $10^6$  para converter de Watt ( $1\text{W}=1\text{J/s}$ ) para kilowatt (kW) ou megawatt (MW), respectivamente. Noutros problemas, o joule é uma unidade muito grande e utiliza-se o factor  $10^{-7}$  para converter joules em ergs. Por vezes nos dispositivos electrónicos até o erg é uma unidade muito grande. O nome electrão-Volt advém do facto de que, se um electrão se deslocar de um ponto com um potencial A para outro ponto com um potencial B em que B é 1V inferior ao de A, então a sua energia cinética aumenta com o decréscimo da sua energia de potencial, de um valor.

$$qV=(1.60 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1\text{V})=1.60 \times 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV} \quad (7)$$

onde  $q = 1.60 \times 10^{-19}$  é a carga do electrão [C] e V a tensão aplicada [V].

Salienta-se que a radiação óptica é muitas vezes caracterizada pela sua frequência f, e outras vezes pelo seu comprimento de onda  $\lambda$ , expresso em unidades como Ångstrom ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ), nanómetro ( $1 \text{ nm} = 10^{-9}$ ) ou micrón ( $1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ). Energias associadas aos diversos níveis quânticos, ou transições atómicas, são muitas vezes representadas em unidades de electrão-Volt (eV), ou pelo “número de onda” (este parâmetro é o inverso do comprimento de onda correspondente à frequência da transição). Se a energia da radiação (hc), for superior ao hiato energético do semiconductor então os fótons incidentes são absorvidos formando um par electrão-lacuna. Se  $E_g$  [eV] for o hiato energético do semiconductor, então o comprimento de onda [nm] máximo ou comprimento de onda de corte ( $\lambda_c$ ) que pode ser absorvido é dado por:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (8)$$

Substituindo  $h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV}$  e  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}$  obtemos:

$$\lambda_c = \frac{4,14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{E_g} = \frac{1,24 \times 10^{-6}}{E_g} \quad (9)$$

Tabela 2 – Mostra o comprimento de onda máximo para o Si-c, a-Si:H e a-SiC:H.

	$E_g$ (eV)	$\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )
Si-c	1,11	1,12
a-Si:H	1,8	0,69
a-SiC:H	2,1	0,59

Ao utilizar-se um fotodetector de a-Si:H e a-SiC:H para a detecção da luz visível obtêm-se comprimentos de onda máximos de  $0,69 \mu\text{m}$  e  $0,59 \mu\text{m}$  o que influencia a detecção da luz azul e vermelha.

Quando um fóton incidente tem energia maior ou igual ao hiato energético entre bandas ("band-gap") do semiconductor utilizado, o fóton fornece energia e excita um electrão da banda de valência fazendo-o deslocar para a banda de condução. Este processo gera pares electrões livres / lacunas que se designam fotoportadores.

Este processo é representado de uma forma esquemática na Figura 12.

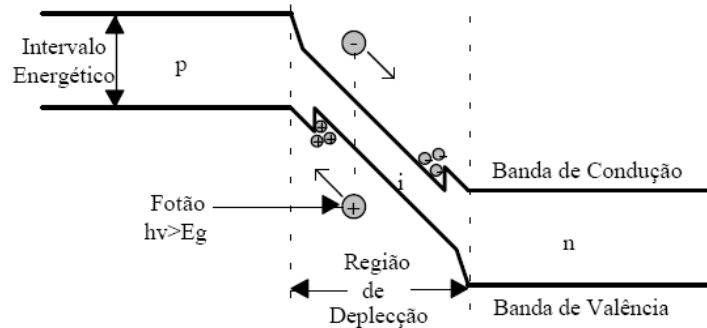


Figura 12 – Diagrama das Bandas de Energia de um Fotodíodo PIN com Heterojunção.

O elevado campo eléctrico na região de depleção faz com que os portadores se separem e sejam recolhidos pelos terminais da junção inversamente polarizada. Este movimento de cargas provoca um fluxo de corrente no circuito exterior, designada por fotocorrente.

Por estas razões, os fotodíodo são os mais utilizados em sistemas ópticos devido as suas características.

### 2.3.3 - Responsividade e eficiência quântica.

Um p-i-n ideal deveria original um par electrão/lacuna na região de depleção por cada fóton incidente. Na prática, contudo, isto não se verifica. A eficiência da conversão óptico-eléctrica é caracterizada pelo parâmetro  $\eta$ , designada por eficiência quântica e definida por:

$$\eta = \frac{\text{ritmo de geração de pares electrão - lacuna}}{\text{ritmo dos fótons incidentes}} \quad (10)$$

Nos fotodíodos p-i-n a eficiência quântica é sempre inferior à unidade, já que nem todos os fótons incidentes são absorvidos e originam pares electrão/lacuna. A eficiência quântica depende do material usado para fabricar o fotodíodo e do comprimento de onda da radiação incidente. Existe um comprimento de onda crítico  $\lambda_c$ , acima do qual a eficiência quântica se anula, porque os fótons com esses comprimentos de onda não possuem energia suficiente para gerar pares electrão/buraco. Outra grandeza usada para caracterizar os fotodíodos é a respostividade  $\mathfrak{R}_\lambda$ , a qual relaciona a corrente eléctrica na saída do fotodíodo com a potência óptica nele incidente, vindo

$$\mathfrak{R}_\lambda = \frac{I}{P_0} [A/W] \quad (11)$$

A relação entre a eficiência quântica e a respostividade pode ser obtida atendendo a que

$$\eta = \frac{\frac{I}{q}}{\frac{P_0}{h\nu}} = \frac{h\nu}{q} \mathfrak{R}_\lambda \quad (12)$$

Têm-se, assim, a seguinte expressão para a respostividade

$$\mathfrak{R}_\lambda = \frac{\eta q}{h\nu} = \eta \frac{\lambda}{1,24} \quad (13)$$

onde  $\lambda$  é expresso em micrómetros. Como se pode verificar a respostividade é proporcional a  $\eta$  e a  $\lambda$ .

O material mais apropriados para o fabrico de fotódodos na janela de 0.55-0.60  $\mu\text{m}$  é o Si ( $\mathfrak{R}_\lambda = 0,15 - 0,2 A/W$ ). Como se ilustra na Figura 13 os valores onde existe maior responsividade para o silício é para o comprimento de onda 600 nm.

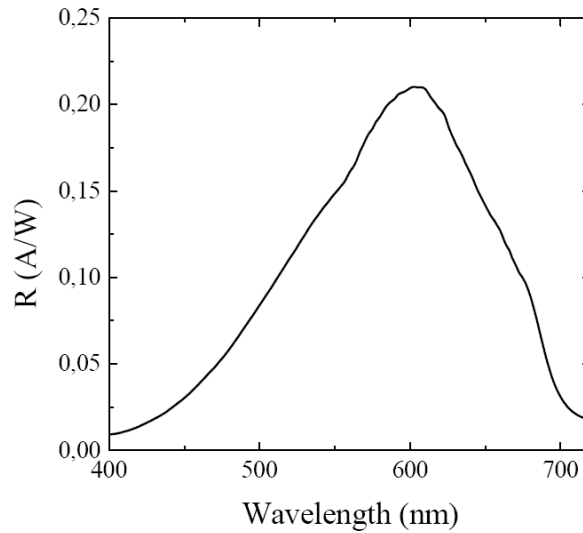


Figura 13 – Curva típica da responsividade para os fotódodos p-i-n de silício.

A eficiência quântica depende de detalhes construtivos dos dispositivos e do comprimento de onda. Na Figura 14 observa-se a relação da eficiência quântica para os comprimentos de onda entre os 400 nm e os 700 nm.

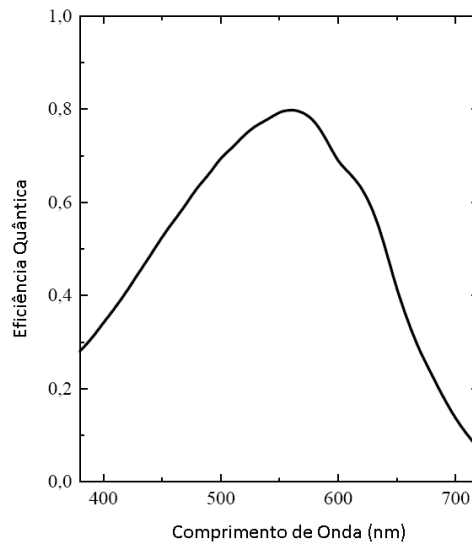


Figura 14 – Curva típica da eficiência quântica para os fotódodos p-i-n de silício.

O maior valor de eficiência quântica corresponde sensivelmente ao comprimento de onda dos 550nm, para o fotodiodo p-i-n de silício.

### 2.3.4 - Efeito da temperatura

A variação da temperatura de um fotodíodo provoca o deslocamento do espectro da  $\eta$  e a sua diminuição na região do ultravioleta, enquanto aumenta, na região próxima do infravermelho. Para além disto, a temperatura faz com que a corrente no escuro aumente e por conseguinte, que a responsividade diminua.

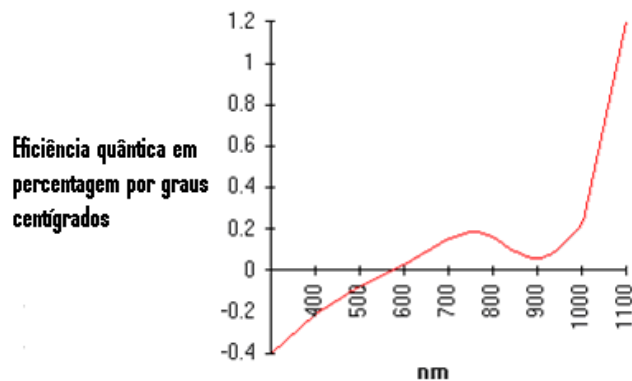


Figura 15 – Variação incremental percentual de  $\eta$  com a temperatura.

### 2.3.5 - Tempo de resposta.

O tempo de resposta e consequentemente a largura de banda do fotodetector depende de três factores:

- Do tempo de transição dos portadores na região de depleção.
- Da resposta em frequência determinada através do circuito RC, que depende da capacidade do díodo.
- Da baixa velocidade de difusão dos portadores fora da região de depleção

Para uma região de depleção com um comprimento  $w$ , tiramos que o tempo de transição é:

$$\tau_t = \frac{w}{V_d} \quad (14)$$

sendo  $V_d$  a velocidade de deriva.

Como podemos observar pela equação, quanto mais pequeno for  $w$  menor será o  $\tau_t$ ; no entanto quanto mais pequeno for  $w$  menor será a eficiência quântica, o que provoca uma menor responsividade. Podemos então concluir que tem de existir um compromisso entre estes factores. A capacidade de um fotodíodo é muito importante. Assim, se  $A$  for a área do díodo e  $w$  o comprimento da região de depleção a capacidade na junção é dada pela equação:

$$C_d = \frac{\epsilon A}{W} \quad (15)$$

com  $\epsilon$  a constante dieléctrica do semiconductor

Assim o tempo de resposta é dado por:

$$t_t = 2,19 R_L C_d = 2,19 R_L \frac{\epsilon A}{W} \quad (16)$$

Como podemos observar, diminuindo o  $w$  reduz-se o rise time, fazendo aumentar a capacidade do díodo. Assim, temos de diminuir  $R_L$  para haver um equilíbrio. A largura de banda de um fotodetector é dada pela equação:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi R_L C_L} \quad (17)$$

Como vimos anteriormente, para diminuirmos o tempo de resposta e aumentarmos a largura de banda temos de diminuir  $R_L$ . Para aumentarmos a eficiência quântica precisamos aumentar o comprimento da região de depleção. Por outro lado aumentamos o tempo de resposta e baixamos a largura de banda. Assim, terá de existir um compromisso entre estes valores.

Uma técnica utilizada, são as heteroestruturas, isto é fotodetectores formados por vários semicondutores de diferentes bandas de energia.

Como exemplo temos heterojunções a-SiC:H/a-Si:H. São geralmente usadas como fotodíodos, uma vez que nestes dispositivos a injeção de portadores é fortemente condicionada pela altura da barreira de potencial proporcionada pelos elevados valores de hiato dos filmes de silício amorfo hidrogenado com carbono incorporado. A natureza da heterojunção a-SiC:H/a-Si:H dá origem a uma acumulação dos portadores fotogerados, de onde resulta a indução através da luz da modulação da barreira de potencial [4].

### 2.3.6 - Circuito eléctrico equivalente e modos de funcionamento do fotodíodo

O fotodíodo pode ser representado pelo circuito equivalente que se segue:

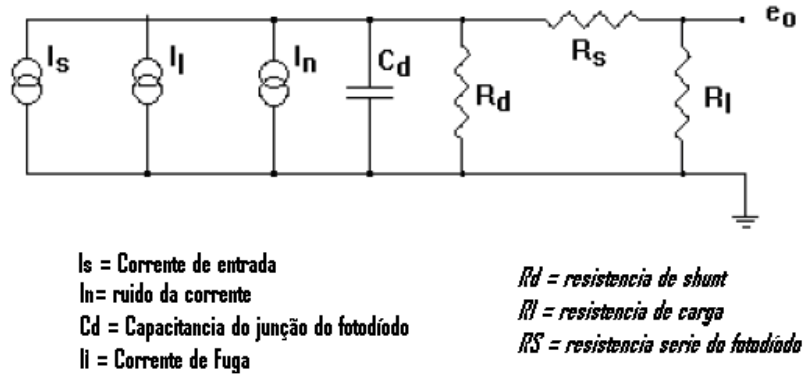


Figura 16 – Circuito eléctrico equivalente de um fotodíodo.

$$e_0 = (I_s + I_l + I_n) \times \frac{R_l R_d}{R_l + R_d + R_s} \quad (18)$$

Fundamentalmente o fotodíodo é um gerador de corrente controlado pela tensão de polarização. Nestes dispositivos, a resistência shunt (paralelo) é normalmente elevada (da ordem dos  $M\Omega$ ), enquanto que a resistência série é muito baixa (da ordem dos Ohm). O efeito a resistência de carga na característica tensão do dispositivo é a que a seguir se mostra.

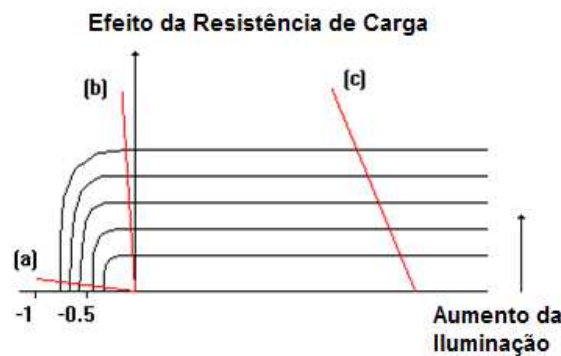


Figura 17 – Curva I-V de um fotodíodo, mostrando o efeito da resistência de carga (linha a vermelho)

Quando o dispositivo funciona na região a) (ver Figura 17),  $R_l \gg R_d$ , diz-se que o mesmo está a funcionar no modo fotovoltaico. Neste caso o valor de  $R_d$  decai exponencialmente à medida que a intensidade de iluminação aumenta.

A maior desvantagem deste modo de funcionamento é que a intensidade do sinal depende da temperatura do dispositivo.

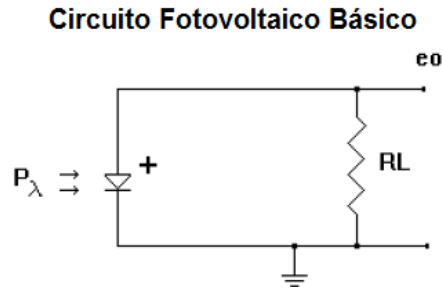


Figura 18 – Circuito fotovoltaico básico

Na região b) o fotodiodo funciona sem polarização,  $R_L \ll R_d$ . Neste caso,  $R_L$  é fixo e a tensão nos terminais da carga varia linearmente com a corrente e portanto, com a intensidade da luz usada.

Uma das formas que existe de se conseguir uma resistência de carga baixa e uma tensão de saída amplificada, é por aplicação do sinal da foto-corrente do fotodiodo a um amplificador diferencial, com uma massa virtual, como se mostra na figura que se segue. Neste caso, o circuito tem uma resposta linear e baixo ruído, devido à eliminação de praticamente todas as correntes de fuga.

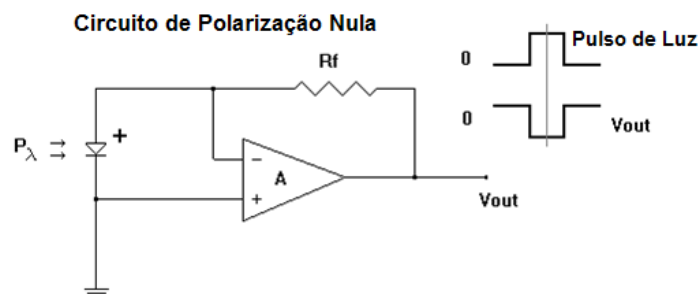


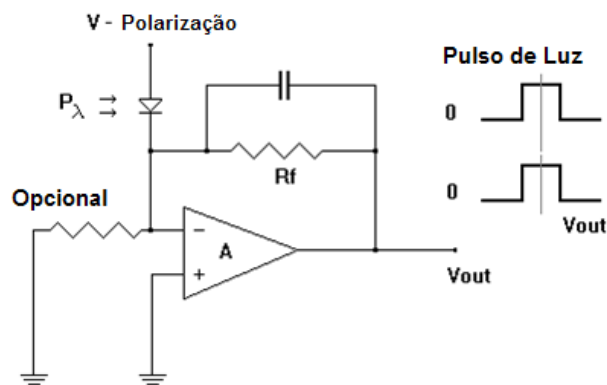
Figura 19 – Circuito de polarização nula

Na região c), o fotodiodo está no modo fotocondutivo, em que a fotocorrente produz uma tensão nos terminais da resistência de carga, ligada em paralelo com a resistência shunt. Uma vez que, em polarização inversa,  $R_d$  se mantém praticamente constante e de valor elevado, pode recorrer-se ao uso de  $R_L$  elevados e obter-se ainda uma resposta linear do dispositivo, em função da intensidade luminosa usada.

Este tipo de circuito é utilizado quando se pretendem tempos de resposta curtos. A principal desvantagem deste modo de funcionamento é o aumento da corrente de fuga devido à tensão de polarização.

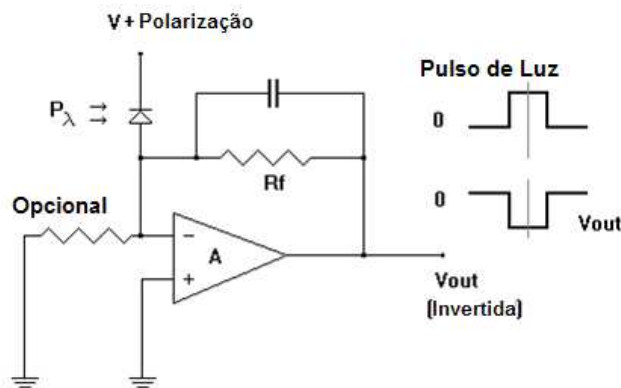
Isto faz com que o ruído seja elevado, quando comparado com o ruído obtido nos outros circuitos já descritos.

**Circuito de Polarização Negativa**



a)

**Circuito de Polarização Positiva**



b)

Figura 20 – Circuitos de polarização de um fotodíodo: (a) polarização negativa; (b) polarização positiva.

## 2.4 - Referências

- [1] - Hirose, M.; em *Hydrogenated Amorphous Silicon* parte A, editado por J.I. Pankove, Academic Press, Orlando (1984) 9;
- [2] - Jackson, W.B.; Amer, N. M.; *Physical Review B* **25-8** (1982 5559);
- [3] R.A. Street, *Hydrogenated amorphous silicon*, Cambridge University Press, UK, 1991
- [4] - C. Koch, M. Ito, M. Schubert, J. H. Werner, “Low-temperature deposition of amorphous silicon based solar cells”, in *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, San Francisco 1999, vol. 575, p. 749.
- [5] - Hudgens, S.J.; Johncock, A. G.; Ovshinki, S. R.; *J. Non-Cryst. Solids* **77-78** (1985 809);
- [6] - J. W. Coburn, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 19(6), 1048 (1991)
- [7] - Langmuir, *Proc. Nat. Acad. Sci. US*, 14, 628 (1928)
- [8] - R. Reif, W. Kern, *Thin Film Processes II*, ed. J. L. Vossen, W. Kern, Academic press, 525 (1991)
- [9] - G. L. Rogoff, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 19(6), 989 (1991)
- [10] - J. L. Vossen, W. Kern, *Thin Film Processes*, Academic press (1978)
- [11] - H. Yasuda, *Plasma Polymerization*, Academic Press (1985)
- [12] - HECHT, E, *Óptica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1991.

## Capítulo 3 - Características optoelectrónicas do fotodetector

A medição das grandezas físicas é uma necessidade. Para essa função são utilizados sensores, estes convertem a grandeza a medir noutra. No caso da instrumentação, a variável de saída é normalmente eléctrica. O sensor, como primeiro elemento da cadeia de medida, é a fonte determinante do sinal eléctrico que o resto da cadeia deve tratar e explorar. É da qualidade do sensor que depende, por um lado, maior ou menor concordância entre o valor medido e o real, e por outro os limites da incerteza sobre o valor medido.

Visto que, este é, o que mais fortemente influencia as características de todo o sistema de medida, é importante descrever as suas características.

### 3.1 - Sensor

O dispositivo optoelectrónico baseado numa estrutura multicamada p-i-n p-i-n de a-Si:H/a-SiC:H foi fabricado no Centro de física Molecular (CFM) do Instituto Superior Técnico (IST) pelo Doutor Guilherme Lavareda que realizou a fotolitografia e depositou a sequencia de filmes finos e pelo Doutor Nunes de Carvalho responsável pela realização dos contactos transparentes .

A Figura 21 ilustra o equipamento de PECVD existente no ISEL/GIAMOS idêntico ao sistema de PECVD do centro de física Molecular (CFM) onde as amostras foram depositadas.



Figura 21 – Equipamento de PECVD existente no ISEL/GIAMOS.

Este fotodetector usado consiste em duas heteroestruturas p-i-n, depositadas por PECVD sobre um substrato de vidro, entre duas camadas de ITO. A geometria do dispositivo ilustra-se na Figura 22 é: vidro/ITO/a-SiC:H (p-i-n)/ a-SiC:H(-p) /Si:H(-i')/SiC:H (-n')/ITO.

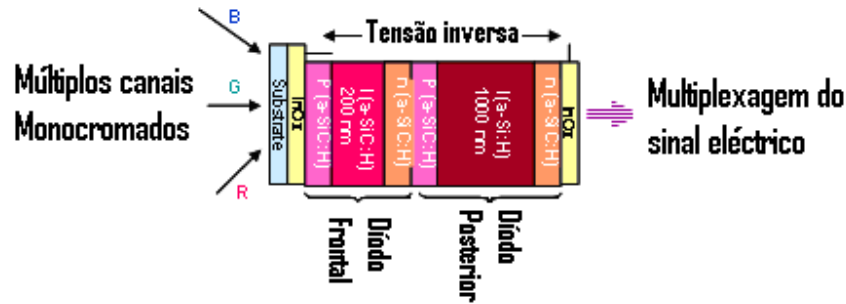


Figura 22 – Geometria do dispositivo.

Os contactos eléctricos transparentes são realizados em ITO (indium-tin oxide) que é um material que exhibe um bom desempenho em termos de condutividade, transparência, transmitância. Apresenta também boa estabilidade química/física, boa reprodutibilidade e boa morfologia superficial. Em sùmula o ITO concilia uma sùrie de características que o tornam uma boa escolha para a realizaçã de contactos eléctricos em dispositivos de silício para a fotodeteccã da radiaçã visível.[1]

As camadas, dopadas e intrínsecas do fotodíodo p-i-n frontal são realizadas em a-SiC:H, que é um material com um hiato energético maior que o do si:H. Neste caso o hiato energético é aproximadamente 2,1 eV.

O valor de 2,1 eV, obtêm-se a partir da equaçã:

$$E = h \frac{c}{f} \quad (19)$$

e o comprimento de onda limite é,

$$\lambda = \frac{4,14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{2,1} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1,24 \times 10^{-6}}{2,1} = 590 \text{ nm} \quad (20)$$

Radiações de comprimento de onda superior a 590 nm não permitem a fotogeraçã, o que significa que a radiaçã no domínio do vermelho não é absorvida neste fotodíodo.

No fotodíodo posterior a camada intrínseca é de -a-Si:H que tem um valor de hiato inferior, aproximadamente 1,8 eV.

Para este valor, o comprimento de onda limite do material torna-o sensível à radiação vermelha o que à partida permite a fotogeração em toda a região do espectro visível. No entanto como o coeficiente de absorção é tanto maior quanto menor for o comprimento de onda como se ilustra na Figura 3 (capítulo 2), a radiação na região do azul é absorvida preferencialmente no fotodíodo frontal (com 200 nm de espessura), de modo que a fotogeração predominante no fotodíodo posterior é devida à radiação vermelha.

## **3.2 - Caracterização optoelectrónica**

A caracterização optoelectrónica do fotodetector consistiu na medição da resposta da fotocorrente em função dos diferentes comprimentos de onda, na variação de tensão e variação de frequência. Foram ainda analisadas as características corrente-tensão em regime AC e DC, sob diferentes condições de iluminação.

### **3.2.1 - Resposta da fotocorrente em função do comprimento de onda**

As medidas da resposta espectral permitem a determinação da sensibilidade espectral do dispositivo, quando é iluminado com uma luz monocromática com um determinado comprimento de onda. Obtêm-se pela medição da fotocorrente gerada pelo dispositivo quando se incide luz de diferentes comprimentos de onda.

A responsividade é uma propriedade importante nos fotodíodos, definida como a razão entre a fotocorrente e a potência óptica incidente, e que depende da eficiência quântica do dispositivo (número médio de electrões gerados por cada fóton incidente).

A resposta espectral pode ser medida utilizando a luz proveniente de uma das lâmpadas de deuterium ou tungsténio. Esta pode ser seleccionada por um sistema de espelhos e concentrada por um sistema de lentes. Este raio concentrado passa por uma fenda estreita, indo atingir um prisma que vai decompor a luz branca nos diferentes comprimentos de onda.

O prisma deve absorver o mínimo de luz, deve ser altamente preciso na selecção do comprimento de onda, deve formar um espectro puro e não deve possuir comprimentos de onda sobrepostos. A selecção do comprimento de onda é efectuada através da rotação do prisma, por meios mecânicos ou de uma forma manual.

Uma das desvantagens dos prismas é que a dispersão é limitada e o ângulo de desvio entre os diferentes comprimentos de onda não segue uma regra geométrica (comprimentos de onda longos estão menos espaçados que os comprimentos de onda curtos).

Este problema pode ser ultrapassado através do uso de grelhas de difracção, cuja superfície espelhada impede a reflexão contínua do feixe, sendo emitidos feixes paralelos como se encontra ilustrado na Figura 23.

Para funcionarem correctamente, estes sulcos reflectores deverão estar a uma determinada distância de modo a que as ondas dum sulco não interfiram nos sulcos da onda vizinha.

Deste modo só são transmitidas as ondas que estão em fase. A luz transmitida desta forma pode, no entanto, conter comprimentos de onda misturados. São colocados filtros que impedem a passagem de determinado comprimento de onda para resolver este problema. (Por exemplo: para usar a 750 nm colocar-se-ia um filtro que impedisse a passagem de comprimentos de onda inferiores a 500 nm e superiores a 850 nm).

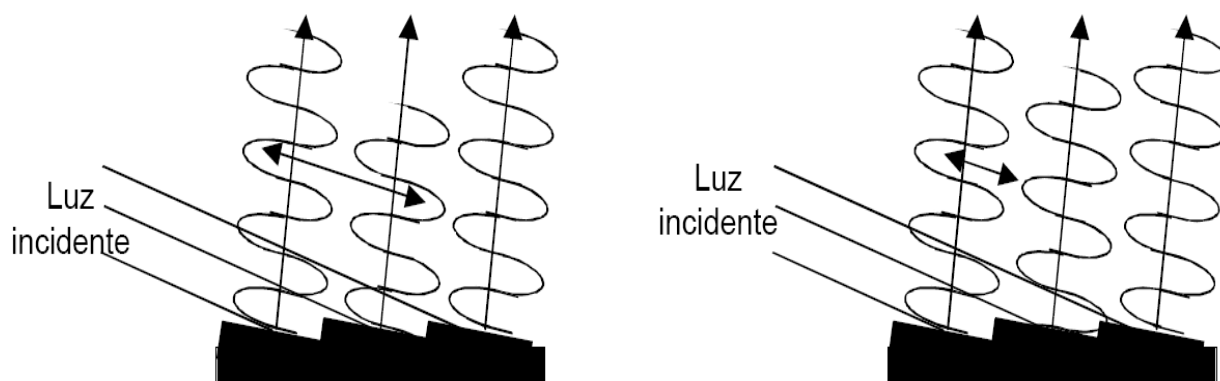


Figura 23 – Resultado da reflexão de diferentes ondas de luz numa grelha de difracção.

A Figura 24 mostra a montagem experimental para determinar a resposta espectral do dispositivo.

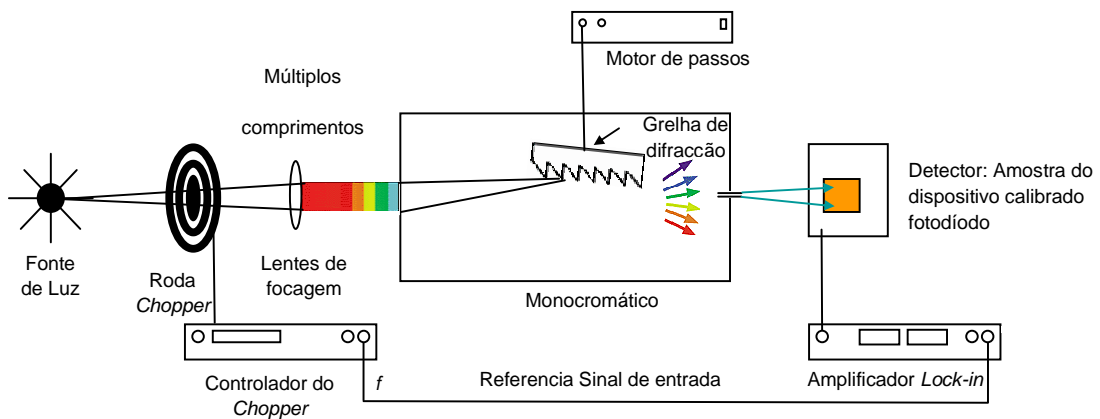


Figura 24 – Esquema da montagem para obtenção da resposta espectral.

A luz da fonte luminosa é focada na grelha de difracção do monocromador que é controlado por um motor de passos, varrendo os diferentes comprimentos de onda desde os 400 nm até aos 800nm (1,55 eV até 3,09 eV). A luz monocromatica resultante incide no fotodetector, sendo então realizada a medida da fotocorrente. O chopper permite o uso do amplificador lock-in para melhorar a relação sinal/ ruído. O dispositivo pode ser polarizado com valores de tensão positiva ou negativa.

### 3.2.1.1 - Variação em tensão

Na Figura 25 mostra-se para diferentes tensões aplicadas ( $-10V < V < +2V$ ) a fotocorrente medida a 1,5 KHz. Este valor de frequência foi escolhido por estar entre as frequências que foram alvo de teste nas curvas  $I(V)$ . Como se pode observar no gráfico, as curvas para comprimentos de onda superiores a 600 nm são todas idênticas e por isso independentes da tensão aplicada.

Para comprimentos de onda menores observa-se variação no sinal, que cresce com a tensão inversa aplicada. A 525 nm observa-se um crescimento mais acentuado.

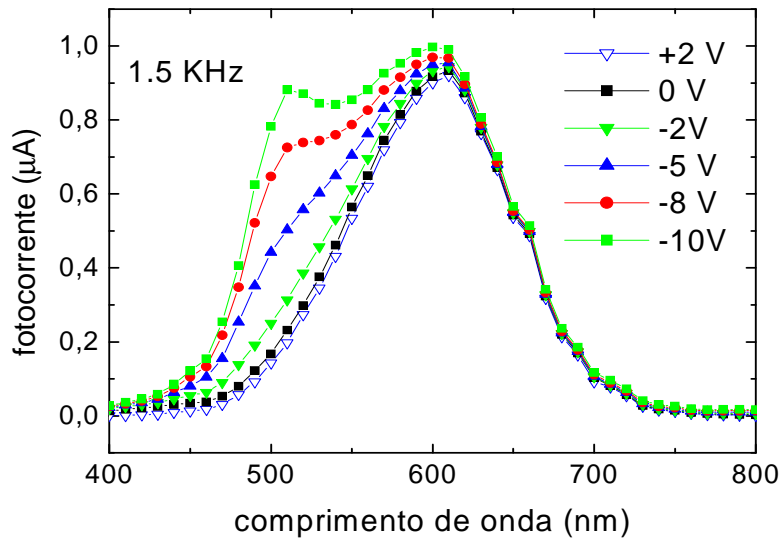


Figura 25 – Gráfico da fotocorrente para diferentes variações de tensão.

Deste gráfico pode-se concluir que no intervalo entre os 470nm e os 700nm temos um aumento progressivo da fotocorrente atingido o seu máximo para o comprimento de onda na ordem dos 600nm.

### 3.2.1.2 - Variação em frequência

Na Figura 26 é mostrado o gráfico da variação da fotocorrente em função do comprimento de onda a -5V obtida a diferentes frequências de modulação da luz (15 Hz a 2 KHz).

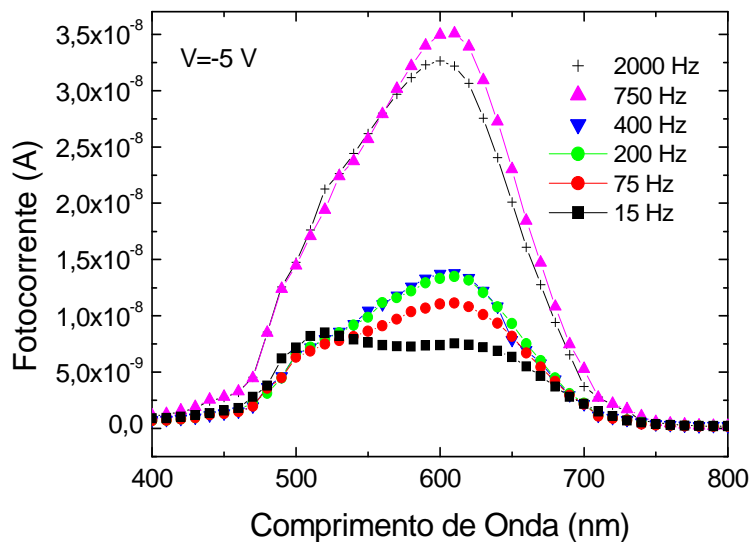


Figura 26 – Gráfico da fotocorrente para uma tensão de -5V e diferentes frequências.

Os resultados mostram que a baixas frequências ( $f < 400\text{Hz}$ ) a resposta aumenta com a frequência da luz. Na região do espectro desde 400 nm até 530 nm o espectro da fotocorrente permanece constante e na região dos 525 nm aos 626 nm observa-se uma variação mais acentuada com a frequência da luz [4], [5].

À medida que a frequência ultrapassa um determinado valor limite ( $\approx 750\text{Hz}$ ) observa-se um abaixamento do sinal.

### 3.2.2 - Características Corrente Tensão

As características corrente-tensão J-V de um dispositivo p-i-n sob iluminação, podem ser descritas usando a equação de transporte de uma junção p-n ideal [1],[2].

A corrente medida é dada por:

$$j(V) = J_D(V - JR_s) - J_L(V - JR_s) \quad (21)$$

em que  $J_D$  e  $J_L$  são, respectivamente, a corrente do díodo e a fotocorrente, corrigidas pela resistência série,  $R_s$ .

$$\tilde{J}_D = J_0[\exp(q(V - JR_s)/nKT) - 1] \quad (22)$$

$n$  é o factor de idealidade,  $V - JR_s$  a tensão na junção de um díodo ideal corrigida pela resistência série, e  $J_0$  a corrente de saturação inversa.

Considerando as características J-V no escuro, e supondo que a corrente de saturação inversa é muito menor que a corrente directa no escuro, a derivada  $dV/dJ$ , obtida a partir da equação (32), é dada por:

$$dV/dJ = +[(nKT/q) \times 1/J_D(V)] \quad (23)$$

### 3.2.2.1 - Regime AC

Em regime AC as características foram medidas usando a luz monocromática. Foram escolhidos para a realização da 1ª fase de testes três leds com comprimentos de onda diferentes, correspondentes a luz vermelha (626 nm), luz verde (525 nm) e luz azul (470 nm).

A montagem experimental utilizada para obtenção dos resultados está representada na Figura 27.

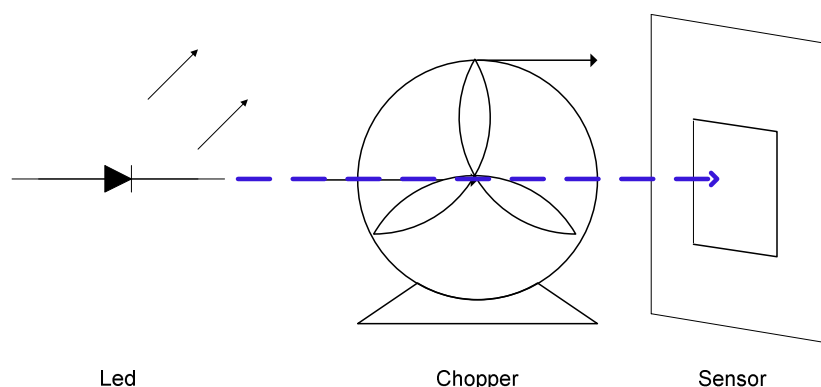


Figura 27 – Esquema da montagem experimental em regime AC.

Como montagem experimental, temos um ou mais Leds a incidir no dispositivo que se encontra num porta amostras. A luz do Led antes de incidir no dispositivo é modulada por um chopper. O chopper é um sistema mecânico que permite a modulação da Luz emitida pelo Led. A sua frequência pode ser controlada entre os 10 Hz a 3200 Hz, o que permite controlar a frequência de incidência da luz dos leds no dispositivo, ou seja a frequência de excitação óptica do dispositivo.

A aplicação da tensão de polarização ao dispositivo e leitura da fotocorrente foram realizadas pelo amplificador LOCK-IN *lock-in amplifier* (Stanford Instruments SR830).

#### 3.2.2.1.1 - Curvas I(V) para diferentes frequências

Os resultados que irão ser apresentados de seguida foram obtidos, usando duas frequências diferentes no “chopper”. Os gráficos mostram a fotocorrente em função da tensão obtida para cada radiação do vermelho, azul e combinação dos dois. As frequências trabalho são 15 Hz e 1,5 KHz e estão representados com traços diferentes.

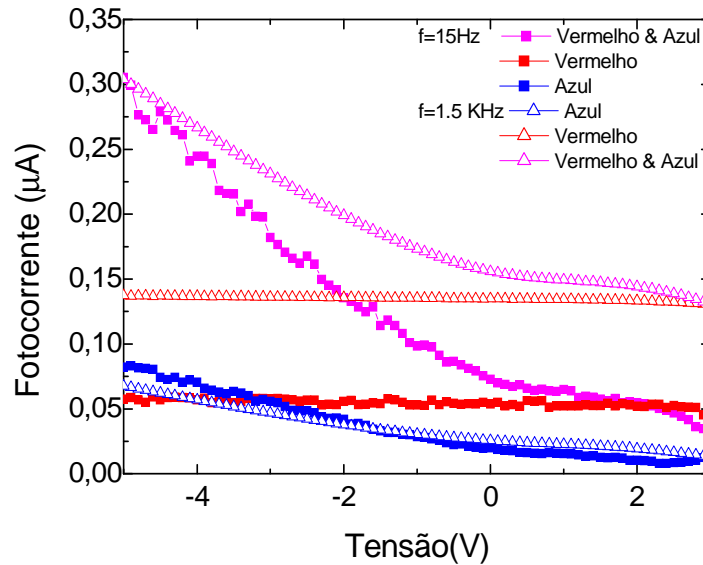


Figura 28 – Gráfico da fotocorrentes dos comprimentos onda vermelho ( $\lambda_R = 626 \text{ nm}$ ), Azul ( $\lambda_B = 470 \text{ nm}$ ), vermelho ( $\lambda_R = 626 \text{ nm}$ ) & azul ( $\lambda_B = 470 \text{ nm}$ ) para as frequências (15Hz;1.5KHz).

Na Figura 28 caracteriza-se, em regime AC a corrente-tensão para os comprimentos de onda Vermelho ( $\lambda_R = 626 \text{ nm}$ ), Azul ( $\lambda_B = 470 \text{ nm}$ ), Vermelho & Azul ( $\lambda_B = 470 \text{ nm}$ ) & ( $\lambda_R = 626 \text{ nm}$ ), a frequências diferentes. Do gráfico pode concluir-se que o sinal óptico vermelho é independente da tensão, no entanto, para frequências maiores, a fotocorrente já aumenta, como era esperado segundo as conclusões da variação em frequência (Figura 26).

Com o sinal óptico azul a curva da corrente-tensão aumenta assim que se aplicam tensões negativas. Quando temos presente os dois sinais ópticos podemos observar que a curva da corrente-tensão tem um aumento significativo do valor da fotocorrente para tensões negativas. Para tensões positivas o sinal óptico vermelho e a combinação do sinal vermelho com o azul são praticamente idênticos.

Este comportamento indica que o dispositivo para o sinal óptico azul a tensões positivas não possui uma grande contribuição.

Na Figura 29 pode observar-se a curva em regime AC usando diferentes sinais ópticos modulados a frequências diferentes (750Hz;1500Hz e 3000Hz).

Para a frequência de 750 HZ obtêm-se maiores valores de fotocorrente. Para a combinação dos três sinais ópticos (RGB) obtêm-se um maior valor de fotocorrente e este tem um crescimento significativo para tensões negativas.

Quando temos a presença do azul como o caso da combinação da emissão do sinal óptico do vermelho e azul observa-se uma subida da fotocorrente em função da tensão de polarização inversa. Este comportamento também se assemelha para a combinação dos dois sinais ópticos verde e azul.

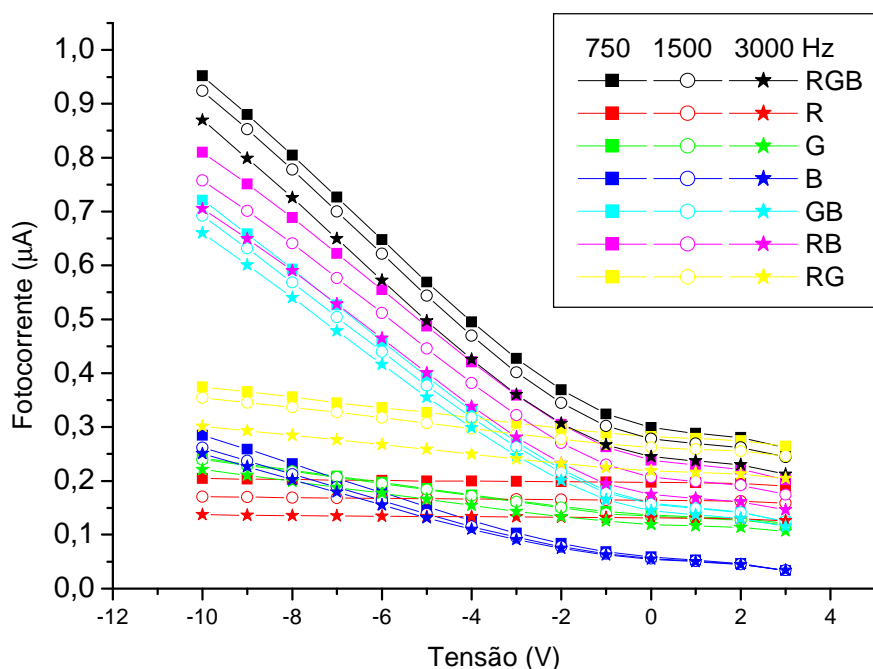


Figura 29 – Gráfico de fotocorrentes das várias combinações do sinal óptico para as frequências (750Hz; 1.5KHz e 3KHz).

### 3.2.2.2 - Regime DC

Em regime DC o dispositivo foi iluminado com radiação monocromática emitida por Led's (na região do visível) e foi medida a fotocorrente obtida para os diferentes valores de tensão de polarização directa e inversa. A leitura da fotocorrente com aplicação da tensão de polarização foi realizada com um multímetro *Keithley*. A experiencia foi controlada por um PC usando um software de dedicado.

A Figura 30 ilustra o esquema de montagem em regime DC.

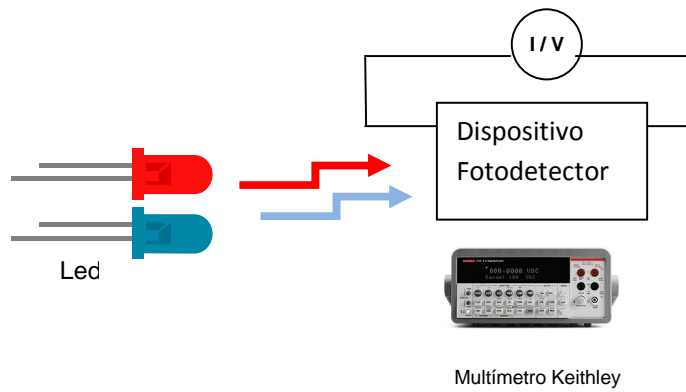


Figura 30 – Esquema da montagem experimental em regime DC.

Na Figura 31 e Figura 32 mostram-se os resultados experimentais medidos no escuro e com iluminação usando leds que emitem luz vermelha c.d.o.626 nm, azul c.d.o. 470 nm e ainda com os dois leds em simultâneo.

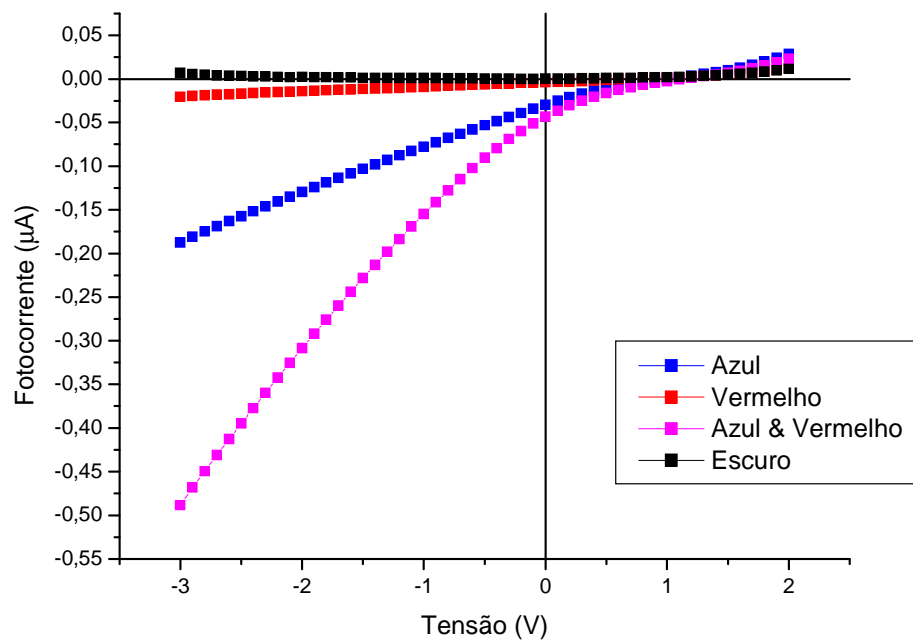


Figura 31 – Gráfico da fotocorrente em função da tensão para as luzes Vermelho, Azul e os dois em simultâneo (escala Linear) em dc.

Pela análise da Figura 31 observa-se que sob sinal óptico composto a fotocorrente tem um maior valor e no escuro é praticamente nula.

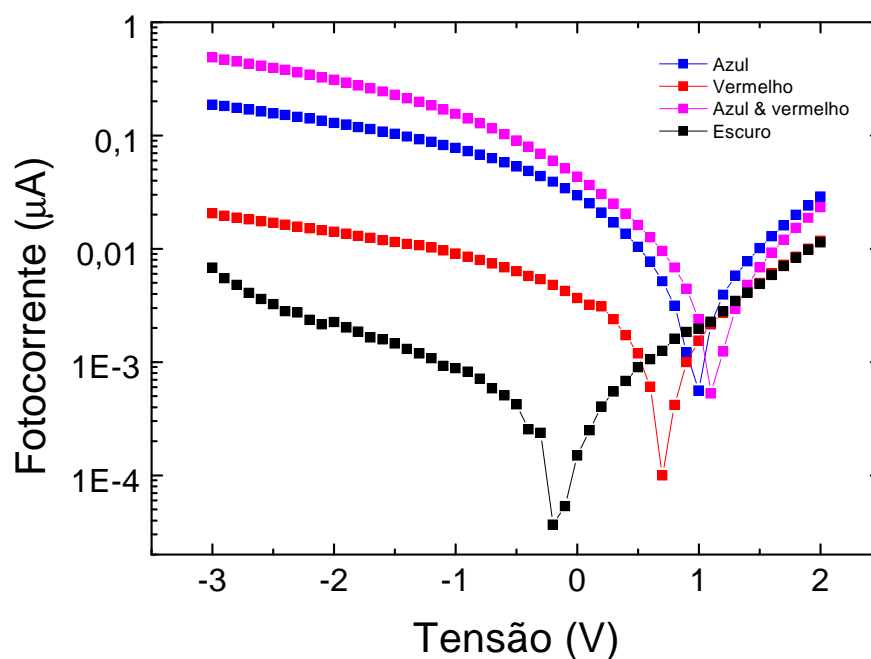


Figura 32 – Gráfico da fotocorrente em função da tensão para as luzes Vermelho, Azul e em simultâneo (escala Logaritmica) em dc.

A Figura 32 ilustra o gráfico da corrente em função da tensão numa escala logarítmica. Para tensões de polarização inversa o crescimento de corrente é considerável sendo o maior valor para a combinação dos dois comprimentos de onda.

### 3.2.2.2.1 - Curvas I(V) para diferentes tensões

Os resultados que irão ser apresentados de seguida foram obtidos usando leds de cores diferentes. O gráfico da Figura 33 ilustra a fotocorrente em função da tensão obtida para cada radiação monocromática.

Nesta figura temos a fotocorrente, obtida para cada radiação monocromática vermelho, azul e verde para os comprimentos de onda Vermelho ( $\lambda_R=626$  nm), Azul ( $\lambda_B=470$  nm) e Verde ( $\lambda_G=525$  nm) em função da tensão de polarização aplicada entre -10 V e 3 V.

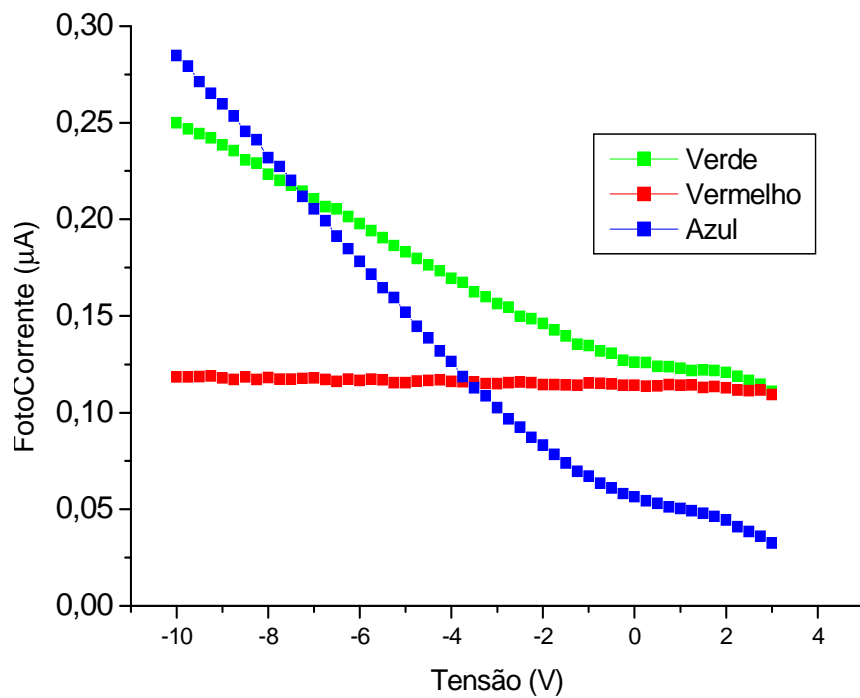


Figura 33 – Gráfico da fotocorrente em função da tensão para iluminação com leds ( $\lambda_R=626$  nm), ( $\lambda_B=470$  nm) e ( $\lambda_G=525$  nm).

Para o sinal óptico vermelho pode-se observar que a fotocorrente não varia com a tensão aplicada, enquanto que com a luz verde e azul ocorre precisamente o contrário sendo a variação tanto maior quanto for a tensão inversa aplicada.

Estas medidas foram ainda alargadas a outros comprimentos de onda da região do visível: luz amarela (580 nm) e luz violeta (400 nm) em regime DC.

A Figura 34 mostra a fotocorrente em função da tensão para os diferentes comprimentos de onda: vermelho ( $\lambda_R = 626$  nm), Amarelo ( $\lambda_y = 580$  nm), Verde ( $\lambda_G = 525$  nm), azul ( $\lambda_B = 470$  nm), e violeta ( $\lambda_v = 400$  nm) para uma frequência de modulação de 400 Hz.

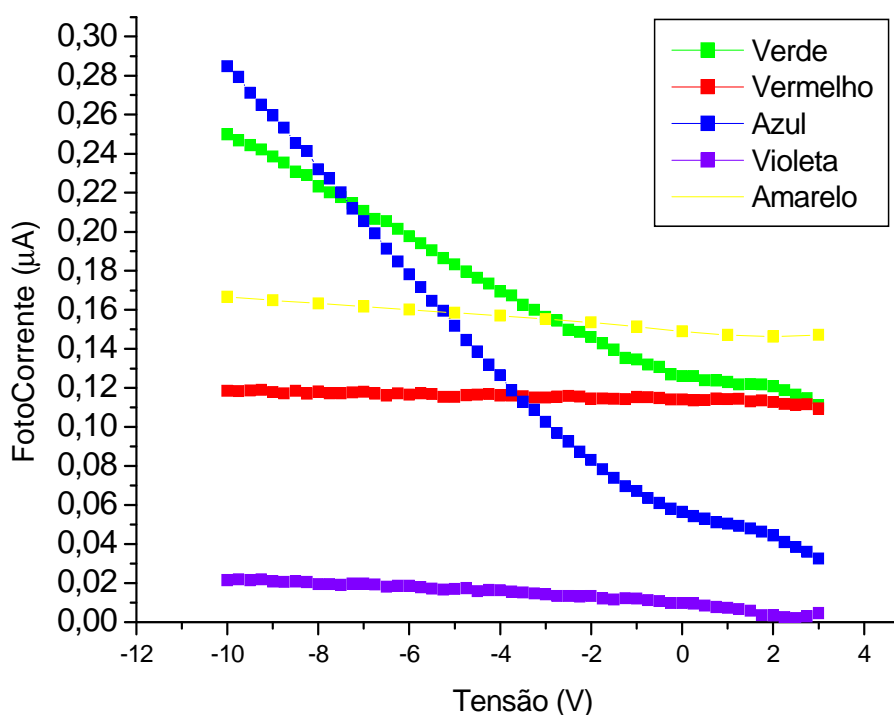


Figura 34 – Gráfico da fotocorrente para diferentes comprimentos de ondas desde o vermelho até ao violeta.

Pode-se observar que a cor vermelha e cor amarela não são influenciadas pela tensão de polarização, estes resultados estão de acordo com os resultados apresentados no gráfico da fotocorrente em função das diferentes variações de tensões (Figura 25). Para comprimentos de onda entre os 600 nm e os 800 nm a fotocorrente não apresenta dependência da tensão de polarização.

No espectro do visível o violeta tem um comprimento de onda que se encontra mais perto do azul, no entanto o seu comportamento nas curvas I(V) assemelha-se ao vermelho, em que a variação da fotocorrente não é influenciada pela tensão. Este facto pode ser comprovado segundo o gráfico da Figura 25, em que para a cor violeta ( $\lambda_v = 400\text{nm}$ ) a fotocorrente não apresenta dependência da tensão.

Para valores de comprimento de onda entre os 450 nm e os 600 nm é que a fotocorrente apresenta uma dependência. Como se ilustra nas curvas I(V) do azul e verde.

### 3.2.2.2.2 - Curvas I(V) para combinações de diferentes comprimentos de onda

A Figura 35 mostra a fotocorrente para as situações em que o dispositivo é iluminado só com um comprimento de onda (vermelho, ou azul, ou verde), com combinações de dois comprimentos de onda vermelho & verde ( $\lambda_R = 626 \text{ nm}$  &  $\lambda_G = 525 \text{ nm}$ ); ou vermelho & azul ( $\lambda_R = 626 \text{ nm}$  &  $\lambda_B = 470 \text{ nm}$ ) ou azul & verde ( $\lambda_G = 525 \text{ nm}$  &  $\lambda_B = 470 \text{ nm}$ ) e por fim com as três em simultâneo (vermelho, azul e verde).

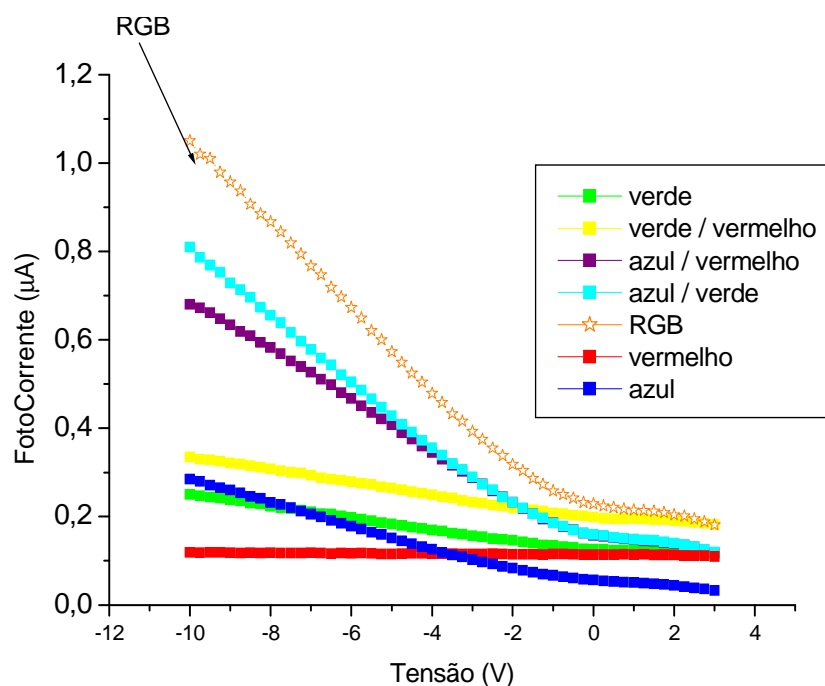


Figura 35 – Gráfico da fotocorrente para diferentes valores de combinações da luz incidente: vermelho; verde; azul; vermelho & verde ( $\lambda_R = 626 \text{ nm}$  &  $\lambda_G = 525 \text{ nm}$ ); vermelho & azul ( $\lambda_R = 626 \text{ nm}$  &  $\lambda_B = 470 \text{ nm}$ ); azul & verde ( $\lambda_G = 525 \text{ nm}$  &  $\lambda_B = 470 \text{ nm}$ ) e (RGB).

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

Neste capítulo foram analisadas as características optoelectrónicas do dispositivo, quais os comprimentos de onda que são absorvidos pela parte frontal e quais os comprimentos de onda que são absorvidos pela parte posterior do dispositivo. Concluiu-se que a radiação na região do azul e verde é absorvida preferencialmente no fotodíodo frontal e a fotogeração predominante no fotodíodo posterior é a radiação vermelha.

Sob iluminação da radiação vermelha ( $\lambda_r = 626 \text{ nm}$ ) a fotocorrente não apresenta dependência com a tensão aplicada. Enquanto que a radiação azul ( $\lambda_b = 470 \text{ nm}$ ) e verde ( $\lambda_g = 525 \text{ nm}$ ) já são influenciadas pela tensão de polarização, de realçar que o azul é mais notório.

### 3.3 - Referências

- [1] - H. K. Bucker, B. C. Burkey, G. Lubberts and E. L. Wolf, Appl. Phys. Lett., 23, 617 (1973).
- [2] - S. S. Hegedus, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 5 (1997) 151.
- [3] - S. M. Sze, Physics of the Semiconductor Devices, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [4] - M. Vieira, M. Fernandes, J. Martins, P. Louro, A. Maçarico, R. Schwarz, M. Schubert, "Improved Resolution in a p-i-n Image Sensor by Changing the Structure of the Doped Layers", in Mat. Res. Soc. Symp. Proc., San Francisco 2000, Vol. 609.
- [5] - M. Vieira, M. Fernandes, P. Louro, M. A. Vieira, M. Barata, A. Fantoni, Non-selective optical wavelength-division multiplexing devices based on a-SiC:H multilayer heterostructures, publicado no MRS Proceedings, Symposium K, 2008

## Capítulo 4 - Tecnologia WDM

A técnica Multiplexagem por Divisão em Comprimento de Onda, WDM<sup>4</sup>, tem sido o foco das atenções na busca de alternativas que permitem aumentar a banda-passante das redes de telecomunicações.

Nos sistemas de comunicação por fibra óptica instalados até ao presente, a intensidade da radiação emitida pela fonte óptica (led) é modulada através da injeção de corrente, e o sinal transmitido é detectado directamente pelo fotodetector no extremo da linha de transmissão. Estes sistemas de transmissão recorrem, assim, ao esquema de detecção directa, não usando a elevada capacidade de transmissão das fibras ópticas.

Transmitindo, simultaneamente, diferentes tipos de informação no mesmo canal físico, isto é, multiplexando diferentes sinais, a capacidade de transmissão do canal é aumentada. Várias técnicas de multiplexagem são possíveis. No nível mais baixo da hierarquia temos a multiplexagem electrónica - multiplexagem por divisão de frequência (FDM, "Frequency Division Multiplexing") ou multiplexagem por divisão de tempo (TDM, "Time Division Multiplexing") - e a multiplexagem por divisão espacial ou por fibra (SDM, "Space Division Multiplexing"). Este último processo é tecnicamente trivial, mas muito útil; a capacidade de transmissão é aumentada, simplesmente multiplicando o número de fibras ópticas. Ambos os processos são dispendiosos, e pouco flexíveis do ponto de vista do sistema, tornando a expansão das capacidades complexa e de custo elevado.

Outros processos tecnicamente mais sofisticados são a multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM), e a multiplexagem por divisão de frequência óptica (OFDM, "Optical Frequency Division Multiplexing"). Nos sistemas de comunicação óptica baseados em multiplexagem de comprimento de onda, a radiação de várias fontes ópticas de comprimentos de onda claramente distintos é transmitida simultaneamente através de uma única fibra.

A tecnologia WDM é transparente à taxa de bit e ao formato de modulação, isto é, sinais com protocolos (SDH, IP, ATM, Frame Relay, GigaBit Ethernet etc.) ou taxas de transmissão (2.5Gbit/s, 10Gbit/s, 40Gbit/s) diferentes podem ser multiplexados numa mesma fibra.

---

<sup>4</sup> Wavelength Division Multiplexing – WDM, na terminologia Inglesa

Como o custo de bit/s nas linhas de transmissão ópticas está associado ao custo dos cabos de fibra óptica, será altamente vantajoso, em princípio, transmitir simultaneamente vários canais na mesma fibra, multiplicando assim a capacidade de transmissão dos cabos ópticos.

Os sistemas WDM aumentam assim a capacidade de transmissão por fibra, o que permite diminuir os custos do sistema de comunicação, pois possibilitam a transmissão simultânea em diferentes esquemas de modulação de sinal e oferecem ainda a possibilidade adicional de expansão do sistema após a instalação dos cabos ópticos.

Na técnica OFDM é usada uma única frequência, muito bem estabilizada. Em geral, utiliza-se um oscilador óptico de boa qualidade (com largura de banda tipicamente inferior a 100 kHz). O sinal deste oscilador é distribuído por conversores de frequência que geram, separadamente, sub-portadoras ópticas muito próximas. Estas são depois combinadas e transmitidas simultaneamente através da fibra. Nos nós do sistema de transmissão esses canais são separados por processos de mistura de frequências. A técnica OFDM requer a inclusão de processamento óptico coerente, heteródino ou homodino, para cada canal definido por cada sub-portadora, enquanto o processamento WDM pode operar independentemente do estado de coerência do sinal óptico.

No projecto de sistemas WDM, as características dos multiplexadores, demultiplexadores e multiplexadores/demultiplexadores (MUX, DEMUX e MUX/DEMUX) devem ser consideradas em conjunto com as das fibras, fontes de radiação e fotodetectores. Todos estes elementos apresentam um comportamento dependente do comprimento de onda.

As características de transmissão de um sinal em sistemas de fibra óptica em geral, e nos sistemas WDM em particular, são condicionadas por diversos parâmetros:

**(i) fontes de radiação:** Taxa à qual a fonte pode ser modulada, espectro de emissão, estabilidade do comprimento de onda de operação, potência óptica emitida. Os díodos electroluminescentes (leds) podem ser modulados a frequências como indicado no capítulo 3 a 750 Hz para o led vermelho, 1500 Hz para o verde e 3000 Hz para o azul.

**(ii) fotodetectores:** A dependência no comprimento de onda da sensibilidade que no nosso caso centra-se na região do visível. Tempo de resposta pois o uso de frequências elevadas requer amplificadores de recepção avançados.

**(iv) meio de transmissão:** Se o meio é dispersivo, o sinal é distorcido ao longo da propagação (muito importante em transmissão analógica devido à distorção da fase).

## 4.1 - Multiplexagem

A multiplexagem deste trabalho foi feita à custa de três sinais ópticos que se pretendem transmitir. Esta emissão óptica é constituída por três Leds, com diferentes comprimentos de onda: Vermelho – 626 nm, Verde – 525 nm, Azul – 470 nm. Este sinal incide no sensor e o que se obtêm é um sinal multiplexado, com diferentes níveis de fotocorrente.

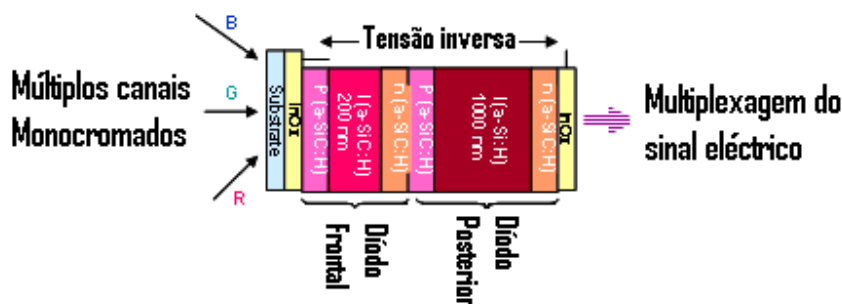


Figura 36 – Configuração do dispositivo WDM para o modo multiplexagem.

### 4.1.1 - Análise do sinal óptico na frequência

Para se conhecer e poder caracterizar o sensor é necessário previamente escolher as frequências de trabalho. Com estas simulações para diferentes frequências podemos tirar conclusões para o melhor desempenho do sensor.

O primeiro teste efectuado foi caracterizar qual seria a melhor frequência de trabalho desde 2KHz, 20KHz e 200KHz para uma tensão -5V aplicada ao sensor.

#### 4.1.1.1 - Combinação c.d.o Verde e Verde para diferentes frequências

As figuras que se seguem, descrevem a combinação de dois leds em simultâneo de cor verde para diferentes frequências (200 Hz, 2 KHz, 20 KHz e 200 KHz).

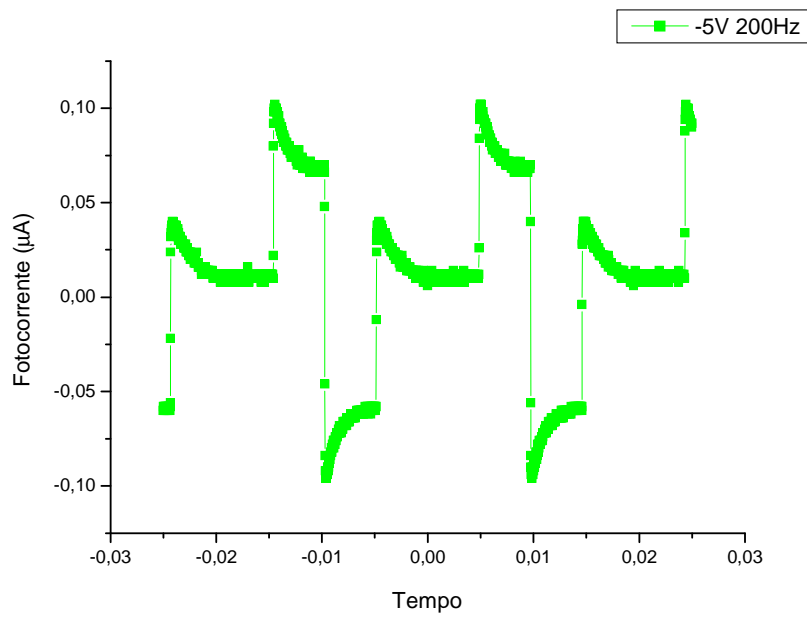


Figura 37 – Gráfico com modulação dos Led's verde e verde para uma frequência de 200Hz

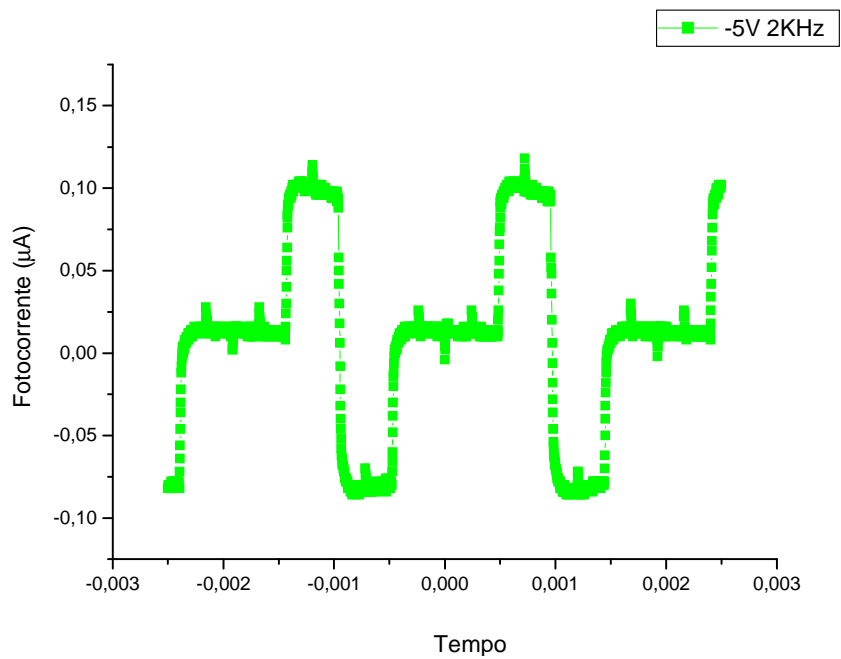


Figura 38 – Gráfico com modulação dos Led's verde e verde para uma frequência de 2KHz

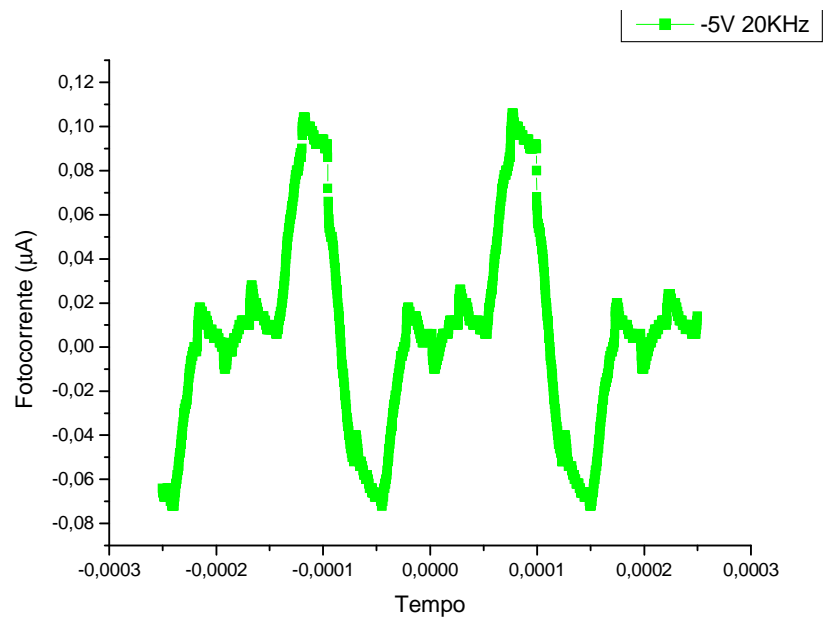


Figura 39 – Gráfico com modulação dos Led's verde e verde para uma frequência de 20KHz.

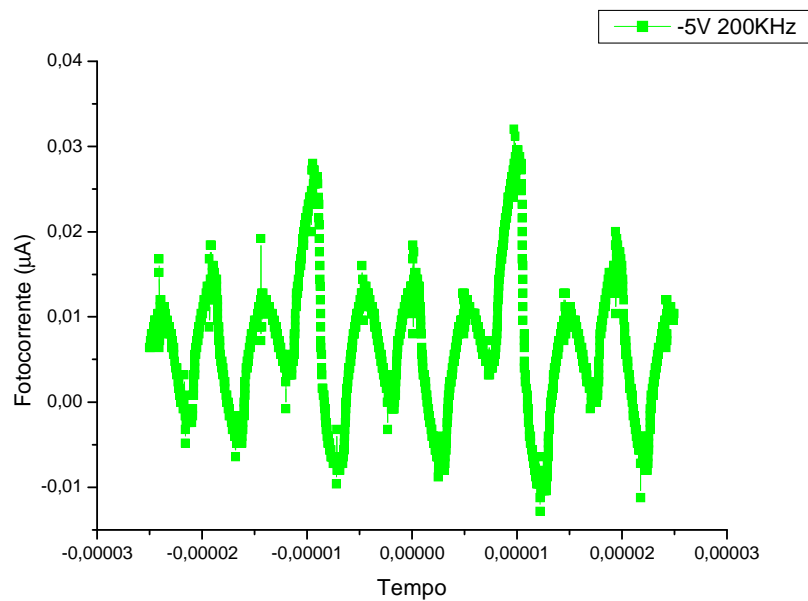


Figura 40 – Gráfico com modulação dos Led's verde e verde para uma frequência de 200KHz.

Das diferentes frequências observadas, aquelas nas quais obtemos melhor definição de patamares são as inferiores a 2KHz, no entanto, para 200 HZ temos um sinal distorcido na transição dos níveis de modulação. É de realçar, que o valor de fotocorrente é superior quando se tem os dois leds em simultâneo a “ON”. Quando temos um de cada vez obtém-se o mesmo valor de fotocorrente apesar dos leds serem distintos.

### 4.1.1.2 - Combinação dos c.d.o Verde e azul para diferentes frequências

Para o mesmo valor de tensão de polarização de -5V foi estudada a influência da frequência. As figuras abaixo ilustram para a combinação de dois sinais ópticos Verde e Azul (sinal multiplexado) a influência da frequência.

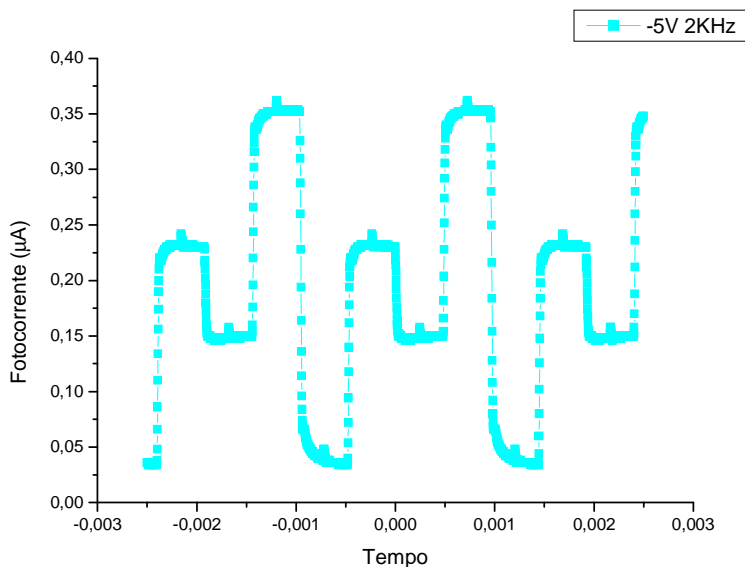


Figura 41 – Gráfico com modulação dos Led's verde e azul para uma frequência de 2KHz.

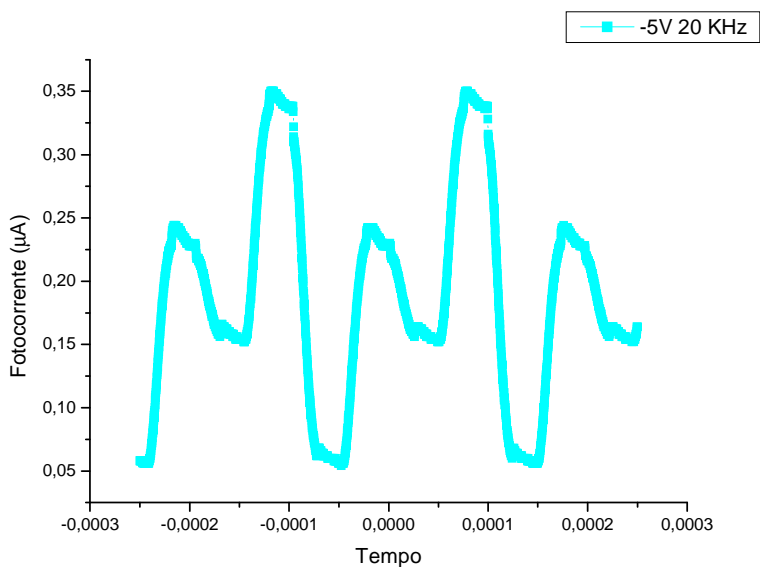


Figura 42 – Gráfico com modulação dos Led's verde e azul para uma frequência de 20 KHz.

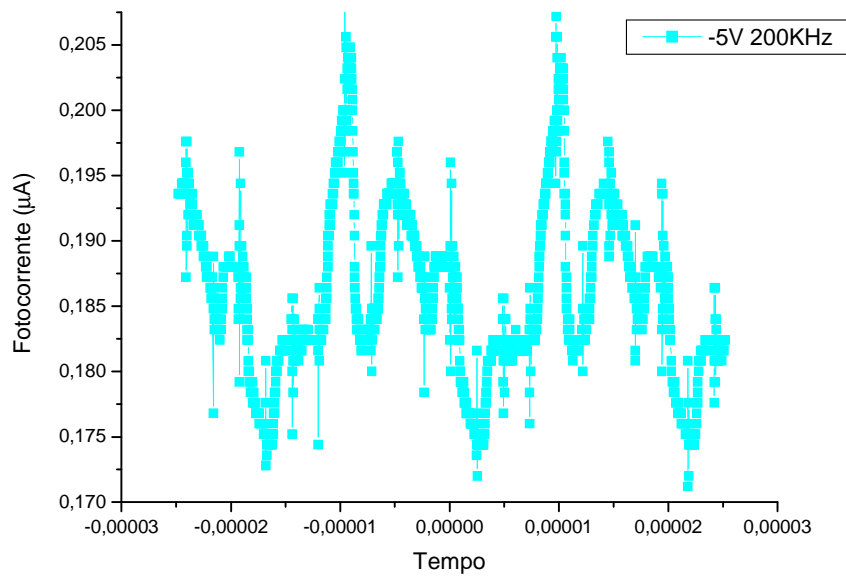


Figura 43 – Gráfico com modulação dos Led's verde e azul para uma frequência de 200KHz.

Como se pode observar a melhor frequência é a de 2KHz pois permite definir patamares de fotocorrente. Estes valores foram obtidos com os Leds verde e azul, estando em primeiro lugar o led verde aceso depois o azul, de seguida os dois e no fim do ciclo os dois apagados.

Para o primeiro estado, led verde a “ON”, obtém-se um valor de fotocorrente de  $0,225 \mu A$ . Para o segundo estado, em que só temos o led azul a “ON”, obtém-se um valor de fotocorrente de  $0,15 \mu A$ . No terceiro estado quando temos ambos os led em funcionamento, temos um valor de fotocorrente de  $0,35 \mu A$  e por fim, no quarto estado, quando temos os dois apagados temos praticamente  $0 \mu A$ .

#### 4.1.1.3 - Combinação dos c.d.o Verde e Vermelho para diferentes frequências

A Figura 44 ilustra a presença de quatro níveis (Vermelho & Verde, Vermelho, Verde e Escuro) e a influência da frequência na definição dos patamares para os diferentes níveis.

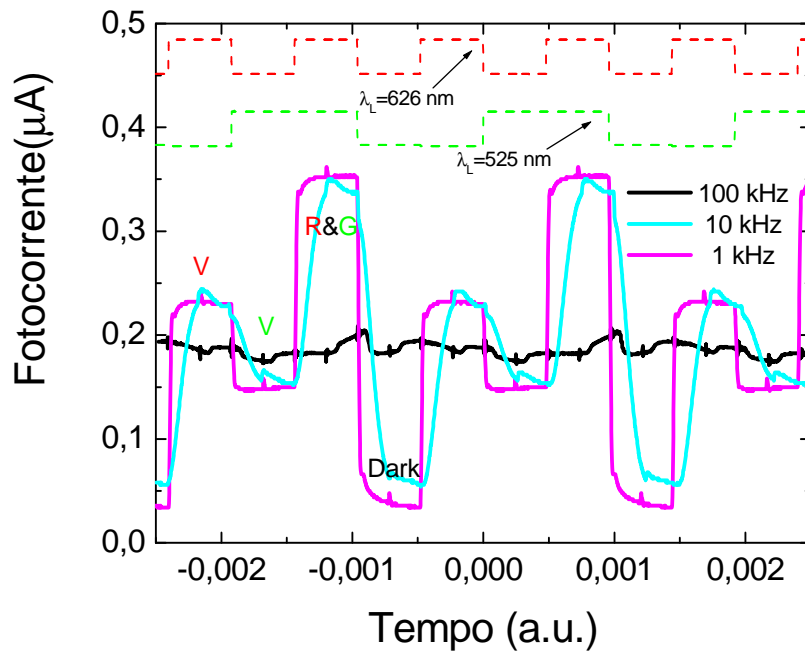


Figura 44 – Gráfico do sinal multiplexado com c.d.o Verde e Vermelho para diferentes frequências

Para a frequência de 100KHz o sinal já aparece distorcido ou seja não ficando bem definido os níveis de fotocorrente, no entanto para a frequência de 1 KHz estes níveis de fotocorrente são bem notários. Dando assim a percepção dos diferentes quatro níveis existentes [1], [2].

Esta análise foi bastante importante pois consegue-se definir limites de frequências para as quais o dispositivo tem um comportamento indesejado. No entanto podemos verificar para a frequência de 1KHz e 2KHz obtêm-se patamares bem definidos. Existe no entanto outra grande conclusão a tirar. Quando o sinal se encontra na presença de outro, o nível de fotocorrente aumenta. Assim pode-se estabelecer níveis de fotocorrente para as diferentes combinações, por exemplo quando temos dois sinais ópticos iguais (verde & verde) o nível de fotocorrente é de  $0,1 \mu A$  e quando temos (azul & Verde) o nível de fotocorrente é de  $0,35 \mu A$ .

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

Pelos dados recolhidos a uma frequência de 2KHz e uma tensão de polarização de -5V pode-se construir a seguinte tabela.

De realçar que estamos a trabalhar com a mesma frequência e esta análise é a nível de amplitude (modulação em amplitude).

Tabela 3 – Níveis de fotocorrente para os sinais verde e azul

<b>Sinal óptico</b>	<b>Fotocorrente</b>
Verde	0,02 $\mu A$
Vermelho	0,23 $\mu A$
Azul	0,15 $\mu A$
Verde & Verde	0,1 $\mu A$
Verde & Vermelho	0,35 $\mu A$
Verde & Azul	0,38 $\mu A$

#### **4.1.2 - Análise do sinal óptico em tensão**

O efeito das diferentes tensões aplicadas ( $-5V < V < +2V$ ) sobre a saída do sinal multiplexado do canal vermelho e azul é analisado na Figura 45. Foi colocado no topo das curvas de corrente-tensão de diferentes tensões o sinal que está a efectuar a modulação do sinal óptico do vermelho e do azul para que se possa compreender melhor o sinal obtido pelo dispositivo. A frequência para o sinal óptico vermelho é de 1.5 KHz e para o sinal azul é metade.

Pode observar-se que as tensões de polarização positiva correspondem a valores de fotocorrente mais baixos.

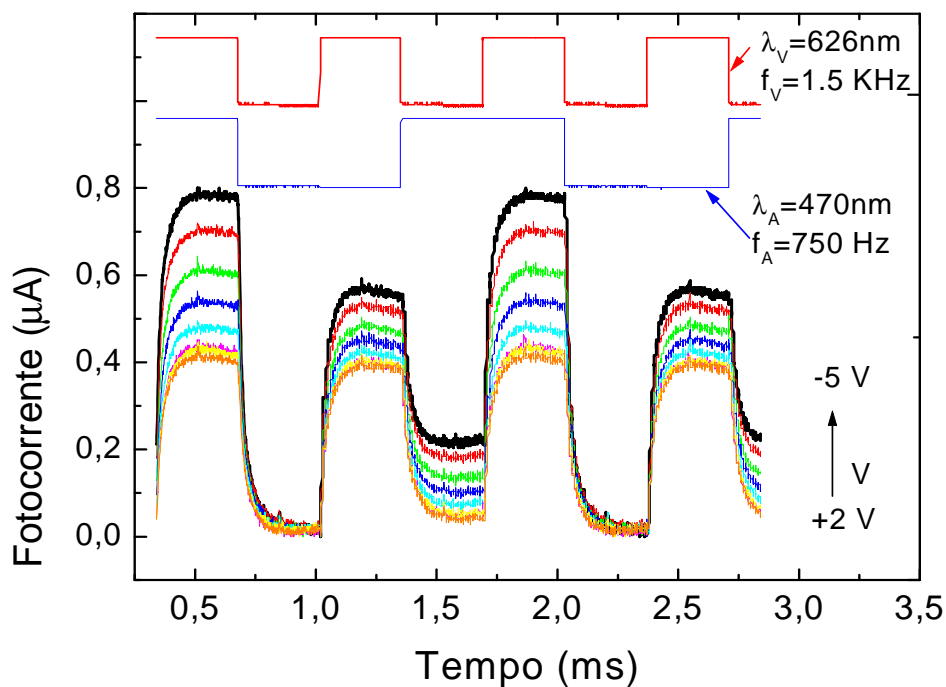


Figura 45 – Gráfico do sinal multiplexado para as diferentes tensões ( $-5V < V < +2V$ ) e com comprimentos de onda, Vermelho & Azul ( $\lambda_{V,A} = 626 \text{ nm}, 470\text{nm}$ ) com frequência 1.5 KHz para o vermelho e 750 HZ para o azul

Na Figura 46 temos o mesmo sinal de saída no entanto foram usadas duas frequências para o sinal de entrada mais baixas (15 Hz e 7,5 Hz). Ambas as figuras ilustram que o sinal multiplexado depende da tensão e da frequência escolhida para o canal de entrada.

Existem sempre quatro níveis presentes, o nível mais alto ocorre quando temos em simultâneo o sinal óptico azul e vermelho acesos e o nível mais baixo é quando temos os dois sinais apagados. Quando só temos o nível do sinal óptico vermelho, sendo que este é comparativamente superior ao azul em fotocorrente.

Os níveis de fotocorrente dependem da tensão aplicada e pode-se observar que para tensões negativas se obtiveram valores superiores de fotocorrente.

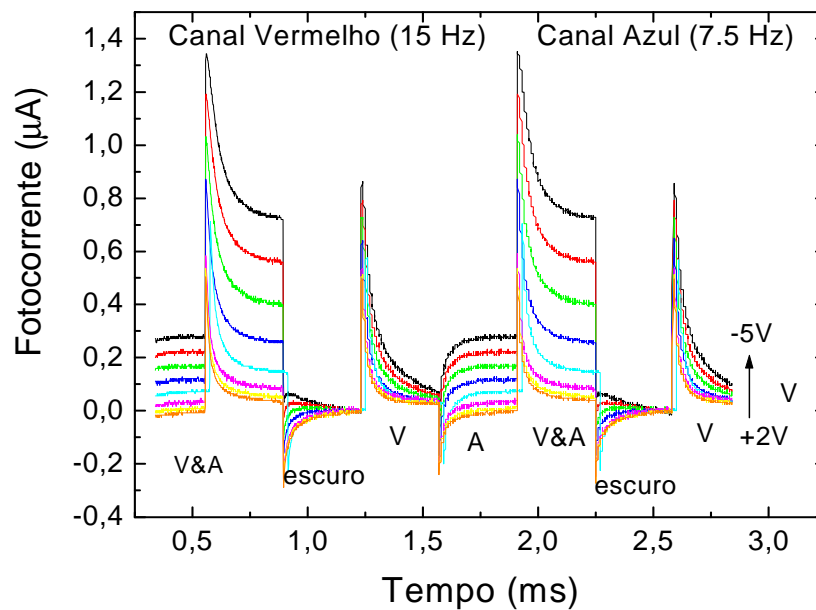


Figura 46 – Gráfico do sinal multiplexado para as diferentes tensões ( $-5V < V < +2V$ ) e com comprimentos de onda, Vermelho & Azul ( $\lambda_{V,A} = 626 \text{ nm}, 470 \text{ nm}$ ) com Frequência 15 Hz para o vermelho e 7.5 Hz para o azul

Conforme foi analisado no ponto anterior, às frequências da ordem dos Hz o sinal obtido encontra-se distorcido. Na Figura 46 volta-se a comprovar esse comportamento indesejado.

### 4.1.3 - Análise dos sinais ópticos Vermelho, Azul e Verde

A Figura 47 mostra WDM do canal RGB para as diferentes gamas de tensão aplicadas de -10V a +3V. Conforme já tinha sido referido no capítulo 3, para tensões de polarização negativas obtêm-se maiores níveis de fotocorrente. Estes níveis de tensão possibilitam um melhor processamento de sinal a nível de amplitude.

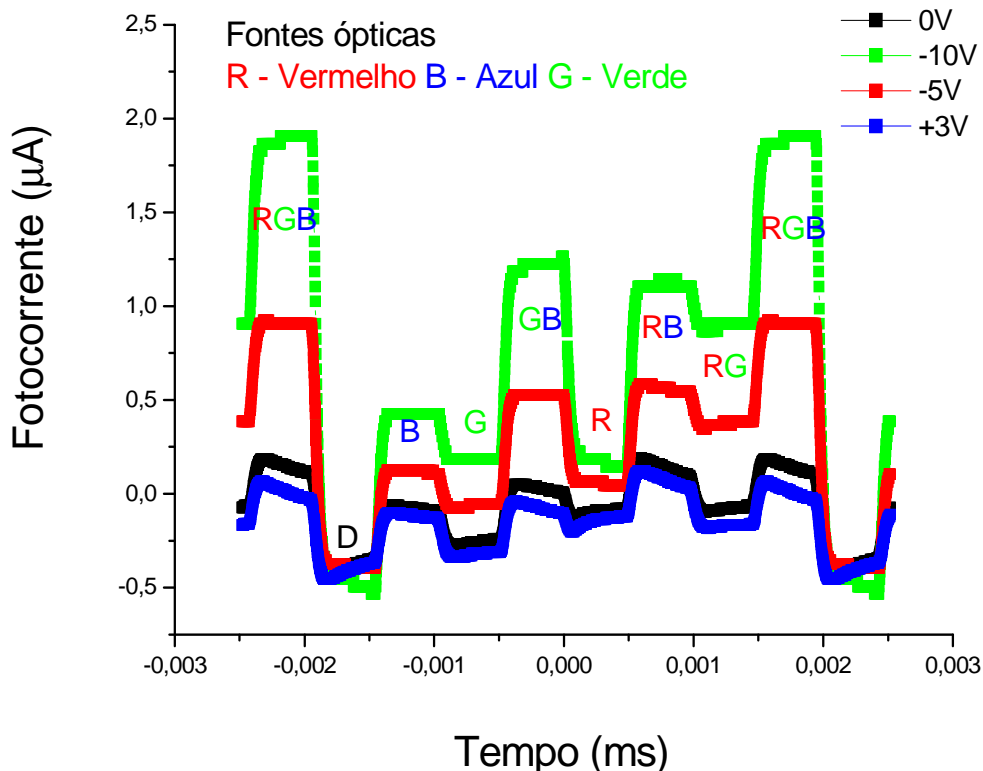


Figura 47 – Gráfico WDM com as combinações dos comprimentos de onda (RGB).

Na Figura 47 a uma tensão de polarização de -10V, observam-se oito níveis distintos de fotocorrente consoante o estado da luz incidente ou das suas combinações, o que corresponde cada um a um canal diferente. À medida que a tensão aplicada baixa, a amplitude do sinal também baixa. A +3 V observa-se a supressão da componente azul e o sinal deixa de ter os oito níveis de fotocorrente distintos. Com a iluminação de uma luz monocromática os valores de fotocorrente são superiores para o Azul depois o Verde e por fim o Vermelho. Os valores de maior fotocorrente sob iluminação de duas luzes monocromáticas são obtidos para o Verde & Azul, seguidos pelo Vermelho & Azul e por fim Vermelho & Verde.

O sinal multiplexado obtido pelas combinações de luz do Vermelho & Verde & Azul, corresponde a oito níveis de amplitude de fotocorrente diferentes. Por estes motivos pretende-se usar o dispositivo polarizado a -10V e identificar através dos oito níveis de tensão do sinal multiplexado, os sinais ópticos originais.

Como se viu neste capítulo, é importante a frequência de trabalho e a tensão de polarização do sensor, para a caracterização do seu desempenho. Segundo os resultados obtidos pode-se concluir que a melhor frequência de trabalho é a 2KHz a uma tensão de polarização de -10V.

O facto de se ter dois ou três sinais ópticos em simultâneo permite obter valores de fotocorrente distintos. Este facto possibilita encontrar um padrão para se poder executar a desmultiplexagem do sinal.

## 4.2 - Referências

[1] - M. Vieira, M. Fernandes, P. Louro, M. A. Vieira, M. Barata, A. Fantoni, Non-selective optical wavelength-division multiplexing devices based on a-SiC:H multilayer heterostructures, publicado no MRS Proceedings, Symposium A, 2008

[2] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, C. Francisco, M. Barata, "Optical Communications for short range communications", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, xxx (2008) xxx-xxx (In Press, Accepted Manuscript, Available online 20 August 2008).

# Capítulo 5 - Descrição do sistema

Num processo de comunicação estão envolvidos três conceitos importantes, a fonte de emissão que emite a informação, a fonte receptora que irá receber a informação e o meio de propagação. O sinal é a perturbação que altera as propriedades do meio de propagação e que tem como função transmitir uma mensagem. Canal de transmissão ou meio de propagação pode ser fios de cobre, cabo de pares simétricos, cabo coaxial, fibra óptica, espaço (FH), ...

As técnicas de modulação do sinal são as que alteram as propriedades do meio de propagação, desta forma torna-se importante conhece-las para que se possa escolher a melhor para o sistema. O processo de modulação consiste numa operação realizada sobre o sinal ou dados a transmitir e que produz um sinal apropriado para a transmissão sobre o meio de transmissão em causa. A escolha da técnica de modulação permite “moldar” as características do sinal a transmitir e adaptá-lo às características do canal. As técnicas de transmissão dividem-se em dois grandes grupos: as técnicas destinadas à transmissão de sinais analógicos e as técnicas destinadas à transmissão de dados digitais. Nos dois grupos a transmissão pode ser efectuada em banda base ou com recurso a portadoras (eléctricas ou ópticas). No entanto, a transmissão de sinais analógicos em banda base está, normalmente, limitada a sistemas de transmissão a muito curtas distâncias, uma vez que esta solução é muito pouco imune aos efeitos do ruído e interferência.

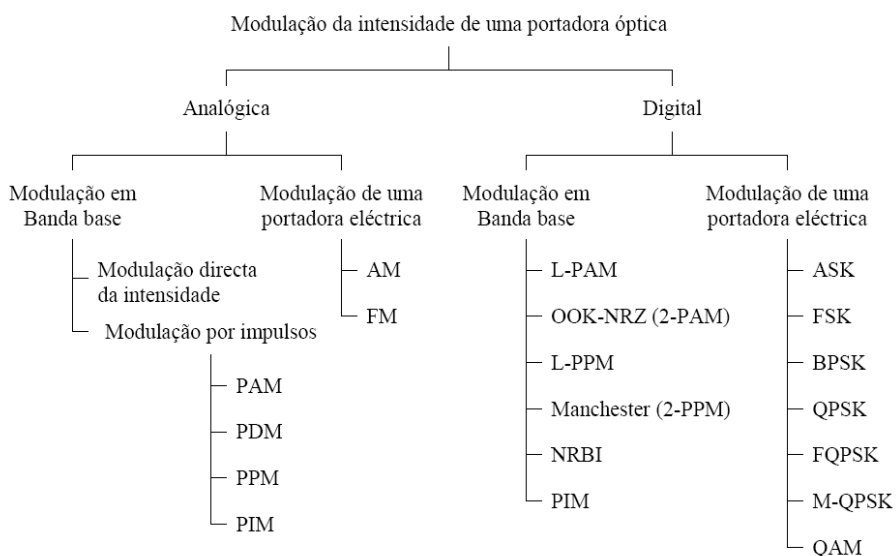


Figura 48 – Técnicas de Modulação

A transmissão de sinais analógicos recorrendo a técnicas baseadas na modulação de portadoras é muito utilizada na difusão de som (radiodifusão) e sinais de televisão. As duas principais técnicas são a modulação de amplitude (AM) e a modulação de frequência (FM) [1].

Na modulação AM (Amplitude modulation), o sinal a transmitir,  $s(t)$ , é veiculado na amplitude de uma portadora de frequência  $f_p$ , que pode ser eléctrica, electromagnética ou óptica, isto é, a amplitude da portadora varia de forma directamente proporcional à amplitude do sinal a transmitir. O sinal modulado,  $sm(t)$ , é descrito por:

$$sm(t) = [s(t) + K] \times A \times \cos(2 \times \pi \times f_p \times t) \quad (24)$$

onde  $K$  é uma constante adicionada ao sinal a transmitir por forma a que a amplitude da portadora nunca seja negativa e  $A$  é a amplitude da portadora. A Figura 49 mostra um sinal modulado em AM.

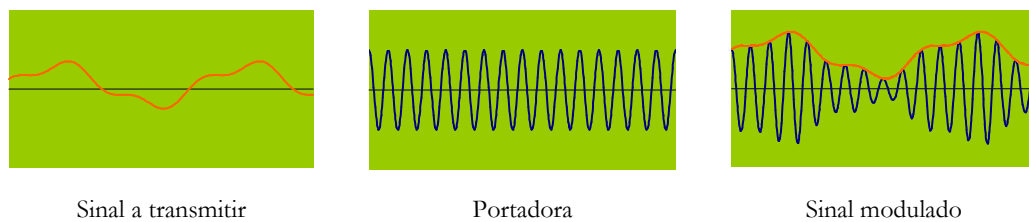


Figura 49 – Modulação em Amplitude (AM)

No domínio da frequência, o processo de modulação corresponde a convoluir o espectro do sinal a transmitir com um Delta de Dirac à frequência da portadora. Assim, o espectro do sinal modulado ocupa duas vezes mais largura de banda que o mesmo sinal em banda base. Uma vez que o espectro é simétrico relativamente à frequência da portadora, é possível aumentar a eficiência espectral através da eliminação de um dos lobos do espectro antes de se proceder à transmissão do sinal. Os sinais modulados em AM são muito sensíveis ao ruído e interferência aditivos, uma vez que a informação é transportada pela amplitude da portadora.

A modulação em frequência FM (Frequency Modulation), consiste em fazer variar a frequência de uma portadora de forma directamente proporcional à amplitude do sinal a transmitir. O sinal modulado,  $sm(t)$ , pode ser representado por:

$$sm(t) = A \times \cos[2 \times \pi \times (f_p + m \times s(t)) \times t] \quad (25)$$

onde  $A$  representa a amplitude da portadora,  $f_p$  é a frequência da portadora e  $m$  é o índice de modulação. O índice de modulação determina a amplitude da variação da frequência do sinal modulado. Quanto maior for o índice de modulação, maior será a variação de frequência para o mesmo sinal a transmitir e mais largo será o espectro do sinal modulado. A Figura 50 mostra um sinal modulado em FM.

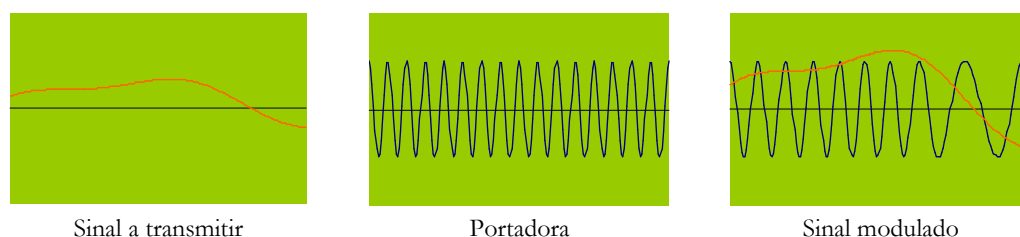


Figura 50 – Modulação em Frequência (FM).

O espectro de um sinal modulado em FM não é simétrico em torno da frequência da portadora, pelo que não é possível eliminar um dos lobos tal como no caso dos sinais AM. Assim, o espectro de um sinal modulado em FM é mais largo que o espectro do sinal AM equivalente. Os sinais modulados em FM são mais imunes ao ruído e à interferência aditivos que os sinais AM, uma vez que a informação é transportada pela frequência instantânea do sinal modulado e não pela amplitude da portadora. Assim, os sistemas de transmissão em que é necessária uma maior qualidade do sinal (relação sinal-ruído) são utilizados normalmente a modulação em frequência.

Nos sistemas de transmissão digital, os sinais podem ser transmitidos utilizando técnicas de modulação em banda base ou técnicas baseadas em portadoras. Em qualquer dos casos a transmissão pode ser binária ou multi-nível. Nos sistemas de transmissão digital, a qualidade da transmissão é medida através da probabilidade de erro de bit, isto é, da probabilidade de, uma vez transmitido um bit, este seja interpretado pelo receptor de forma errada. Os valores típicos da probabilidade de erro de bit vão de  $10^{-4}$  a  $10^{-9}$ .

Nos sistemas de transmissão digital, a informação a transmitir está normalmente representada por um conjunto, ou sequência, de bits (informação binária). O objectivo do sistema de transmissão é transmitir esses bits. Quando cada um dos bits é transmitido isoladamente, isto é, através da transmissão de um símbolo por cada bit, diz-se que estamos em presença de transmissão binária. Quando, ao contrário, os bits são agrupados em palavras binárias e transmitidos utilizando-se um símbolo por cada palavra, diz-se que estamos em presença de transmissão multi-nível.

Em transmissão binária, o sistema de transmissão transmite sequencialmente um de dois símbolos que representa um dos dois bits (0 ou 1). Em transmissão multi-nível, o sistema de transmissão transmite sequencialmente um dos N símbolos necessários para representar as N palavras, sendo N dado por:

$$N = 2^{\text{número\_de\_bits\_por\_palavra}} \quad (26)$$

Exemplo: para transmitir uma sequência de palavras binárias com 3 bits de comprimento são necessários  $2^3=8$  símbolos diferentes. A utilização de transmissão multi-nível permite obter um balanço entre a largura de banda ocupada pelo sinal modulado e a potência que é necessário transmitir para que se obtenha uma dada probabilidade de erro.

## Transmissão em banda base

A modulação OOK (On-Off-Keying) é uma técnica binária e utiliza dois símbolos para representar os bits 0 e 1. Os dois símbolos consistem em duas amplitudes de uma grandeza física tal como a corrente ou a tensão de um sinal eléctrico. A Figura 51 mostra um sinal OOK, onde  $T_b$ , tempo de bit, representa a duração temporal de cada bit.

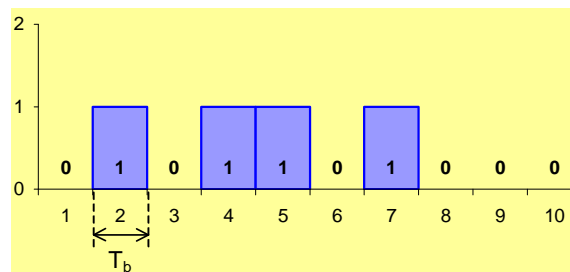


Figura 51 – Sinal OOK-NRZ.

Quando, como na Figura 51, o impulso que representa o bit "1" tem uma duração igual ao período de um bit, diz-se que o sinal é do tipo não-retorno-a-zero (NRZ - Non-Return-to-Zero). Quando a duração dos impulsos é inferior à duração de um bit, o sinal é do tipo retorno-a-zero (RZ - Return-to-Zero), tal como mostra a Figura 52.

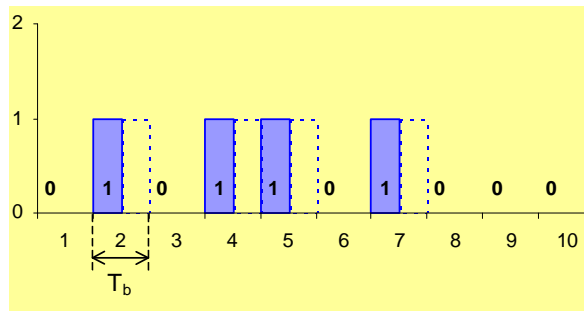


Figura 52 – Sinal OOK-RZ.

A modulação da amplitude do impulso PAM (Pulse Amplitude Modulation) consiste na utilização de impulsos com amplitudes diferentes para representar símbolos diferentes. Na sua forma mais simples são utilizados impulsos com duas amplitudes diferentes, o que corresponde à modulação OOK se uma das amplitudes for nula. Se forem utilizados impulsos com mais que duas amplitudes diferentes, estamos em presença de modulação multi-nível. A Figura 53 mostra um exemplo de um sinal modulado em 4-PAM, isto é, onde são utilizadas 4 amplitudes diferentes para constituir outros tantos símbolos.

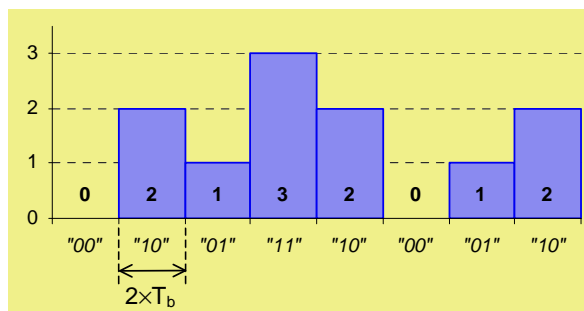


Figura 53 – Sinal 4-PAM.

No exemplo da Figura 53, cada um dos 4 diferentes símbolos representa uma das 4 palavras de 2 bits. Assim, a duração ( $T_s$ ) de cada impulso (símbolo) é duas vezes a duração de um bit ( $T_b$ ). A taxa de transmissão de bits (débito binário) é duas vezes superior à cadência com que são transmitidos os símbolos (baud rate). De uma maneira geral, o débito binário está relacionado com o baud rate da seguinte forma:

$$\text{débito binário} = N \times \text{baud rate} \tag{27}$$

onde  $N$  é o número de bits representados por cada símbolo, ou:

$$\text{débito binário} = \log_2(M) \times \text{baud rate} \tag{28}$$

onde  $M$  é o número de símbolos utilizados.

Destes tipos de modulação as que irão ser alvo neste trabalho serão a modulação em frequência (modulador do sinal óptico) e a modulação multi-nível (desmultiplexagem do sinal – Aplicação processamento). No entanto foram descritas e ilustradas para que a escolha fosse a mais correcta.

De seguida descreve-se o processo de todo o sistema projectado e testado. O diagrama de blocos simplificado do sistema multiplexer/desmultiplexer analisado neste trabalho está ilustrado na Figura 54.

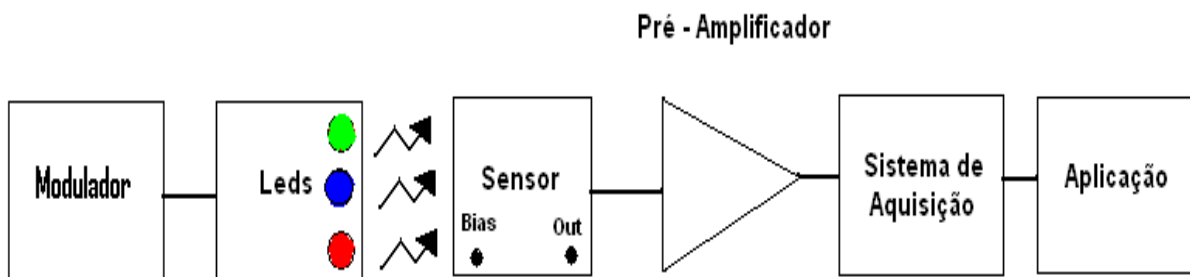


Figura 54 – Diagrama de blocos.

O primeiro bloco é o modulador do sistema de emissão do sinal óptico a ser transmitido. É realizado com o circuito integrado 74LS93N que controla a frequência de emissão do sinal óptico. O segundo bloco é constituído pelos dispositivos emissores de luz visível, que neste caso são três leds de cores diferentes: vermelho, verde e azul. A luz emitida pelos três leds com diferentes comprimentos de onda incide no sensor ou fotodetector que constitui o terceiro bloco que irá proceder à desmultiplexagem do sinal. Como o sinal obtido pelo sensor é da ordem dos micro-volts torna-se necessário amplificá-lo para facilitar o tratamento posterior do sinal. O quarto bloco é um pré-amplificador e o quinto bloco é o sistema de aquisição que funciona como interface entre o sinal pré-amplificado e a aplicação. O último bloco é o sistema de tratamento de sinal realizado com uma aplicação LabView.

A análise deste sistema é baseada na modulação em amplitude. Os pontos que se seguem são referentes a este tipo de modulação. No entanto foi feita uma breve descrição para a modulação em frequência que se encontra no anexo 1, por se encontrar fora do âmbito dos requisitos propostos para este trabalho.

## 5.1 - Emissor

Geralmente o papel do emissor num sistema de comunicação é o de adaptar o sinal a transmitir ao meio de transmissão. Para fazer esta adaptação, o emissor é composto pelos módulos: modulador de sinal óptico e o sinal óptico.

### 5.1.1 - Modulador do sinal de óptico

Para a construção do modulador do sinal óptico, usou-se um gerador de impulsos e um circuito integrado 74LS93N. Estes possibilitam a modulação de três sinais ópticos distintos com frequências duplas entre si. Por sua vez o sinal modulado incide no sensor

À onda quadrada (CLOCK) gerada pelo gerador de funções liga-se o circuito integrado 74LS93N este por sua vez permite a obtenção de três portadoras. A portadora da saída QA tem metade da frequência da onda quadrada. A frequência de cada saída Q do contador é metade da frequência da saída precedente. Ou seja a cada transição da onda quadrada do gerador corresponde as seguintes frequências de saída: a frequência na saída QA (pino12) é igual à frequência de entrada CLOCK (pino1) dividido por 2, a frequência na saída QB (pino 9) é igual à frequência de entrada CLOCK (pino 1) dividido por 4, a frequência na saída QC (pino 8) é igual à frequência de entrada CLOCK (pino1) dividido por 8 e a frequência na saída QD (pino11) é igual à frequência de entrada CLOCK (pino 1) dividido por 16. As saídas do circuito integrado utilizadas são QB, QC e QD.

A montagem experimental encontra-se esquematizada na Figura 55.

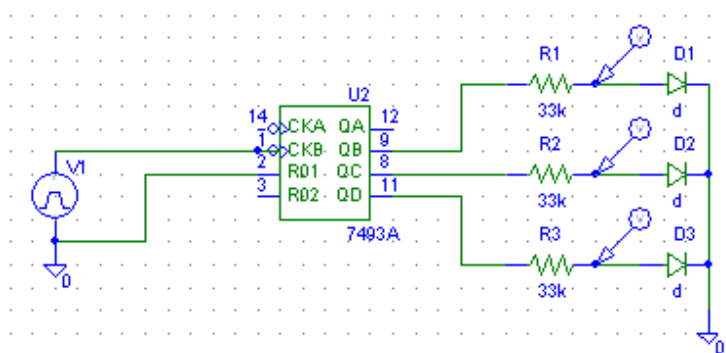


Figura 55 – Esquema do circuito de controlo dos Led's a frequências múltiplas

Para ilustrar o sinal obtido em cada saída do circuito integrado observa-se na Figura 56, a variação temporal da tensão de polarização dos três Leds (no esquema estão representados como

D1, D2 e D3). Como os sinais apresentam frequências duplas entre si, é possível estabelecer oito estados de polarização luminosos diferentes.

As frequências utilizadas são: 750 Hz para o led vermelho, 1500 Hz o verde e 3000 Hz para o azul.

A escolha das frequências para cada comprimento de onda deve-se aos resultados obtidos na resposta espectral (capítulo 3), pois para comprimentos de onda na ordem dos 400 nm aos 500 nm o espectro da fotocorrente começa a aumentar para frequências mais altas. Como a cor azul está dentro dos comprimentos de onda 470-500 nm esta vai ser modulada com a frequência mais alta.

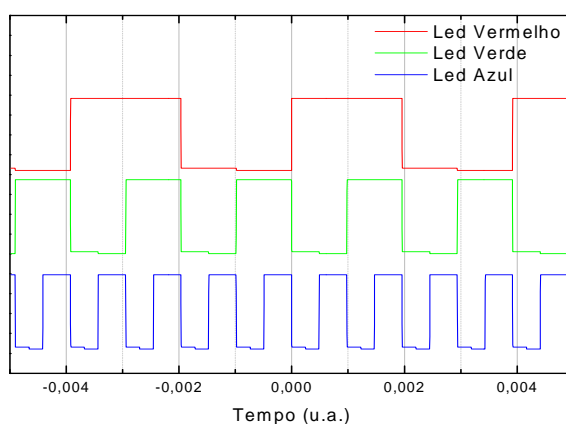


Figura 56 – Variação temporal da tensão de polarização dos Leds.

### 5.1.2 - Sinal Óptico

O módulo que realiza a emissão óptica do sinal que se pretende transmitir, é constituído por três Leds [2]. Estes fazem a ponte do meio eléctrico para o meio óptico.

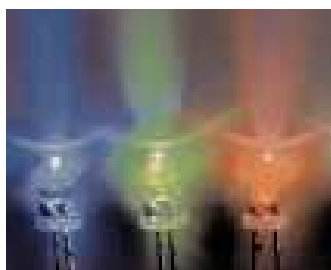


Figura 57 – Imagem dos leds.

Para os leds utilizados temos os respectivos comprimentos de onda; para o Led vermelho o comprimento de onda é 626 nm, para o Led verde é 525 nm e para o Led azul é 470 nm.

Com uma corrente de 20mA e um revestimento de 5mm de epoxy [3].

Na bancada de ensaios teve-se o cuidado de incidir o sinal óptico dos três leds (multiplexado) no sensor a uma distância que não levasse este a saturação.

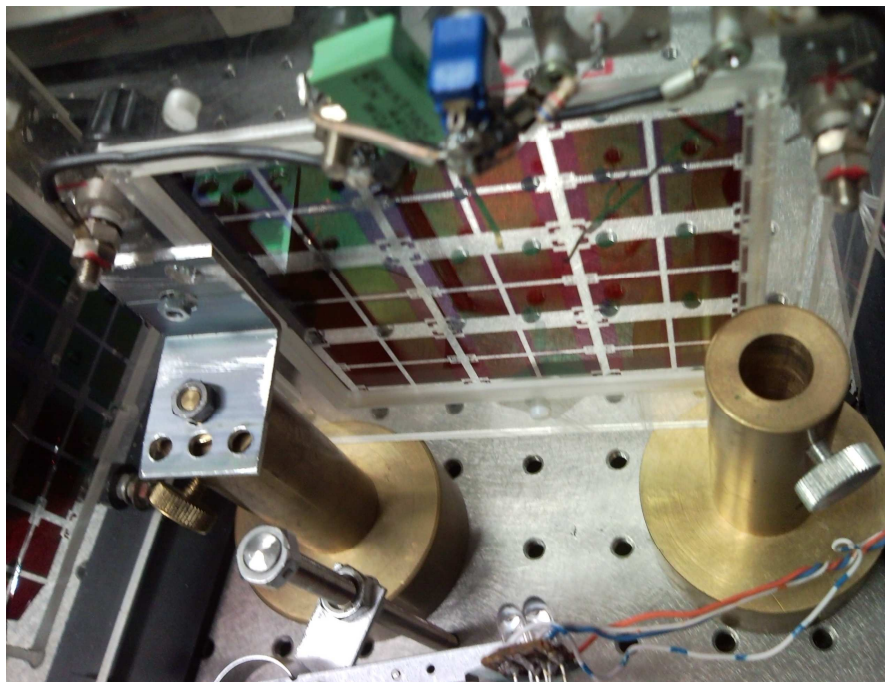


Figura 58 – Imagem da montagem dos leds

## 5.2 - Meio de transmissão

O meio de transmissão utilizado neste trabalho foi o ar no entanto pretende-se futuramente implementar como meio de transmissão a fibra óptica [4]. Para tal é necessário efectuar o acoplamento do sinal multiplexado na fibra óptica.

Para executar a multiplexagem foi pesquisado o equipamento mostrado na Figura 59. O triplexer wdm tem três entradas que permitem acoplar três sinais ópticos distintos tendo-se à saída o sinal multiplexado. A pesquisa deste equipamento teve em conta que os comprimentos de onda de interesse na janela 488nm até aos 850nm [5].



Figura 59 – Triplexer wdm.

## 5.3 - Receptor

O receptor, por norma trata de recolocar o sinal recebido sob a forma original enviada pelo emissor. Tendo em conta que o sinal foi transformado no emissor e sofreu alterações durante a sua passagem pelo meio de transmissão, nomeadamente a influência de ruído e outras distorções, o papel do sistema de recepção será de colocar o sinal recebido numa forma o mais fiel quanto possível em relação ao sinal emitido.

Para tal o receptor é constituído pelos seguintes módulos: sensor, pré-amplificador, sistema de aquisição e aplicação. Estes módulos vão ser explicados a seguir.

### 5.3.1 - Sensor

O sensor é o dispositivo que irá realizar a desmultiplexagem, pois segundo as suas características optoelectrónicas descritas no capítulo 3 consegue-se obter o sinal com diferentes estados. Os oito diferentes estados correspondem à emissão do sinal multiplexado.

A função do sensor é poder converter o sinal óptico multiplexado num sinal desmultiplexado. Na Figura 60 é ilustrado o porta-amostras que contém um array de sensores. Este porta-amostras é constituído por um total de 36 sensores, no entanto a caracterização e processamento é efectuada pela utilização de um único sensor (número 12).

A polarização do sensor é efectuada pelo lock-in que aplica uma tensão de polarização variável. Conforme foi descrito anteriormente a tensão para a qual se obtinha melhor desempenho do sensor era a -10V, desta forma coloca-se essa tensão de polarização no Lock-in. Como saída temos o sinal desmultiplexado pelo sensor que liga ao pré-amplificador.

Os conectores de entrada e de saída do porta-amostras, são conectores BNC fêmea que permitem ligar a qualquer aparelho a partir de cabos coaxiais.

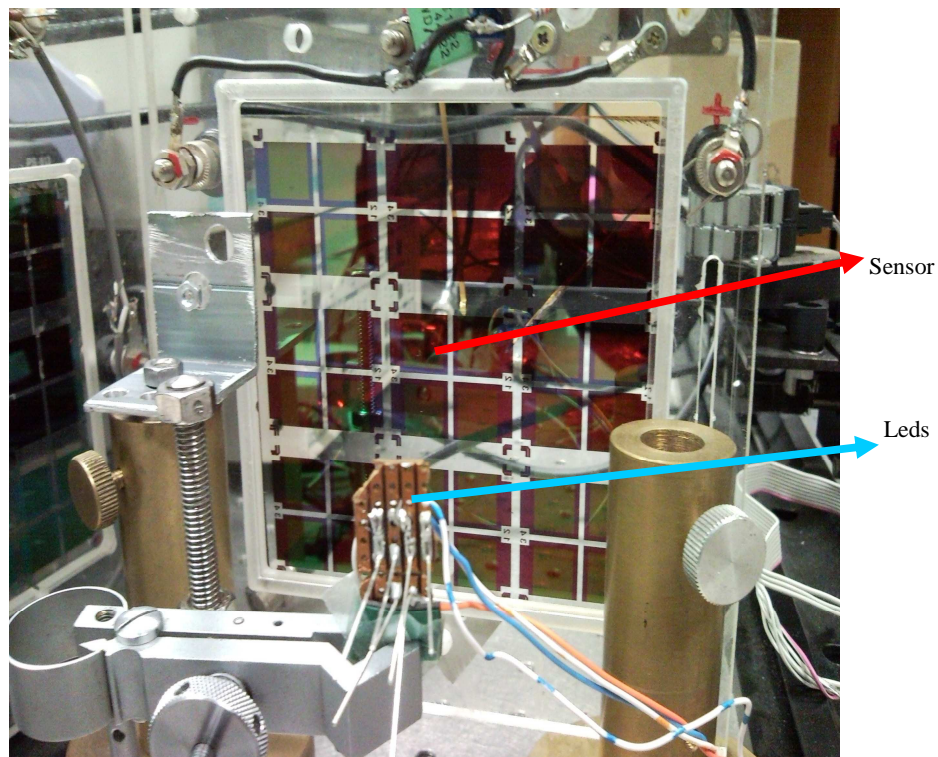


Figura 60 – Imagem do “array” de sensores.

A Figura 61 ilustra o sensor e o modo como os contactos (banhados a ouro) estão ligados. As extremidades do sensor foram prolongadas para que os contactos transparentes não o danificassem.

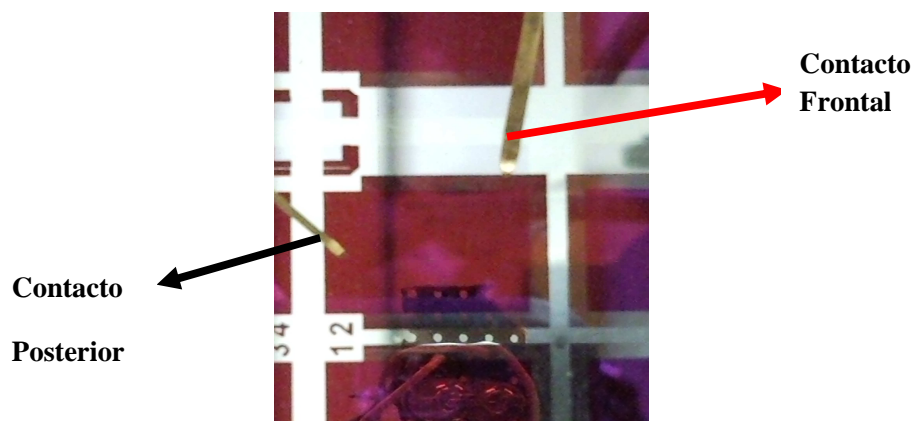


Figura 61 – Imagem do sensor utilizado.

Os blocos seguintes, pré-amplificador, sistema de aquisição e aplicação correspondem ao acondicionamento do sinal para este sensor.

### 5.3.2 - Pré - Amplificador

O quarto bloco faz parte do condicionamento do sinal. O condicionamento de sinal tem como objectivo converter a grandeza eléctrica fornecida pelo fotodíodo e adequá-la ao passo seguinte. O tipo mais comum de condicionamento de sinal é a pré-amplificação.

A fotocorrente obtida é da ordem dos micro-amperes, desta forma os sinais de saída de pequena amplitude do sensor deverão ser amplificados antes de serem digitalizados, para aumentar a resolução e diminuir o ruído. Para conseguir a maior exactidão possível, o sinal deve ser amplificado para que a gama de tensão máxima do sinal condicionado seja igual à gama máxima de entrada do conversor A/D. Normalmente utilizam-se amplificadores operacionais para fazer a amplificação do sinal. Neste trabalho é usado um pré-amplificador designado de *Low-Noise current PreAmplifier* [6].

### 5.3.3 - Sistema de Aquisição

Este módulo serve para efectuar a aquisição do sinal multiplexado obtido pelo sensor. Este módulo converte o sinal analógico em digital, para tal é necessário ter alguns cuidados. Desta forma desenvolveu-se um sistema modular e flexível de baixo custo para aquisição e tratamento do sinal obtido pelo sensor.

O sistema pode funcionar em dois modos de aquisição, em *trigger* (aquisição num determinado intervalo de tempo) ou modo contínuo (aquisição contínua).

#### 5.3.3.1 - Hardware do sistema de Aquisição

A base de trabalho do sistema desenvolvido assenta na utilização de um PC, um módulo de aquisição de dados e o software LabView, da National Instruments (NI).

Para a interface entre o Sensor e o módulo de aquisição foram utilizados o Lock-in e o pré-amplificador. O módulo de aquisição por sua vez vai ligar ao pré-amplificador.

O sistema de aquisição de dados é baseado num módulo NI-DAQ (USB 6008), cujas principais características são, fornecer canais de entrada analógicos (AI), 2 canais de saída analógicos (AO), 12 canais digitais entrada/saída (DIO), um contador de 32 bits a velocidade do interface USB, taxa de amostragem de 10 Ksamples/s, *Trigger* por software e o tamanho da FIFO de 512 amostras [7].



Figura 62 – Módulo de aquisição de dados NI\_DAQ (USB 6008).

### 5.3.3.2 - Software do Sistema de Aquisição

A diferença entre o LabVIEW e outras linguagens de programação, é a facilidade que o utilizador tem no seu manuseamento visto ser uma linguagem gráfica. O Labview disponibiliza aplicações para os sistemas de aquisição de dados, controlo e instrumentação.

A maioria das linguagens de programação é feita por comandos, com abreviações de palavras de língua inglesa, para criar linhas de comando que serão interpretadas ou então compiladas. A linguagem gráfica utiliza estruturas em forma de gráficos e diagramas para criar os códigos de programação em blocos. Através do seu “Wizard” é possível desenvolver uma interface de configuração do hardware e possui bibliotecas que facilitam a comunicação com dispositivos USB, (“Universal Serial Bus”).

Todos os programas criados no LabVIEW são chamados de Virtual Instruments (VI). Os VI’s são constituídos por duas partes principais. O painel frontal pode ser entendido como a interface para o utilizador. No diagrama de blocos é realizada a programação através da inserção de blocos com uma determinada função e as respectivas interligações.

No software proposto, será necessária a programação de um VI, que irá conter a programação necessária para decodificar os dados, processá-los, apresentá-los ao utilizador e armazená-los em ficheiro. Depois de definidas as características e especificações gerais do sistema, seguiu-se uma metodologia “top-down” e modular no desenvolvimento do software.

O sistema assenta em quatro módulos de software desenvolvidos para o processamento do sinal, designados neste trabalho por Aplicação: “Controlo Leds”, “Evento aquisição”, “Normalização” e “Processamento”.

### 5.3.4 - Aplicação

A aplicação, é composta pelos quatro módulos enunciados anteriormente o seu aspecto gráfico para o utilizador está ilustrado na Figura 63 e Figura 64.

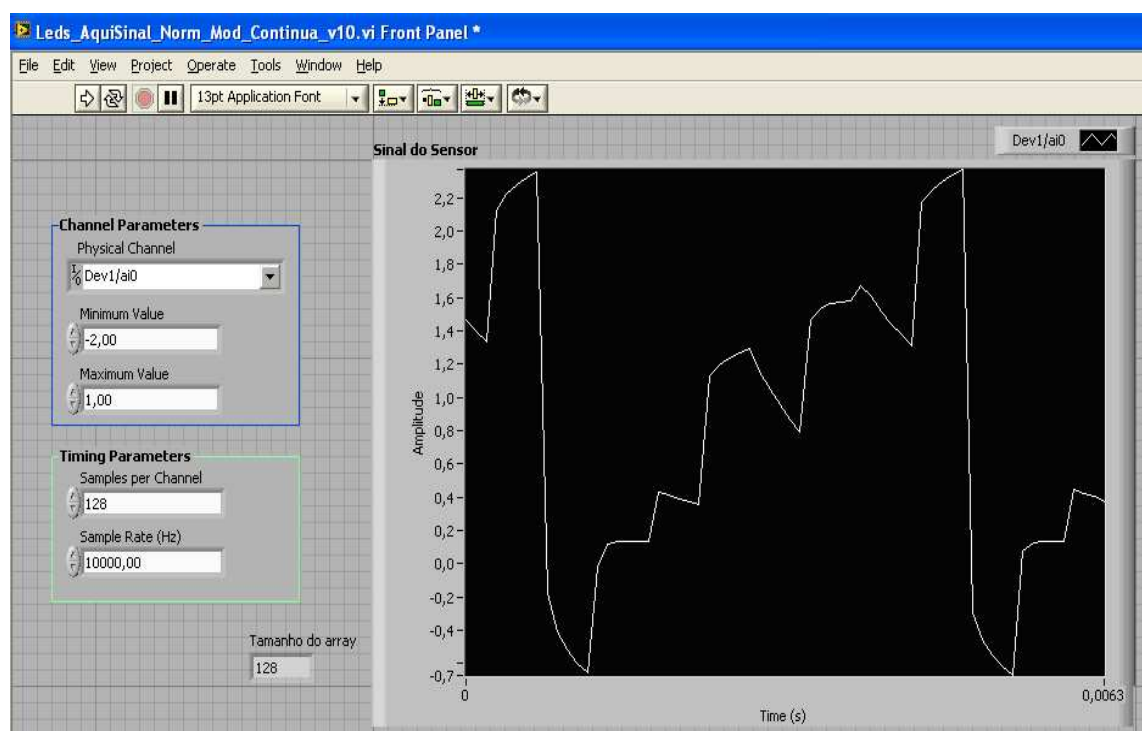


Figura 63 – Consola do utilizador.

O utilizador para interagir com o sistema deverá seleccionar algumas das opções que se encontram disponíveis lateralmente. Os vários botões que podem ser programados segundo a Tabela 4

Tabela 4 – Configuração da aplicação

<b>Canal de configuração</b>	<b>Parâmetro a definir</b>
<b>Physical Channel</b>	confirmar <b>Dev1/ai0</b>
<b>Maximum Value</b>	mantenha <b>1V</b>
<b>Minimum Value</b>	mantenha <b>-2V</b>
<b>Sample per Channel</b>	escolha <b>128</b>
<b>Sample Rate</b>	confirmar <b>10000 Hz</b>

O canal físico “Physical Channel” corresponde a entrada do sinal após ter sido amplificado. Como foi ligado (Dev1/ai0), deverá ser este escolhido. A taxa de amostragem “Sample Rate”, tem um limite máximo de 10000Hz imposto pela placa de aquisição, como foi descrito nas características da placa de aquisição no ponto 5.3.3.1. O “Sample per Channel” corresponde ao número de pontos, ou seja, ao número de amostras adquiridas pela placa de aquisição. Quanto maior for o número de amostras, maior é o tempo de processamento.

O gráfico da Figura 63 ilustra o sinal adquirido sem qualquer tratamento de sinal posterior. Na Figura 64 estão ilustrados os valores para a normalização e para o acondicionamento do sinal. Também foi representado por leds de diferentes cores (vermelho, verde e azul) as várias combinações possíveis no momento de aquisição, ou seja representa por exemplo se o led vermelho está a “on”, o led verde “off” e o led azul está “on”. Para este exemplo os três leds estão a emitir.

Nesta figura é ainda ilustrado o “sinal Normalizado” que é obtido após o módulo normalização e o terceiro gráfico apresentado é o sinal obtido a partir do módulo processamento que reproduz o sinal modulador do sinal óptico (leds) de entrada.

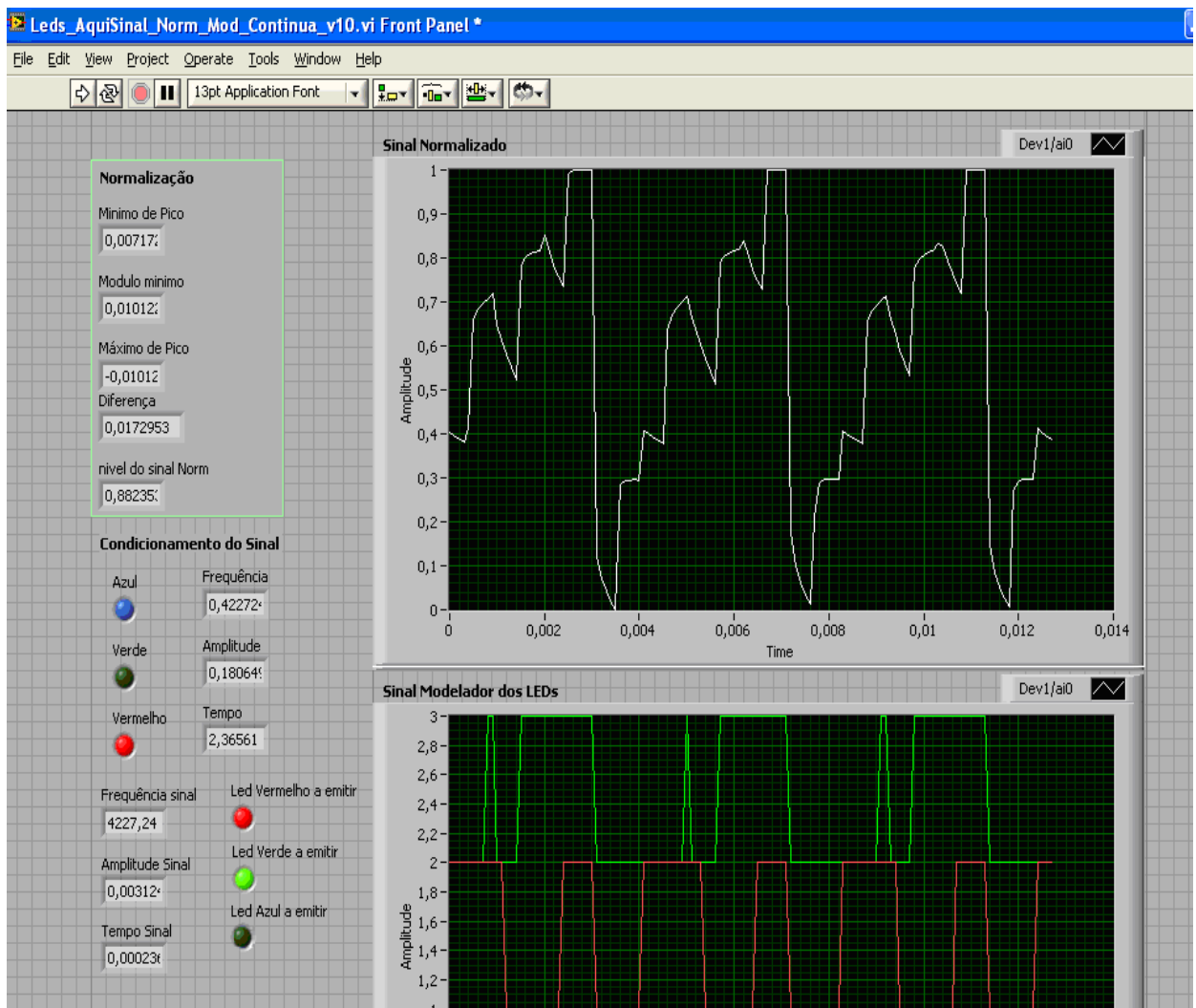




Figura 64 – Consola do utilizador para o sinal normalizado e sinal modulador.

Os gráficos, do sinal do sensor e do sinal normalizado, têm como escala no eixo horizontal a base de tempo e no eixo vertical a amplitude. O gráfico do sinal modulador representa os três sinais ópticos no tempo.

Na barra superior do programa existem vários botões. Ao clicarmos uma vez no “Run” , representado por uma seta, o programa arranca e colhe uma amostra de sinal com 128/10000 segundos. Para colocar o programa em execução contínua, clique no botão “Run continuously”  representado por duas setas e este coloca a aplicação em aquisição contínua.

### 5.3.4.1 - Aplicação “Controlo Leds”

Esta aplicação foi desenvolvida com o intuito de substituir o módulo hardware descrito no ponto 5.1, oferecendo assim ao utilizador uma melhor interacção com o sistema, pois assim fica isento de utilizar o gerador de impulsos e o circuito integrado. No entanto é sempre necessário utilizar o hardware do ponto 5.2.

O controlo dos leds, serve para fazer a modulação dos leds que por sua vez incidem no sensor. Esta modulação serve para simular uma determinada comunicação que possa existir entre dois utilizadores. O primeiro passo consiste em criar um canal digital de saída usando um canal para todas as linhas. O segundo passo é chamar a tarefa que irá se executar dentro de um ciclo “While”. Nesta existe um incremento de 100 milissegundos colocando nas três saídas P0.0, P0.1 e P0.2 o sinal com diferentes frequências para que os leds sejam modulados.

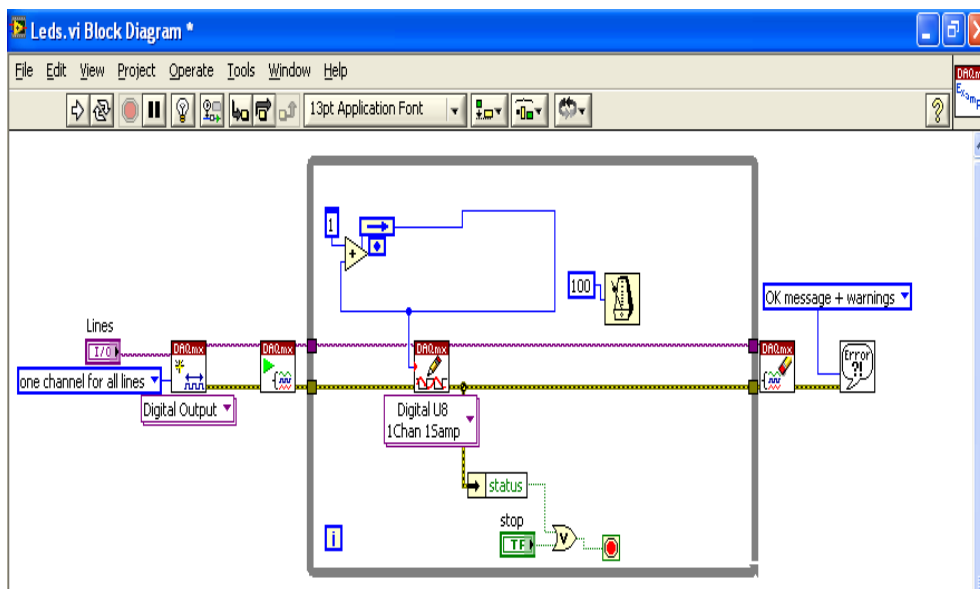


Figura 65 – Aplicação “Controlo dos Leds”.

### 5.3.4.2 - Aplicação “Evento aquisição”

O sinal que irá ser adquirido é um sinal contínuo que passa a ser discreto. Este processo, no qual um sinal é convertido numa representação digital, é conhecido por conversão analógica/digital (conversão A/D).

Esta aplicação executa, (em modo de *trigger*) a aquisição do sinal após ter sido pré-amplificado. O primeiro passo consiste em especificar o canal físico a ser utilizado e a frequência de amostragem. A especificação é feita pelo utilizador conforme foi explicado no ponto 5.3.4. O canal físico é o Dev1/ai0 do dispositivo da Figura 62 e a frequência de amostragem é de 10 Ksamples/s.

Como estamos limitados pela placa de aquisição a uma determinada frequência de amostragem, teve-se o cuidado de garantir que esta frequência de amostragem cumpre o teorema de Nyquist para que o sinal seja amostrado e recuperado sem perda de informação. Como se ilustra na Figura 66 o sinal original é reconstruído pois o ritmo de amostragem é suficiente rápido para adquirir mais pontos num determinado momento. No entanto na Figura 67, o sinal adquirido já não corresponde ao sinal original pois o ritmo de amostragem é inferior, e o sinal aparece como se ele estivesse a uma frequência diferente do que realmente está. Está deturpação do sinal é chamada de “alias”.

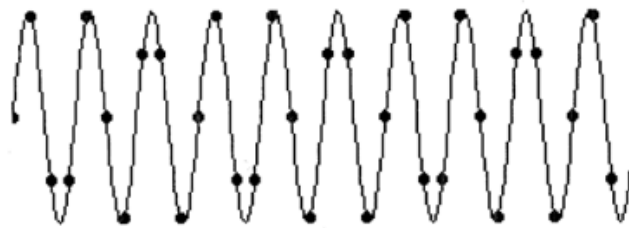


Figura 66 – Sinal sem “aliasing”.

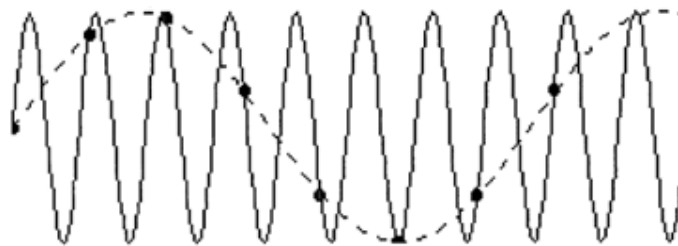


Figura 67 – Sinal com “aliasing”.

De acordo com o teorema de Nyquist, para evitar o “alias”, sinais com largura de banda limitada – que contêm apenas uma certa gama de frequências – podem ser reconstruídos exactamente a partir do sinal amostrado, desde que a frequência de amostragem seja o dobro da maior frequência contida no sinal.

No nosso caso, garantimos que a frequência de amostragem é maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado. Pois a frequência máxima usada no sinal original é de 3000Hz que corresponde ao sinal óptico azul. Desta forma como representado na Figura 68, as três componentes constituintes do sinal óptico (vermelho, verde e azul) estão abaixo da frequência de Nyquist (5000Hz), o que permite respeitar as condições de amostragem correctas previstas pelo teorema de Nyquist.

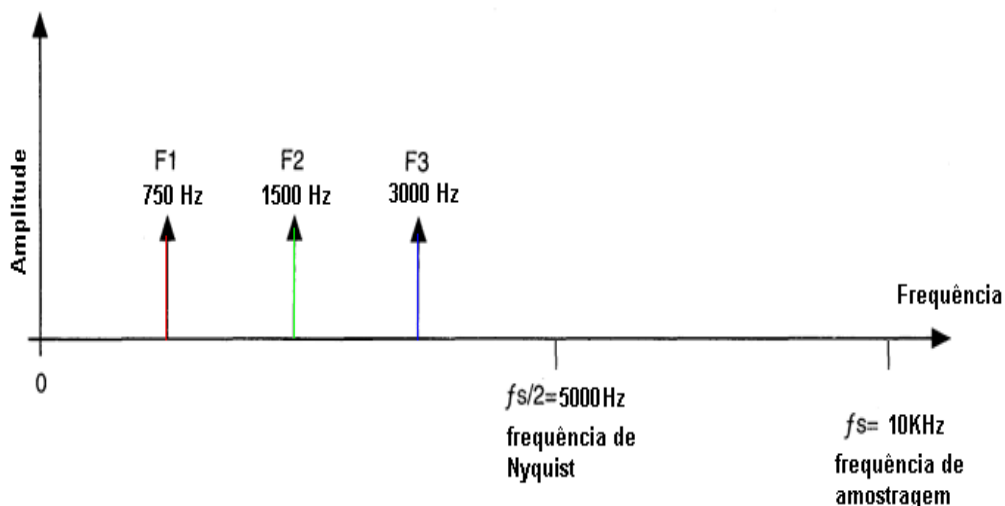


Figura 68 – Componentes em frequência do sinal óptico.

A aquisição dos dados é feita pelas seguintes funções. A primeira é *DAQmx Create Channel*, que cria o canal que irá ser utilizado (DEV1/ai0), a segunda é *NI-DAQmx Timing* que configura o tempo para a aquisição, ou seja, define se a aquisição é finita ou contínua e selecciona o número de amostras. Neste trabalho definiram-se amostras finitas e um número de amostras de 128, o que corresponde a 78,125 amostras por segundo.

A função *NI-DAQmx Control* permite o ajuste no estado do hardware, o que oferece uma maior eficiência. A aquisição de dados é efectuada pela função *NI-DAQmx Start*. A construção da forma de onda pela função *NI-DAQmx Read* e o controlo da aquisição de dados por *NI-DAQmx Stop*. A chamada a estas funções é executada dentro de um “case”. Caso seja “true” são executadas as três funções, caso seja “false” então não é feito nada. Este “case” é controlado pelo botão “trigger” que o utilizador pode utilizar.

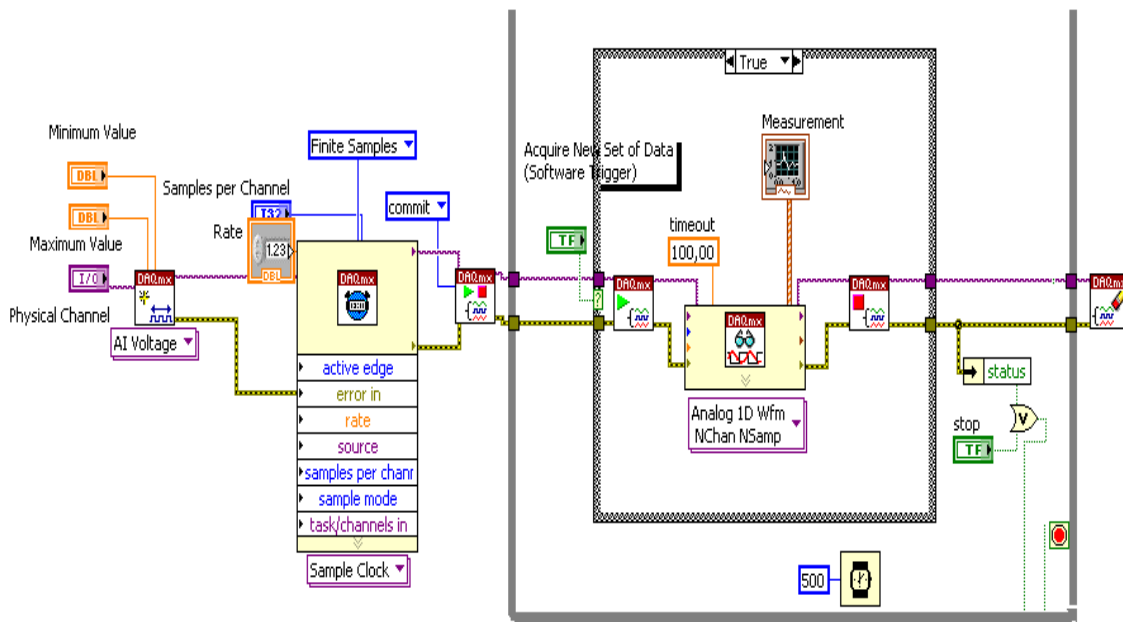


Figura 69 – Aplicação “Evento Aquisição”.

### 5.3.4.3 - Aplicação “Normalização”

Nesta fase, o sinal adquirido pelo sensor é decomposto nas suas duas componentes tempo e amplitude. Na componente das amplitudes soma-se ao sinal o mínimo do sinal e este é por sua vez dividido pela diferença entre o máximo e o mínimo de modo a obter o sinal normalizado.

Os máximos e mínimos do sinal adquirido pelo sensor são obtidos à custa de uma função chamada *Amplitude and level measurements*.

A forma de onda do sinal é reconstruída juntando a amplitude normalizada com o domínio do tempo, conforme se pode observar na Figura 70. Esta aplicação também guarda os dados num ficheiro.

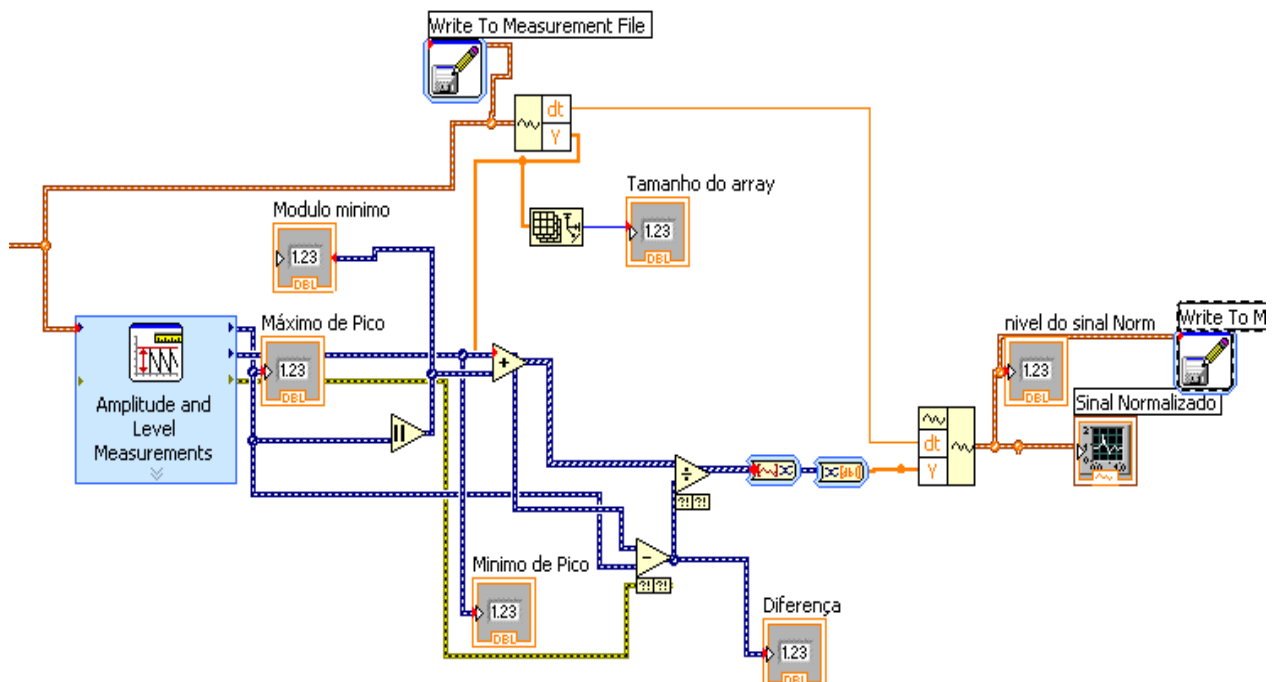


Figura 70 – Aplicação “Normalização”.

Tanto o sinal do sensor adquirido como o sinal normalizado são gravados em ficheiros de dados: sinal\_original.lvm e normalização.lvm na directória do ambiente de trabalho (Desktop).

Estes ficheiros vão ficar com a extensão “.lvm” e portanto, distinguem-se bem do programa que tem extensão “.vi”. Qualquer editor de texto abre estes ficheiros, nomeadamente o Microsoft (excel e o wordpad). Em todas as vezes seguintes os novos dados são acrescentados aos anteriores, não sendo destruída a versão já usada. Se se pretender um ficheiro sem dados, terá que se apagar este ficheiro primeiro, ao voltar a executar a aplicação um novo ficheiro é criado.

#### 5.3.4.4 - Aplicação “Processamento”

O sinal está modulado em 8 níveis ou seja 8-PAM como se ilustra na Figura 71. Desta forma, cada um dos 8 diferentes símbolos representa uma das 8 palavras de 3 bits. Esta modulação deve-se ao sinal óptico (vermelho, verde e azul) ser modulado no emissor. No receptor obtém-se um sinal de diferentes amplitudes. Para cada amplitude corresponde um ou combinações de comprimentos de onda. Ao analisarmos o sinal normalizado consegue-se identificar oito níveis diferentes. Estes são originados quando os leds se encontram activos nos diferentes instantes de tempo, como exemplo está ilustrado na Figura 71.

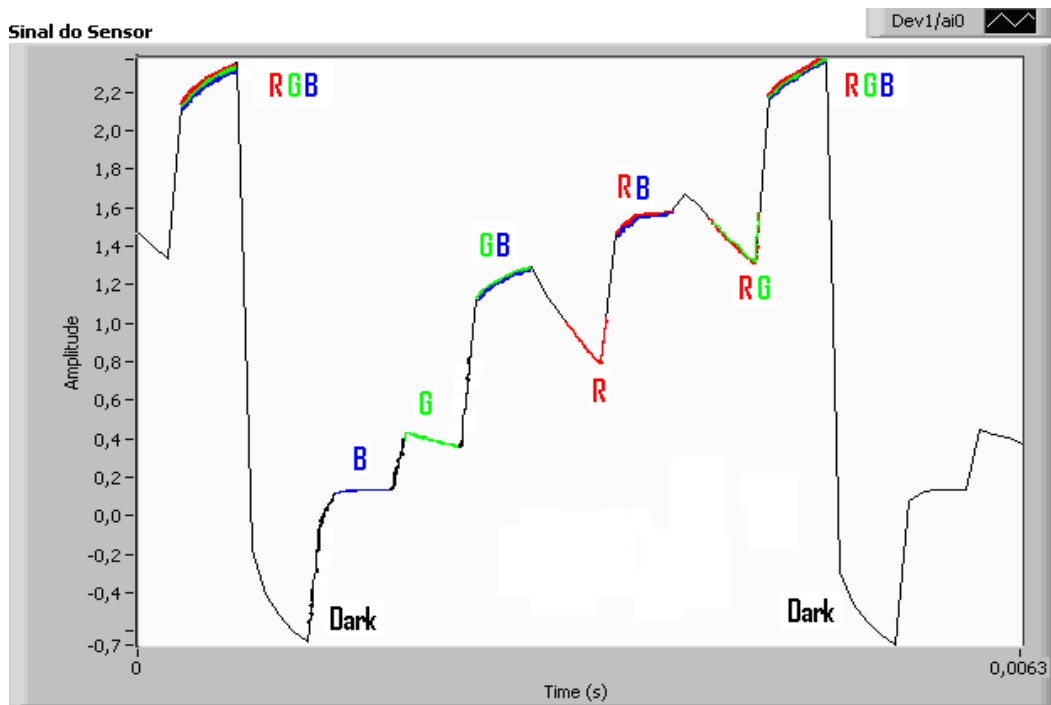


Figura 71 – Ilustração das respectivas cores para os 8 diferentes estados.

Para o sinal da Figura 71 usa-se a modulação multi-nível. A seguinte Tabela 5 faz a correspondência para os diferentes intervalos de amplitude com a codificação binária utilizada para o processamento.

Tabela 5 – Tabela de codificação para o Processamento.

Depois de se efectuar a quantificação dos níveis, procedeu-se à programação gráfica. A quantificação como já foi referido anteriormente, baseou-se na amplitude pois estamos a trabalhar com frequências duplas.

Para os primeiros quatro intervalos de amplitude, o sinal proveniente do led vermelho está presente. Desta forma é colocada a “1” e a “0” para os intervalos seguintes em que não está presente. O led verde está presente em intervalos dois a dois. Nos primeiros dois está a “1”, nos dois a seguir está apagado “0” e nos dois seguintes volta a estar presente estando nos dois últimos a “0”. O led azul está presente alternadamente, começa por estar a “1” e vai alternando com o “0”. O primeiro intervalo tem-se os três leds no estado “1” o que significa que se está na presença do sinal RGB (Vermelho, Verde e Azul) e no último intervalo temos os três leds no estado “0” o que representa a ausência de sinal óptico.

A Figura 72 mostra como foi feito este processamento para obtenção do sinal modulador.

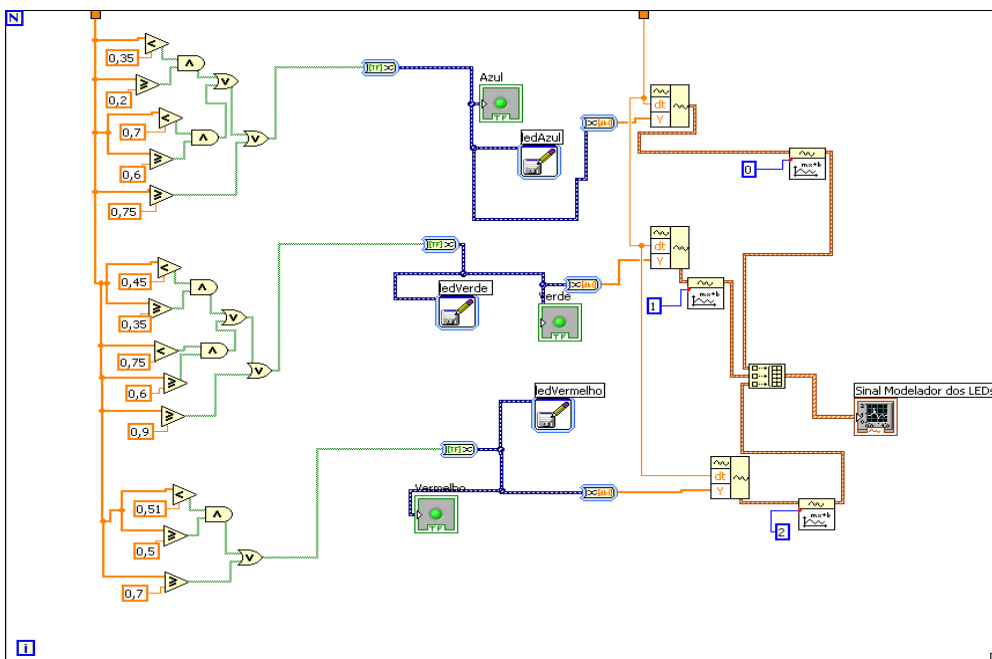


Figura 72 – Aplicação “Processamento”.

Na aplicação é representado por leds o sinal em verde cada instante, desta forma, para cada led foi efectuada a codificação binária de forma a garantir que só acendiam nesse determinado intervalo. Foi reconstituído o sinal no domínio do tempo com um determinado “offset” para cada led de forma a ser mais fácil a sua compreensão.

Para o led vermelho foi colocado um “offset” de 2, para o sinal verde um “offset” de 1 e o sinal azul não sofre qualquer “offset”. Assim pode-se representar o tipo de modulação que estão a sofrer no emissor.

Existiu um problema na execução do processamento pois a aquisição do sinal é feita usando como meio de transmissão o ar. Qualquer movimento no sinal óptico ou no próprio sensor influencia o sinal a adquirir ou melhor, altera os intervalos de amplitude definidos anteriormente.

## **5.4 - Resultados experimentais - Processamento**

Os resultados experimentais abaixo demonstrados são referentes ao sexto módulo que diz respeito ao funcionamento da Aplicação.

### **5.4.1 - Características de aquisição**

As características que vão ser alvo de apresentação dizem respeito ao sinal obtido no domínio da amplitude após todas as etapas descritas na aplicação. Desta forma vamos ilustrar o sinal para cada comprimento de onda individualmente e depois para as várias combinações possíveis.

#### **5.4.1.1 - Sinal obtido para cada comprimento de onda**

As figuras seguintes caracterizam os sinais para cada comprimento de onda individualmente após serem desmultiplexados pelo sensor.

Na Figura 73 temos o sinal adquirido pela aplicação “aquisição” e na Figura 74 o sinal após a aplicação “normalização”. Ambas ilustram o tipo de modulação efectuada no emissor. Desta forma temos boas perspectivas de se poder obter um sistema de desmultiplexagem.

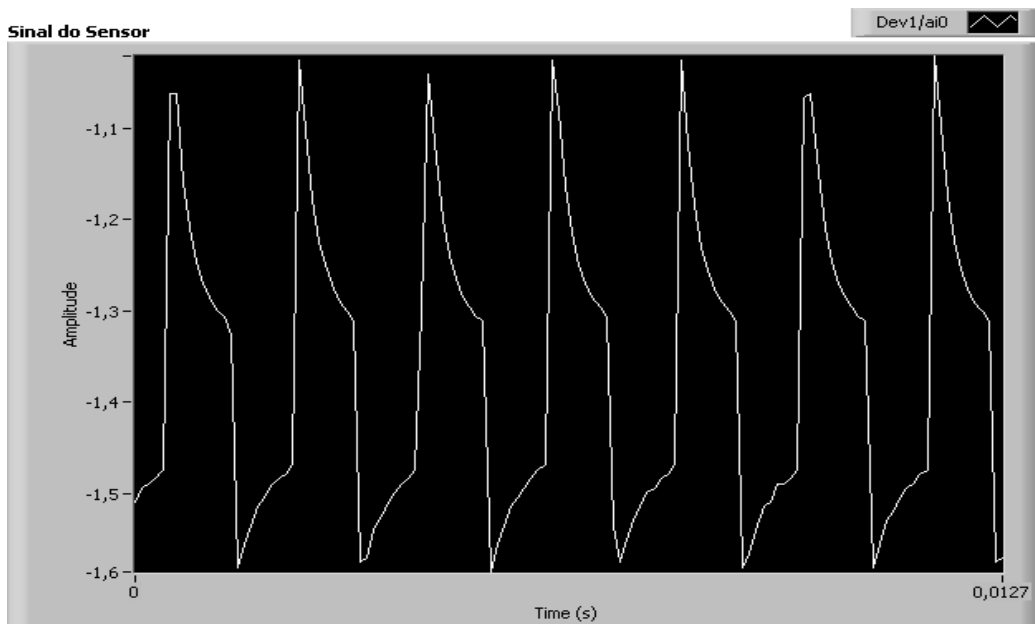


Figura 73 – Sinal obtido apenas com o comprimento de onda Vermelhos.

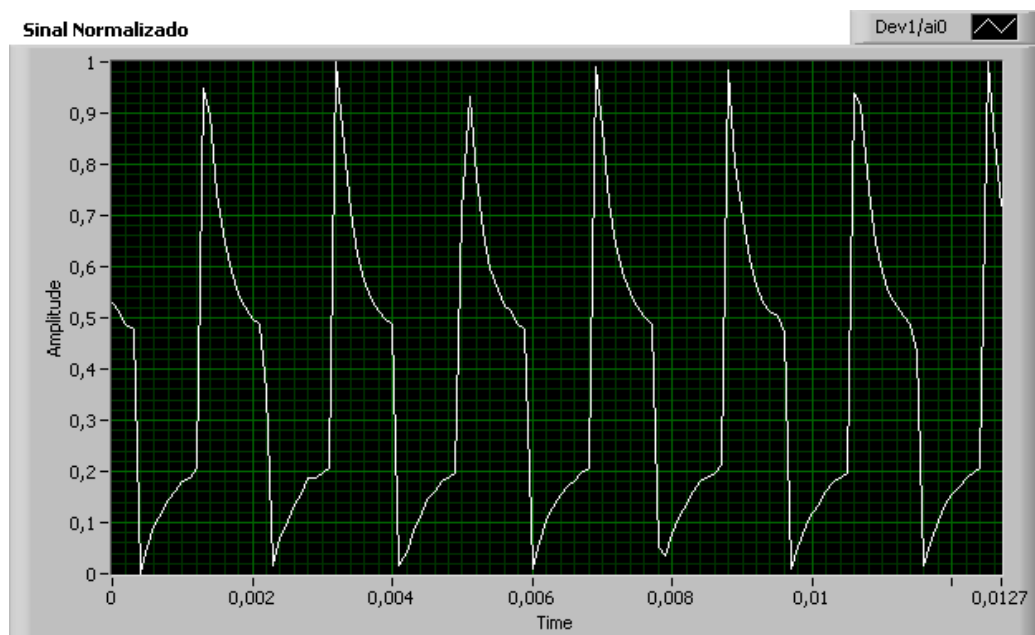


Figura 74 – Sinal normalizado obtido com o comprimento de onda Vermelhos.

A Figura 74 mostra o sinal distorcido. Esta distorção deve-se à frequência de 750 Hz que está a ser usada, pois quando se fez a análise no capítulo 4 para diferentes frequências obtivemos à frequência de 200 Hz o mesmo tipo de picos no sinal.

Para o sinal óptico verde, em que a frequência de funcionamento é 1500Hz, o sinal adquirido pelo sensor e o normalizado são bastante aceitáveis pois os níveis são bem definidos como é ilustrado na Figura 75 (sinal sensor) e Figura 76 (sinal normalizado).

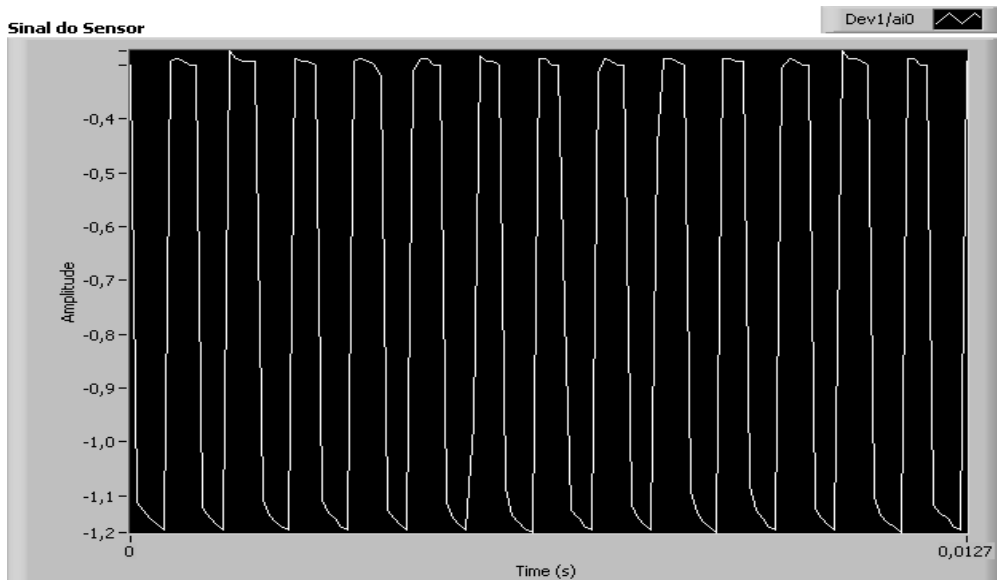


Figura 75 – Sinal do sensor obtido apenas com o comprimento de onda Verde.

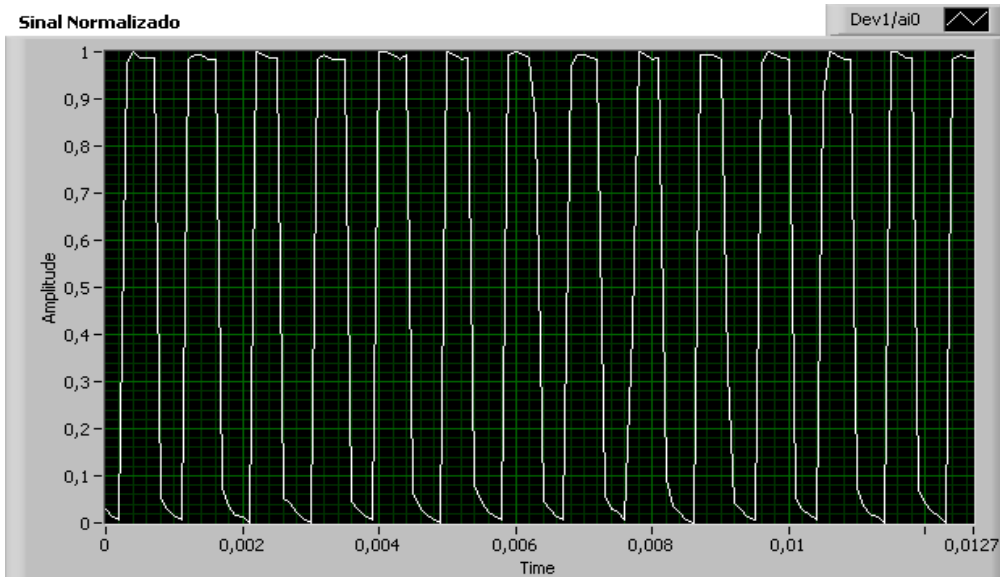


Figura 76 – Sinal normalizado obtido apenas com o comprimento de onda Verde.

Pode-se obter a frequência do sinal modulador pois num período temos 0,0007s o que corresponde sensivelmente a 1428 Hz. Desta forma, pode-se comprovar que se trata do sinal óptico verde visto que a modulação como já foi referida anteriormente no emissor é de 1500 Hz.

Na Figura 77 está representado o sinal após o processamento, quando só se estava na presença do led verde no emissor, e led vermelho e azul estavam desligados. O nível do sinal vermelho é de 2 devido ao “offset” imposto e de 0 para o sinal azul. A escala em segundos neste gráfico é metade da escala da Figura 76.

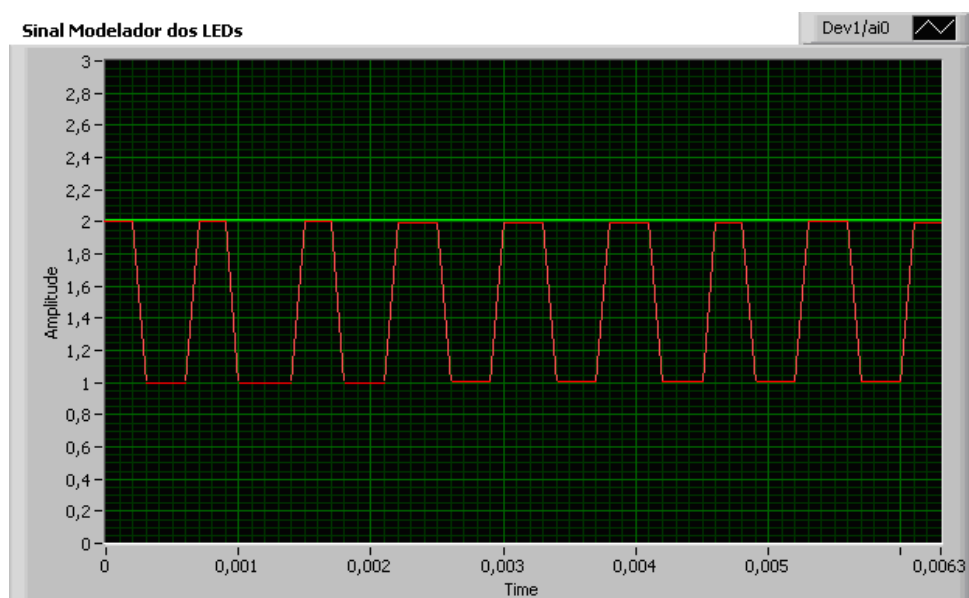


Figura 77 – Sinal modulador obtido para o sinal óptico Verde após usar a aplicação processamento.

A Figura 78 ilustra o sinal adquirido pelo sensor e a Figura 79 o sinal normalizado para o sinal óptico azul no emissor. A frequência utilizada para a modulação do led azul no emissor é de 3000Hz.

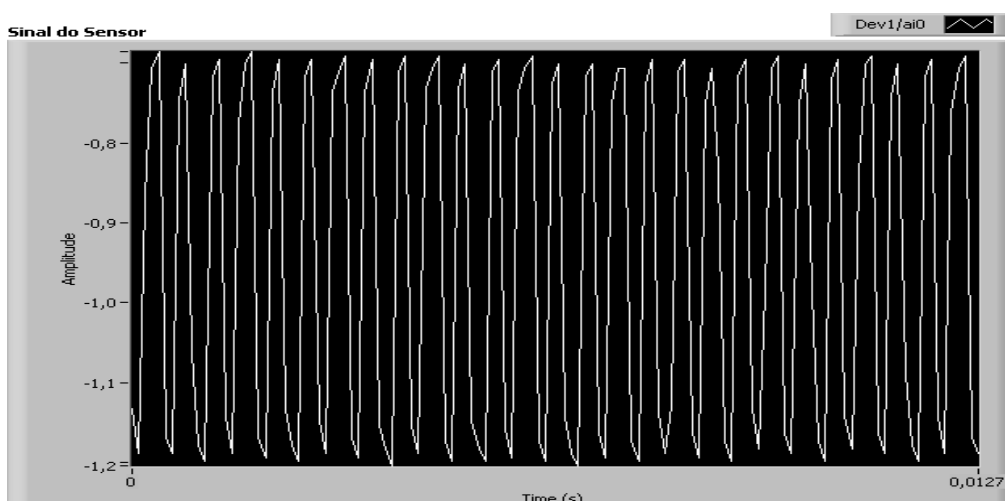


Figura 78 – Sinal obtido apenas com o comprimento de onda Azul.

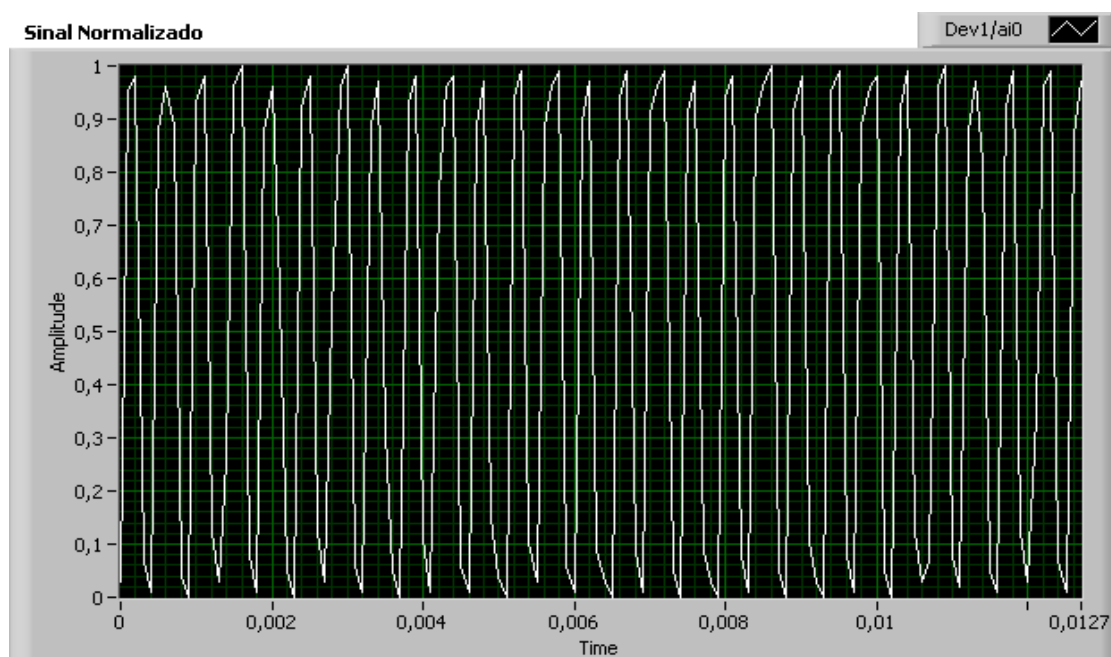


Figura 79 – Sinal normalizado apenas com o comprimento de onda Azul

Dos resultados obtidos, podemos concluir que para o sinal azul e verde a sua aquisição é bastante real entanto que na gama dos vermelhos, o sinal aparece distorcido. Por outro lado o tipo de modulação é bem visível pois o sinal vermelho é aquele que apresenta uma frequência menor e o azul o que apresenta uma frequência de modulação maior.

#### 5.4.1.2 - Sinal obtido para combinações dois comprimentos de onda

As figuras seguintes ilustram a combinação de dois sinais ópticos distintos: a Figura 80 corresponde às cores azul e vermelha, a

Figura 81 diz respeito ao vermelho e verde e a Figura 82 às cores verde e azul. A partir da combinação de dois sinais ópticos, iremos obter quatro níveis distintos. Estes níveis são possíveis graças ao sinal modulador ter frequências múltiplas, desta forma o sinal óptico funciona como “interruptor de estado”.

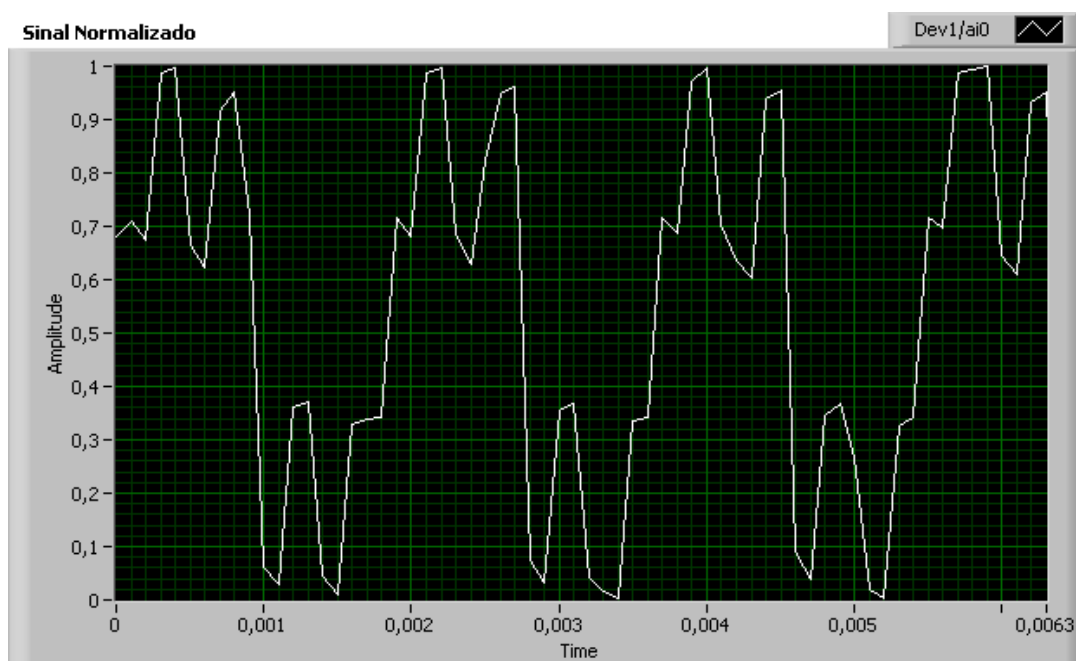


Figura 80 – Sinal obtido com o comprimento de onda em simultâneo na gama Azuis e do Vermelho.

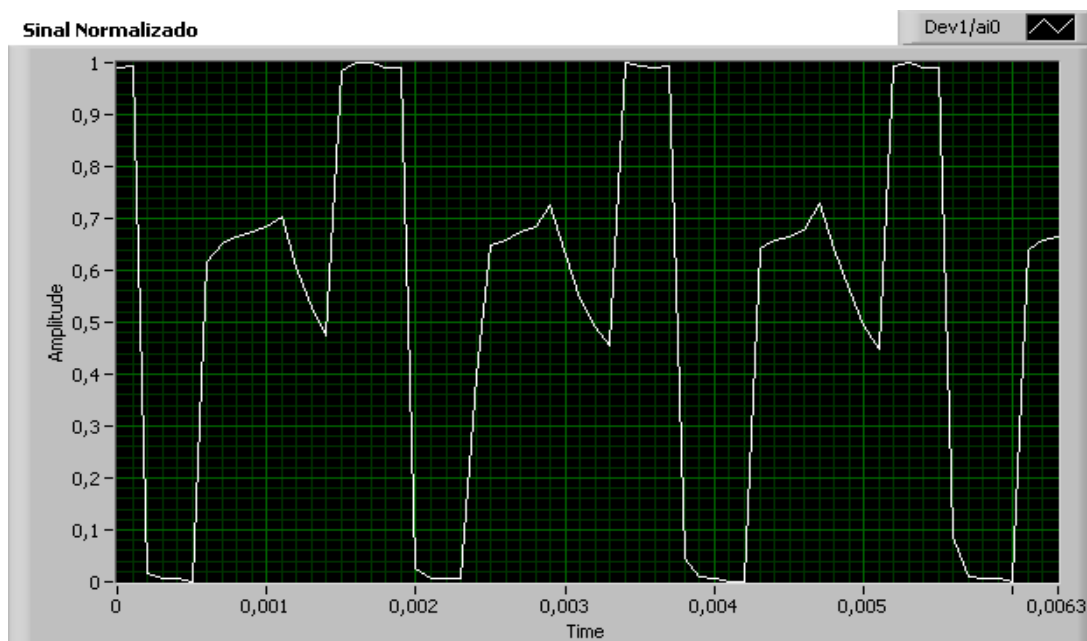


Figura 81 – Sinal obtido com o comprimento de onda em simultâneo na gama do Verde e do Vermelho.

A Figura 81 que tem a presença do vermelho e verde é o que tem os patamares mais extensos no domínio do tempo em comparação com a Figura 80, que tem a cor azul e vermelha, pois a frequência do azul é a mais baixa.

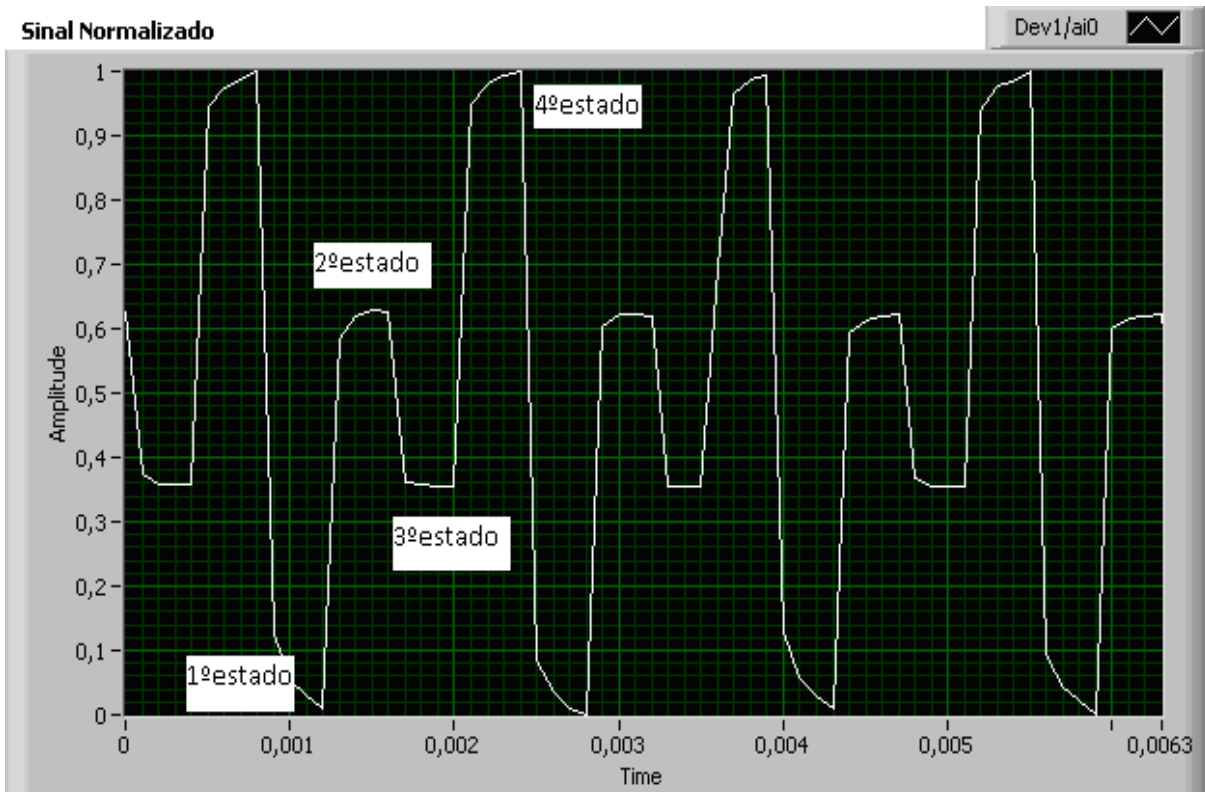


Figura 82 – Sinal obtido com o comprimento de onda em simultâneo na gama do Verde e do Azul.

Em todas as simulações é possível ter os quatro estados para a combinação de dois sinais. Por exemplo para a Figura 82 o primeiro estado azul e verde a “OFF” corresponde o nível de amplitude 0, o segundo estado azul a “ON” e verde a “OFF” corresponde a aproximadamente 0,6, o terceiro estado azul a “OFF” e verde a “ON” corresponde a 0,36 e o quarto estado azul a “ON” e verde a “ON” corresponde ao máximo da amplitude que é 1 para o gráfico da normalização.

Na Figura 83 o sinal é representado após se utilizar a aplicação processamento. O sinal representado com o “offset” de 2 é o sinal óptico verde e o sinal sem “offset” é o sinal óptico azul.

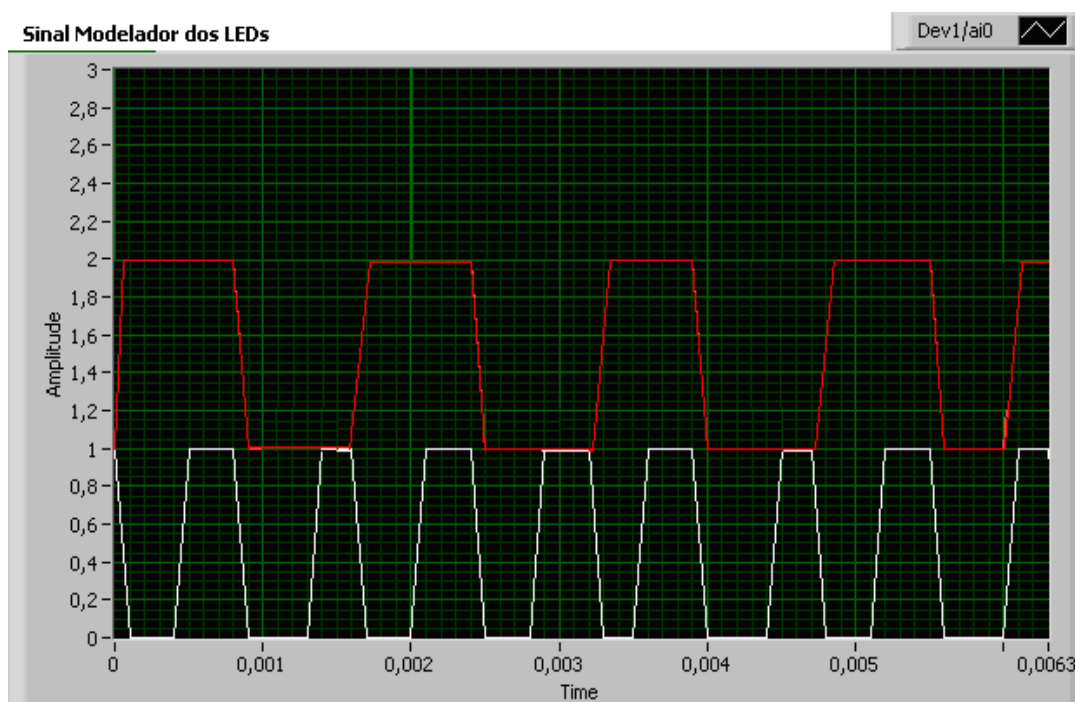


Figura 83 – Sinal modulador obtido para o sinal óptico verde e azul após usar a aplicação processamento.

Nesta fase temos o sinal desmultiplexado, adquirido pela aplicação. No emissor está-se a usar a combinação de dois sinais ópticos distintos (verde e azul).

### 5.4.1.3 - Sinal obtido para três comprimentos de onda em simultâneo

Quando estamos na presença dos três comprimentos de onda, verificamos que a frequência é a mais baixa de todas e a nível de amplitude esta obtém valores próximos, quando o vermelho está a emitir.

A Figura 84 mostra o sinal obtido pelo sensor quando temos os três leds em simultâneo com diferentes frequências. Neste sinal podemos observar os oito níveis distintos que já foram referidos na Figura 71. Vai ser a partir deste sinal que iremos efectuar a desmultiplexagem do sinal de forma a conseguir identificar os sinais ópticos emitidos.

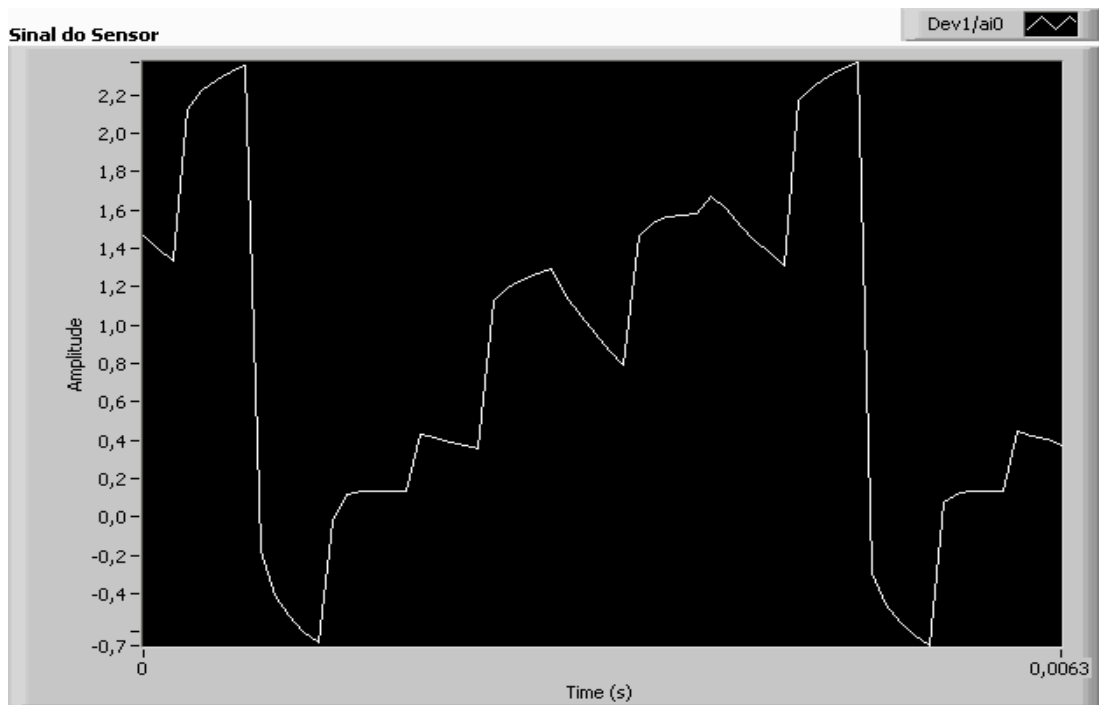


Figura 84 – Sinal obtido com os três comprimentos de onda em simultâneo, o verde, azul e vermelho.

A Tabela 6 mostra as frequências e amplitudes para os diferentes comprimentos de onda e respectivas combinações. Podemos verificar que a frequência de modulação do led verde é o dobro face à gama dos vermelhos e do led azul é o dobro face à gama do verde.

Tabela 6 – Frequências e amplitudes do sinal de fotocorrente medido sob diferentes condições iluminação.

C.d.O. [nm]	Freq. [mHz]	Âmpl.
Azul Verde Vermelho	Frequência	Amplitude
	0,214786	0,301856
	Frequência	Amplitude
0,107693	0,541836	
Frequência	Amplitude	
0,053696	0,200306	
Vermelho / Azul Azul / Verde Vermelho / Verde	Frequência	Amplitude
	0,054876	0,902436
	Frequência	Amplitude
0,109693	0,878666	
Frequência	Amplitude	
0,109866	0,345656	
Vermelho / Verde / Azul	Frequência	Amplitude
0,024036	0,264026	

Dos resultados obtidos podemos concluir que o sinal do led azul é facilmente influenciável na presença do led vermelho ou verde pois este que tinha uma frequência maior passa a ter a frequência que predomina no led que está em simultâneo.

#### 5.4.1.4 - Sinal desmultiplexado

Usando a aplicação de processamento obtivemos os dados ilustrados nas figuras abaixo em que se mostra o sinal obtido com os três comprimentos de onda em simultâneo (Figura 85) e o sinal modelador que lhe deu origem (Figura 86).

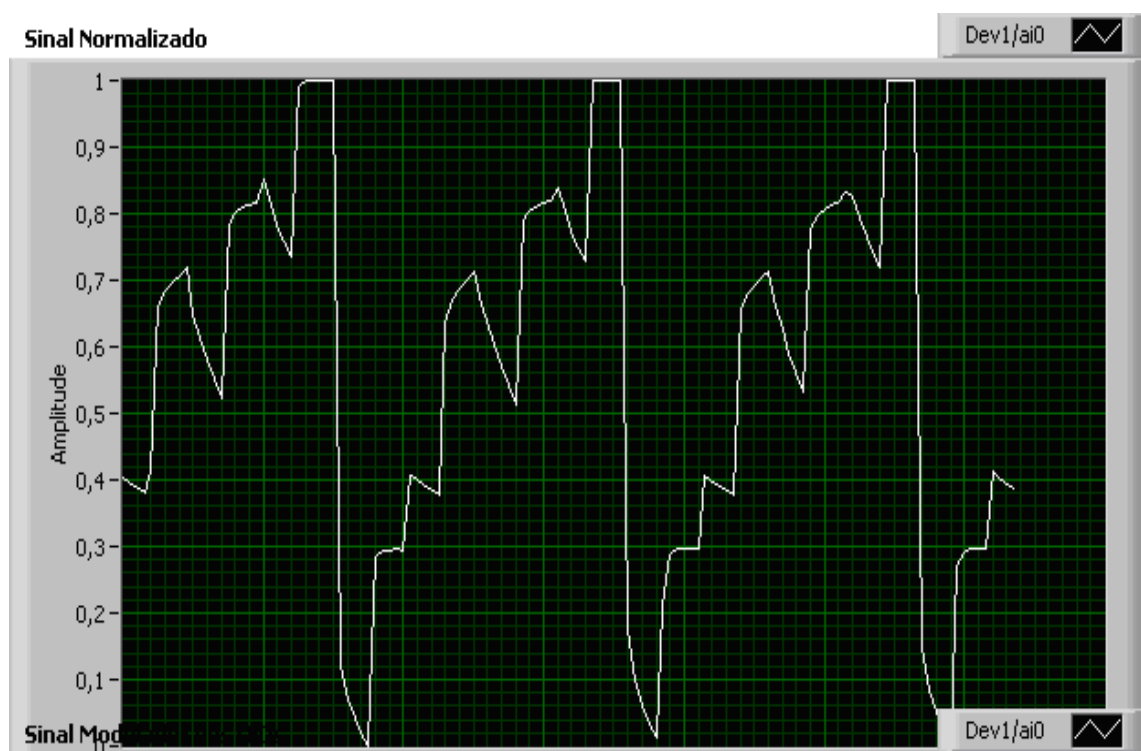


Figura 85 – Sinal normalizado.

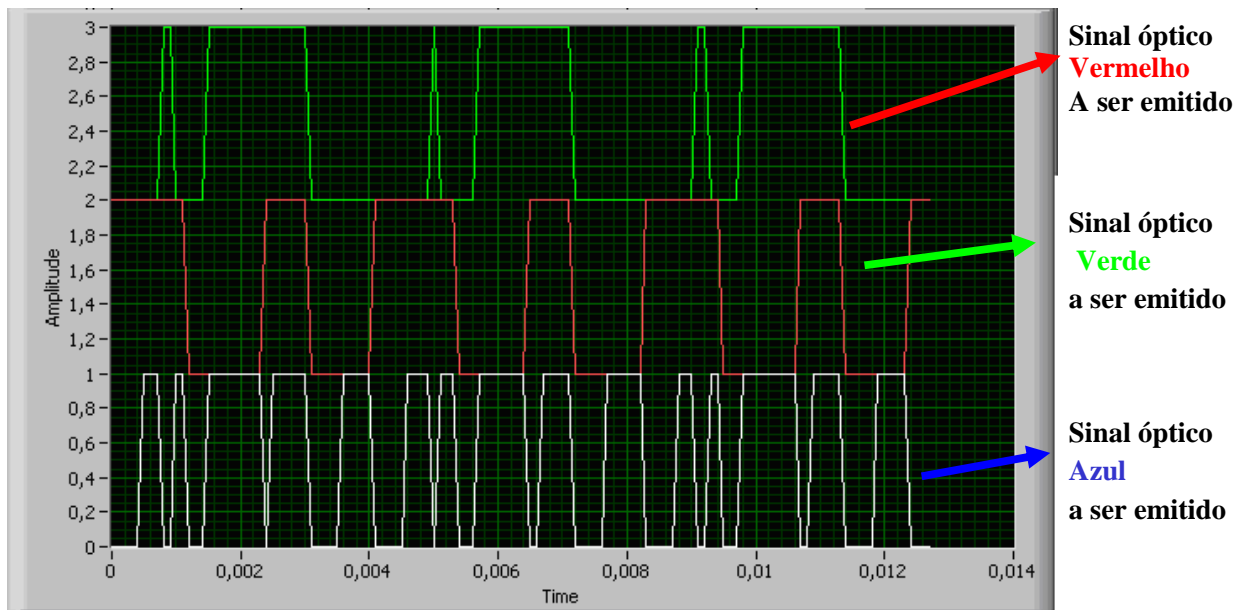


Figura 86 – Sinal modulador obtido após usar a aplicação processamento.

Pode-se concluir que os sinais desmultiplexados são idênticos aos utilizados na emissão. A frequência de modulação do Led azul é superior à do led verde, e a do verde é inferior à do led vermelho. O sinal com um “offset” de 2 é o sinal do led vermelho que apresenta um maior período o que corresponde a uma frequência menor. O sinal representado com “offset” de 1 corresponde ao sinal óptico do led verde que corresponde à frequência intermédia.

Para o sinal sem “offset” corresponde o led azul que foi modulado no emissor com a maior frequência desta forma obtém-se um período menor.

Da Figura 86 é possível identificar os diferentes estados dos leds amostrando quando é que os leds estão a “ON” e a “OFF” e as várias combinações que possibilitam os oito níveis distintos. Para uma melhor análise foi ilustrado apenas um período do sinal [8].

Na Figura 87 é ilustrado o sinal adquirido e o sinal reconstruído para que se possa avaliar o desempenho da aplicação processamento. Está conforme já foi descrito anteriormente baseou-se na modulação multinível. E obteve resultados bastante bons pois é possível identificar para cada nível qual o comprimento de onda a ser transmitido.

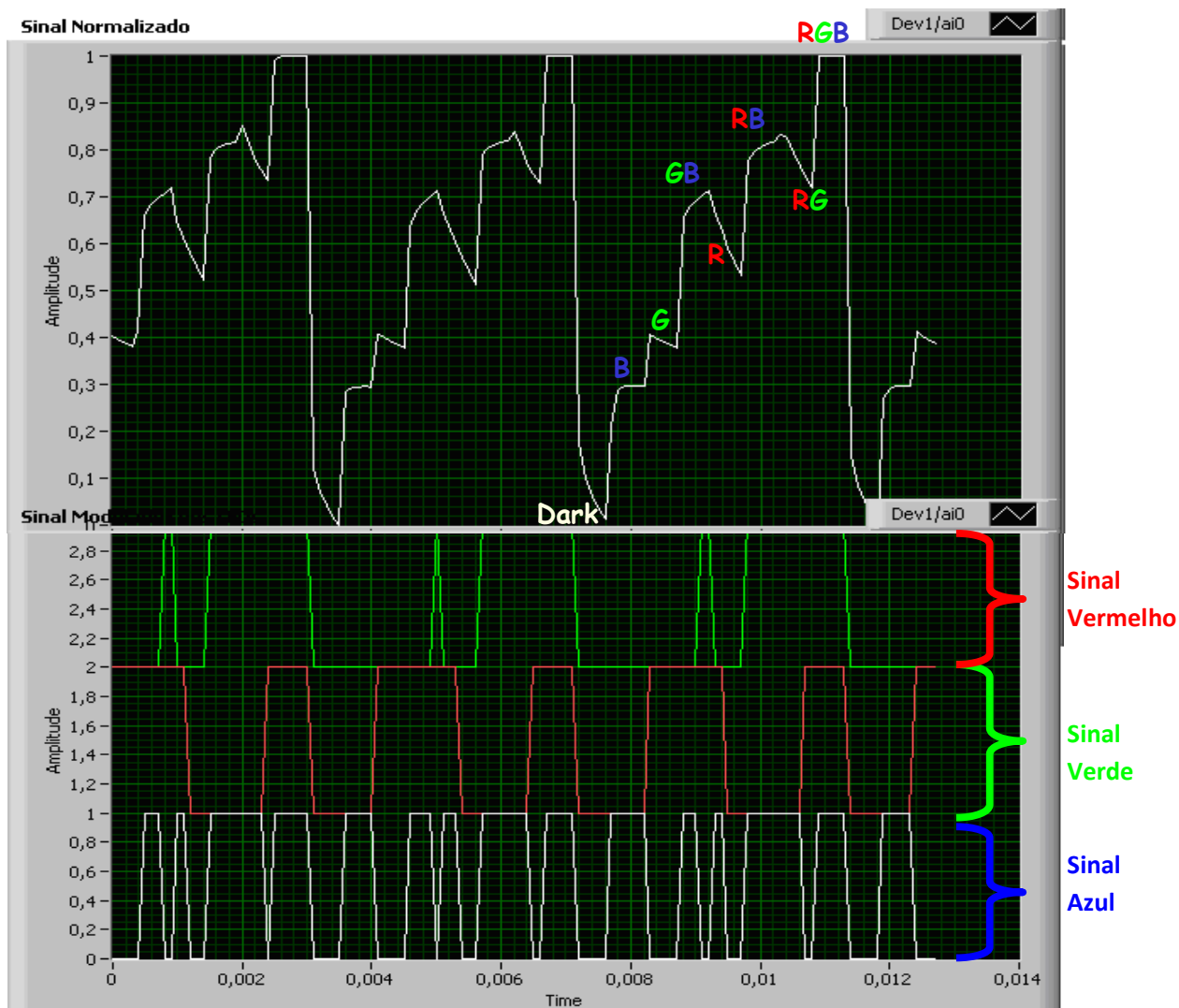


Figura 87 – Sinal reconstruído

## 5.5 - Tecnologias existentes no mercado

De forma a controlar o mercado e satisfazer as necessidades dos clientes, as empresas tendem a utilizar a fibra óptica como meio de transmissão, pois este meio transmissão é capaz de atingir velocidades de transmissão alguma vez em pensáveis com a existente rede de cobre.

Nos nossos dias maior parte dos serviços requer uma maior largura de banda, como exemplo disso é o triplay (Telefone, Internet e Televisão).

No entanto existe uma nova oferta para as soluções empresariais a rede MPLS para circuitos Ethernet. O MPLS (Multi Protocol Label Switching) será parte integrante da próxima geração de redes de dados:

- Proporciona a necessária ligação entre o nível IP e fotónico (nomeadamente, **IP sobre WDM**);
- Proporciona um rápido desenvolvimento, uma maior eficiência operacional e oportunidades de negócio adicionais;
- Garante a necessária flexibilidade para suportar o novo paradigma operacional dos operadores, tanto de segregação como de unificação da rede;
- Combina as actuais técnicas de plano de controlo com as novas potencialidades de fornecimento (do tipo point-and-click) proporcionadas pelos comutadores fotónicos;
- Define um plano de controlo standard e forma de sinalização entre os elementos da rede, possibilitando um melhor controlo operacional;
- Suporta múltiplos tipos de ligação (por pacotes, por comprimentos de onda, por fibra, bundles, etc);
- Baseia-se nos standards já desenvolvidos;
- Integra 50 anos de experiência de desenho, sinalização, encaminhamento e gestão de redes de comunicações.

O MPLS proporciona ainda, uma arquitectura pragmática e protocolos para definição de rotas baseadas em condicionalismos de QoS (Quality of Service):

- Independentes do *payload* da codificação;
- Garantindo o estabelecimento consistente de rotas para várias tecnologias;
- Explorando as evoluções no encaminhamento baseado nos condicionalismos do MPLS;
- Abrindo os mercados de equipamentos actualmente cingidos a soluções proprietárias;
- Abrindo novas perspectivas de arquitectura:
  - Modelo de *overlay* – diferentes instancias do plano de controlo no domínio da rede de transporte óptica (OXC) e no domínio IP(LSR)

- Modelo de *Peer* – uma instancia do plano de controlo que suporta LSRs e OXCs; permite o fornecimento de largura de banda a pedido (bandwidth-on-demand networking).

O MPLS suporta ambos os modelos dando aos fornecedores de serviços (SPs) liberdade de escolha.

Conforme se ilustra na Figura 88 uma das possíveis arquitecturas de uma rede Ethernet com media converter no cliente, usando a rede MPLS.

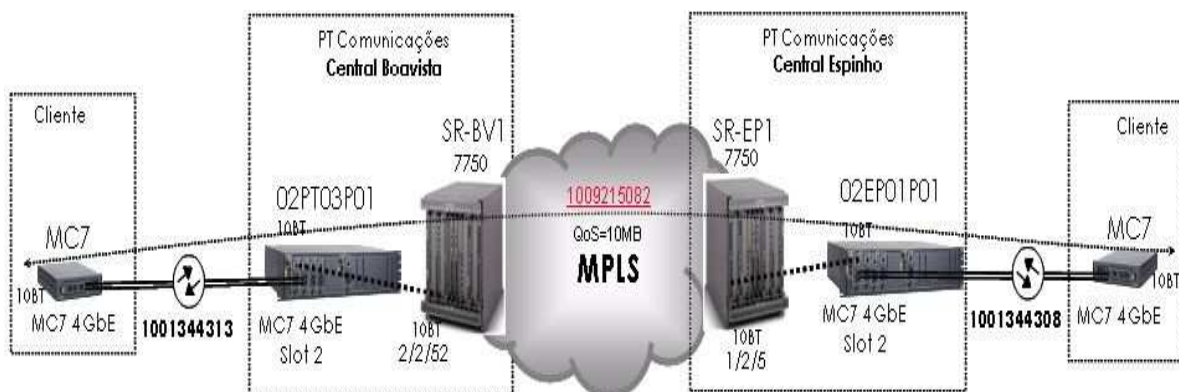


Figura 88 – Rede Ethernet

Na, Portugal Telecom o equipamento terminal usado pertence a PT Inovação (MC7) e a MRV (MC). O Media Converter é um sistema de demarcação de redes Ethernet e é efectuada através da rede MPLS da PT Comunicações. Conforme se ilustra na Figura 88 uma das possíveis arquitecturas de uma rede Ethernet com media converter no cliente.

Esta rede utiliza como meio de transmissão entre as centrais de acesso e o cliente, fibra óptica e no cliente é colocado um equipamento terminal *Customer Premises Equipment* (CPE) um Media Converter (MC).[9]



Figura 89 – Equipamento de cliente (Media Converter – MC7)

Este equipamento media converter, tem a função de converter o sinal óptico da rede WAN (Wide Area Network) num sinal eléctrico para a rede LAN (Local Area Network). No entanto estes equipamentos media converter também funcionam com as redes SDH.

Este equipamento terminal, media converter, utilizam como interfaces os SFP (Small Form-Factor Plug-in) para a fibra óptica e RJ45 para a interface eléctrica. A Figura 90 ilustra o SFP, com um invólucro metálico que permite encaixar na *slot* de cada carta media converter.



Figura 90 – Interfaces SFP (Small Form-Factor Plug-in)

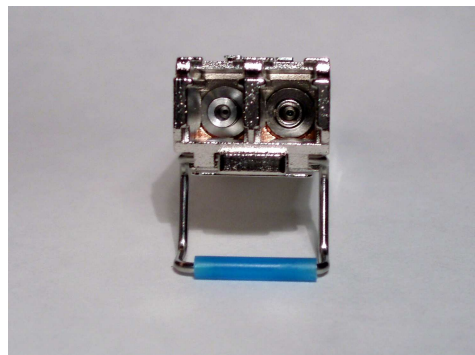


Figura 91 – Vista frontal do *Transiver* óptico - SFP

A carta permite vários tipos de interfaces de linha, como interfaces de linha temos os SFP. Os diferentes tipos de SFP's vão determinar o alcance e características da interface óptica.

Tabela 7 – Características dos diferentes SFP ópticos.

Interface	SFP-1000BASE-T Eléctrico	SFP- 1000BASE-SX	SFP- 1000BASE-LX	SFP- 1000BASE-ZX
Distancia de Alcance	-	500 m	20 Km	80 Km
Comprimento de Onda	-	850 nm	1310 nm	1550 nm

A simplicidade do design dos SFP's cria uma nova definição em facilidade para o usuário com desempenhos mecânicos e ópticos incríveis. Os “Transceiver” Óptico foram desenvolvidos para ir ao encontro da crescente necessidade do mercado em ter disponível um equipamento WDM com elevada potência óptica, tendo em conta a notória expansão de equipamentos WDM não só na rede core mas também na rede metropolitana, em resposta ao aumento do volume e da velocidade de transmissão de dados.

No anexo 2 são apresentadas três tabelas com as características mais detalhadas dos SFP 1000B – LX, 1000B – SX e 1000B – ZX. Uma das características, nestas tabelas, que merece mais atenção é o tipo de detector, para estes SFP existentes no mercado são do tipo IN AR GA PIN.[10]

## 5.6 - Referências

- [1] Roland K. Schreyer, Gregory J. Sonek, “An Optical Transmitter/Receiver System for Wireless Voice Communication”, IEEE Transactions on Education, Vol. 35, No. 2, May 1992.
- [2] - J.E. Bowers, C.A. Burrus, et al, InGaAs PIN Photodetectors With Modulation Response to Millimetre Wavelengths, Electronic Letters, Vol.21. N°18, 29 de Agosto 1985.
- [3] - [http://www.roithner-Laser.com/ All\\_Datasheets/ LEDs/ LED565-660-04A.pdf](http://www.roithner-Laser.com/ All_Datasheets/ LEDs/ LED565-660-04A.pdf)
- [4] - Giovanni Cancellieri, Single-Mode Optical Fiber Measurement: Characterization and Sensing, Artech house, Inc., 1993
- [5] - [http://www.foc-fo.de/data/Onlinekatalog\\_DE.pdf](http://www.foc-fo.de/data/Onlinekatalog_DE.pdf)
- [6] - <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/SR570m.pdf>
- [7] - National Instruments “NI USB-6008/6009 User Guide and specifications”, December 2007 edition.
- [8] - C. Francisco, P. Louro, M. Barata, “Demultiplexagem óptica controlada por tensão (DOV)”, Jornadas de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores - JETC08, 20 e 21 de Novembro de 2008.
- [9] – Portugal Telecom “Manual de formação MC7 – PT Inovação”, edição Junho 2008.
- [10] – Portugal Telecom “Relatório Técnico – Troubleshooting Emilo MC7”, edição Dezembro 2005.

## Capítulo 6 - Conclusão e desenvolvimentos futuros

Neste trabalho foi apresentada a concepção de um processo de otimização para a produção de equipamentos WDM. Foi ainda desenvolvido, implementado e testado um processo de multiplexagem e demultiplexagem. Este protótipo permite alargar o âmbito de aplicações aos sistemas WDM de telecomunicações a curtas distâncias e permite também a um utilizador executar o processo de um modo automático.

Um dos grandes desafios iniciais, era a construção de um sistema a custo de um dispositivo inovador. Outra desafio, foi a utilização de uma linguagem de programação nova, ainda mais com uma lógica de programação com muito poucas parecenças com outras linguagens aprendidas no decorrer do curso. Com o período de aprendizagem feito inicialmente, através de pequenas experiências, com o auxílio da documentação da National Instruments e dicas de outros docentes, a ambientação às ferramentas existentes no LabVIEW foi relativamente rápido, permitindo desde logo implementar os primeiros Vi's.

Quanto aos desenvolvimentos futuros existem alguns pontos de melhoria nomeadamente a possibilidade de utilizar como meio de transmissão a fibra óptica e outros comprimentos de onda diferentes do vermelho, azul e verde. Outro aspecto que carece de otimização é o estudo do desempenho do fotodetector para frequências mais elevadas.

Em relação ao sistema de processamento desenvolvido, os resultados obtidos permitiram demonstrar a demultiplexagem. Contudo, o seu desempenho pode ainda ser melhorado de forma a conseguir uma melhor aproximação do sinal original. Esta melhoria pode ser conseguida através de um acoplamento dos leds à fibra óptica utilizando o multiplexador de três entradas em fibra óptica apresentado.

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

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o dispositivo em causa pode ser usado na multiplexagem/demultiplexagem de pelo menos três canais diferentes (RGB), o que possibilita boas perspectivas de utilização.

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

# ANEXOS

## Anexo 1 - Caracterização no domínio da Frequência

Do sistema anteriormente descrito, o que irá alterar é a modulação do sinal óptico em vez de ser um sinal pulsado é um sinal sinusoidal e existe uma aplicação “Processamento Frequência”.

O sinal óptico neste processamento irá ser modulado por ondas sinusoidais com frequências diferentes, tendo-se usado três osciladores diferentes para controlar cada led.

Nesta aplicação “Processamento Frequência” pretende-se descobrir quais as frequências que estão a modular o sinal óptico no emissor. Conhecidas estas frequências (frequências das portadoras) podemos sobrepor um sinal de informação.

Após a aquisição do sinal desmultiplexado pelo sensor, apresentado na Figura 92, aplica-se a FFT *Fast Fourier Transform*. A transformada de *Fourier* permite descobrir qual a frequências contidas no sinal desmultiplexado pelo sensor.

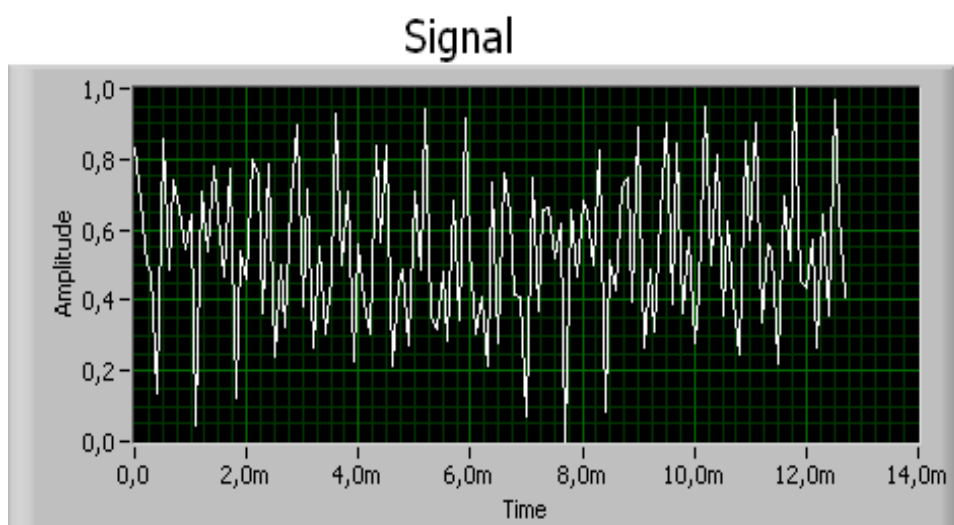


Figura 92 – Sinal Normalizado.

A FFT utilizada no programa Labview é FFT “Flat Top” que se baseia na medição do sinal espectral, na média da amplitude do espectro, na potência do espectro e na fase espectral do sinal. A Figura 93 ilustra a aplicação desenvolvida em Labview.

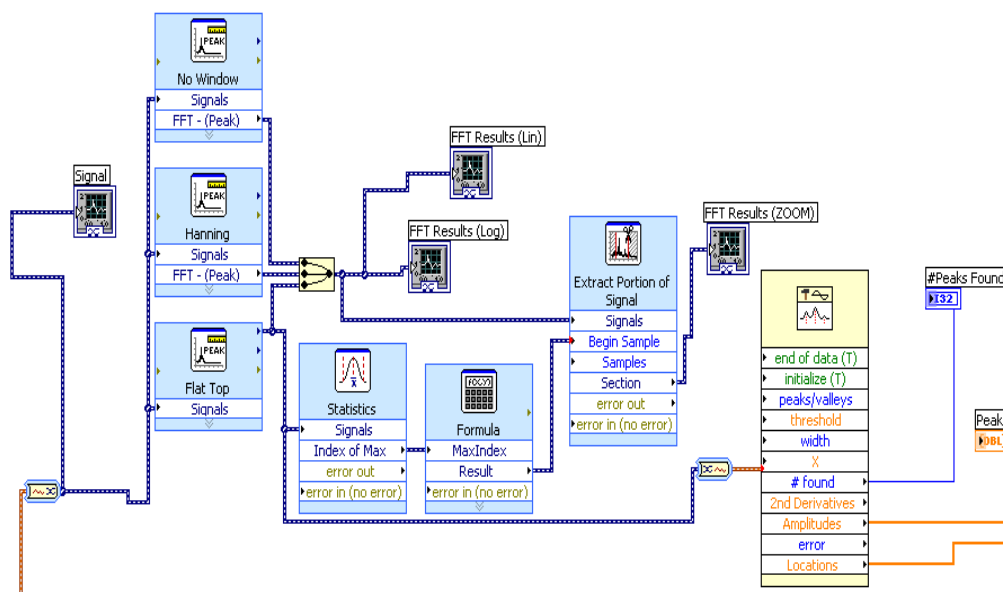


Figura 93 – Aplicação “Processamento Freqüência”

Após a FFT é feito um tratamento estatístico que retorna os parâmetros do primeiro sinal da forma de onda. Deste modo obtemos as frequências de modulação dos sinais originais. A Figura 94 mostra as frequências dos três leds. À frequência de 4200 Hz temos o Vermelho, à frequência de 2500 Hz temos o Verde e a 1400 Hz temos o Azul.

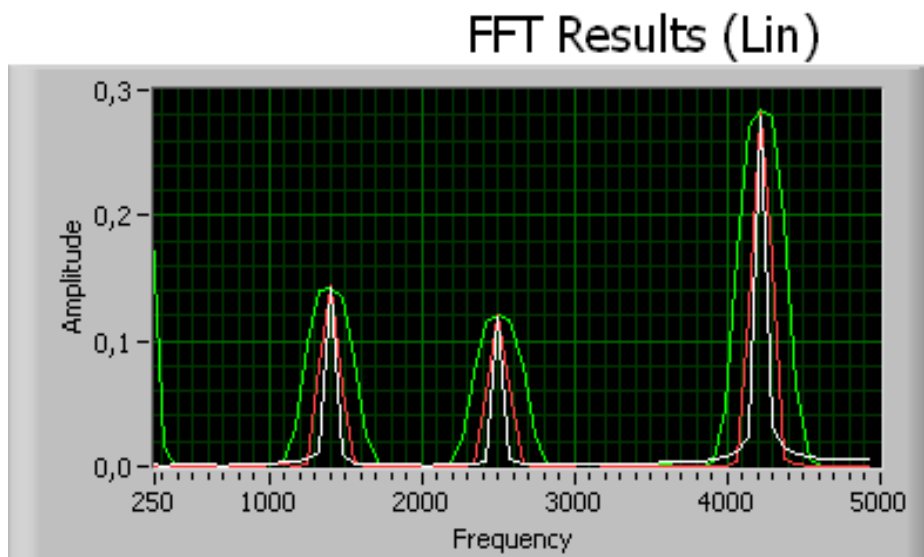


Figura 94 – Sinal modelador

Após estes resultados pode-se concluir que o processamento no domínio da frequência é mais fiável no ponto de vista de flexibilidade de tratamento do sinal (imune a luz ambiente).

No entanto esta técnica só teria interesse caso as frequências fossem múltiplas, não representando assim um caso real. Com o acoplamento da fibra óptica os efeitos exteriores como as interferências da luz ambiente e o posicionamento dos leds em relação ao sensor.

## Anexo 2 - Características ópticas dos SFPs:

### 1000B- SX

CHARACTERISTICS	VALUES			
	DIGITAL SIGNAL Nominal bit rate	Gbps	GBE interface according to IEEE 802.3 1.250 Gbps	
Application code		1000B-SX		
	<b>TX SIDE</b>	<b>UNIT</b>	<b>CONDITIONS</b>	<b>MIN</b>
Output optical power				<b>MAX</b>
Output optical power				
Output optical power BOL (25°C, nominal power supply)				
Operating wavelength range				
$\Delta\lambda$ rms				
Relative Intensity Noise				
	<b>RX SIDE</b>			
Type of detector		IN Ga As PIN		
Sensitivity				
Sensitivity BOL (25°C, nominal power supply)				
Stressed Receiver Sensitivity				
Maximum input optical power				
Maximum input optical power BOL (25°C, nominal power supply)				
Operating wavelength range				
Loss of signal – Assert Pin				
Loss of signal – Deassert Pin				
LOS Hysteresis				
Data Output Rise/Fall time				
* With fiber: 550 m MMF 50 $\mu$ m (500 MHz Km @ 850nm) 500 m MMF 50 $\mu$ m (400 MHz Km @ 850nm) 275 m MMF 62.5 $\mu$ m (200 MHz Km @ 850nm) 220 m MMF 62.5 $\mu$ m (160 MHz Km @ 850nm)				

**1000B - LX**

CHARACTERISTICS	VALUES			
	DIGITAL SIGNAL Nominal bit rate	Gbps	GBE interface according to IEEE 802.3 1.250 Gbps	
Application code		1000B-LX		
<b>TX SIDE</b>	<b>UNIT</b>	<b>CONDITIONS</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>
Output optical power (SMF)	dBm	–	–11.0	–3.0
Output optical power BOL (SMF) (25°C, nominal power supply)	dBm	–	–10.0	–3.0
Output optical power on MMF 50 & 62.5µm	dBm	–	–11.5	–3.0
Output optical power BOL on MMF 50 & 62.5µm (25°C, nominal power supply)	dBm	–	–10.5	–3.0
Operating wavelength range	nm	–	1270	1355
Δλ rms	nm	–	–	4.0
Relative Intensity Noise	dB/Hz	–	–	–120
<b>RX SIDE</b>				
Type of detector		IN Ga As PIN		
Sensitivity	dBm	*	–	–20.0
Sensitivity BOL (25°C, nominal power supply)	dBm	*	–	–21.0
Stressed Receiver Sensitivity	dBm	See IEEE 802.3	–	–14.4
Maximum input optical power	dBm	–	–	–3.0
Maximum input optical power BOL (25°C, nominal power supply)	dBm	–	–	–2.0
Operating wavelength range	nm	–	1270	1355
Loss of signal – Assert Pin	dBm	–	–30	–21.0
Loss of signal – Deassert Pin	dBm	–	–30	–20.0
LOS Hysteresis	dB	–	1	4.0
Data Output Rise/Fall time	ps	–	–	175
* With fiber: 550 m MMF 50 µm (400 MHz Km @ 1300nm) 550 m MMF 62.5 µm (500 MHz Km @ 1300nm) 5000 m SMF 10 µm				

**1000B – ZX**

CHARACTERISTICS	VALUES			
	DIGITAL SIGNAL Nominal bit rate	Gb/s	GBE interface according to IEEE 802.3 1.250 Gb/s	
Application code		1000B-ZX		
<b>TX SIDE</b>	<b>UNIT</b>	<b>CONDITIONS</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>
Output optical power (SMF)	dBm	–	0.0	+ 5.0
Operating wavelength range	nm	–	1540	1570
$\Delta\lambda$ rms	nm	–	–	1.0
<b>RX SIDE</b>				
Sensitivity				
Pmin1	dBm		–	–24.0 (*)
Pmin2			–	–22.0 (**)
Overload	dBm	–	0	–
Operating wavelength range	nm	–	1540	1570
Loss of signal – Assert Pin	dBm	–	–30	–24.5
Loss of signal – Deassert Pin	dBm	–	–29.5	–24.0
LOS Hysteresis	dB	–	0.5	6.0
Reflectance	ps	–	–	–12.0
(*) – Conditions: BER=10 <sup>-12</sup> Measured at 1250 Mbps, PRBS 2 <sup>7</sup> -1, NRZ back to back  (**) – Conditions: BER=10 <sup>-12</sup> Measured at 1250 Mbps, PRBS 2 <sup>7</sup> -1, NRZ with fiber				