

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**

FÁBIO LUIS AZEVEDO DE CASTRO

**APERFEIÇOAMENTO DA SENSIBILIDADE E DA FAIXA
DINÂMICA DE UM MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA
(OPMo) BASEADO NO ESPALHAMENTO DE LUZ**

**NITERÓI/RJ
2018**

FÁBIO LUIS AZEVEDO DE CASTRO

**APERFEIÇOAMENTO DA SENSIBILIDADE E DA FAIXA
DINÂMICA DE UM MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA
(OPMo) BASEADO NO ESPALHAMENTO DE LUZ**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação Strictu Sensu em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. RICARDO MARQUES RIBEIRO

**Niterói/RJ
2018**

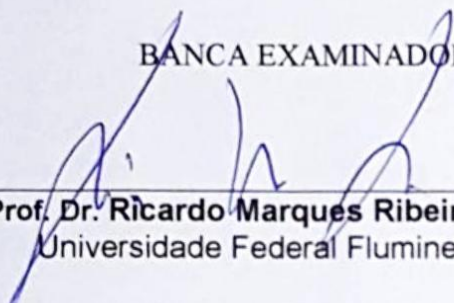
FÁBIO LUIS AZEVEDO DE CASTRO

**APERFEIÇOAMENTO DA SENSIBILIDADE E DA FAIXA DINÂMICA DO
MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA (OPMO)**

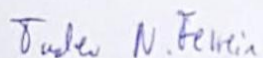
Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense como requisito parcial para a
Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de
Telecomunicações

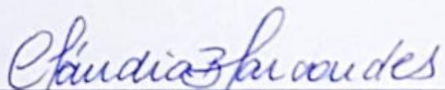
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro - orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira
Universidade Federal Fluminense - UFF



Profª. Drª. Claudia Barucke Marcondes Paes Leme
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET

Niterói
(DEZ/2018)

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C355a Castro, Fábio Luis Azevedo de
APERFEIÇOAMENTO DA SENSIBILIDADE E DA FAIXA DINÂMICA DE UM
MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA (OPMo) BASEADO NO ESPALHAMENTO DE
LUZ / Fábio Luis Azevedo de Castro ; Dr. Ricardo Marques
Ribeiro, orientador. Niterói, 2018.
67 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2018.m.10154045705>

1. Monitor de potência óptica. 2. Fibras ópticas de
plástico. 3. Produção intelectual. I. Ribeiro, Dr. Ricardo
Marques, orientador. II. Universidade Federal Fluminense.
Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, por ter me ensinado o valor das pequenas coisas da vida e a minha mãe por ser minha espada e meu escudo. Sem vocês nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus e a mim. Pois somente eu poderia realizar esta conquista e sem Deus jamais chegaria a algum lugar.

Aos meus pais que me guiaram no caminho correto, e sempre me mostraram que sem esforço e dedicação nada na vida é possível.

Aos meus amigos de laboratório que me ajudaram nos momentos de dificuldades compartilhando seus conhecimentos comigo.

Ao Professor Ricardo Marques Ribeiro, que teve toda a paciência do mundo e me deixou trabalhar livremente e me orientou em todos os momentos em que foi solicitado.

Ao meu filho Leonardo que chegou num momento crucial de minha vida e me deu a inspiração que eu havia perdido com o falecimento de meu pai.

Aos acontecimentos da vida que me trouxeram até aqui. Mesmo nas dificuldades temos que encontrar algo de bom para crescermos intelectualmente.

A minha vó que vivia me contando histórias que me inspiraram a fazer coisas grandiosas e poder um dia contar as minhas próprias.

Em especial ao meu pai, que foi meu amigo e mentor intelectual durante 25 anos da minha vida, cada vitória conquistada por mim eu dedico a ti meu amigo aonde quer que você esteja.

RESUMO

Os medidores de potência óptica em linha (OPMos) são dispositivos ativos para medir a potência óptica ao longo de uma fibra óptica sem interromper o enlace óptico. Geralmente, um OPMo utiliza uma amostra da luz ($\sim 1\%$), que está se propagando ao longo da fibra, para medir a potência óptica total. Foram relatados OPMos simples e baratos adequados para monitorar enlaces baseados em PMMA-POF de 1 ou 2 canais. Ambas as versões não perturbam a propagação da luz. De fato, o espalhamento espontâneo de luz é foto-detectado lateralmente, levando a sensibilidade de -50dBm e faixa dinâmica de 45dB sem qualquer processamento de dados. Deve-se ressaltar que a sensibilidade de -50 dBm fora do âmbito do presente trabalho foi, obtida a grosso modo devido ao elevado nível de ruído quando comparado com baixas potências ópticas a se medir.

A perda de inserção de um OPMo deve ser baixa o suficiente para perturbar de forma desprezível a comunicação do enlace e isso pode ser conseguido por meio de conectorização ou emenda de alta qualidade entre as POFs. Se o OPMo for colocado imediatamente antes do receptor (ou logo após o transmissor), uma única conectorização é suficiente, caso contrário, são necessários duas. Assumindo uma inserção permanente, a técnica de emenda, usando um adesivo transparente apropriado, de estilo "faça você mesmo", rápida, robusta e barata, é usada aqui para produzir conexões com perda potencialmente de $(0,4 \pm 0,1)$ dB ou até menos.

Neste trabalho, descreveremos melhorias no OPMo, mantendo seu princípio operacional original, simplicidade e custo. O novo protótipo de laboratório foi elaborado com base nos protótipos anteriores. Porém, algumas melhorias estéticas baseadas em princípios físicos (blindagem eletrostática), buscando eliminar ruídos e interferências externas nos resultados medidos, foram aqui implementadas. O circuito elétrico do dispositivo foi integrado ao protótipo, o que não havia sido feito antes. Com isso, foi possível verificar uma baixa perda de inserção, maior sensibilidade, faixa dinâmica e estabilidade.

Palavras-Chave: Fibra Óptica, Fibra Óptica Polimérica, Monitor de Potência Óptica, Medidor de Potência Óptica, Espalhamento, óptica eletrônica, fototransistor.

ABSTRACT

Optical in-line meters (OPMos) are active devices for measuring optical power along an optical fiber without interrupting the optical link. Generally, an OPMo uses a light sample ($\sim 1\%$), which is propagating along the fiber, to measure the total optical power. Simple and inexpensive OPMs have been reported suitable for monitoring links based on 1 or 2 channel PMMA-POF. Both versions do not disturb the propagation of light. In fact, spontaneous scattering of light is photo-detected laterally, leading to sensitivity of -50dBm and dynamic range of 45dB without any data processing.

The insertion loss of an OPMo must be low enough to negligibly disrupt the link communication and this can be achieved by means of high quality connectorization or splice. If the OPMo is placed just before the receiver (or just after the transmitter), a single connectorization is sufficient, otherwise two are required. Assuming a permanent insert, the fast, robust and inexpensive "do it yourself" technique is used here to produce connections with loss of $(0.4 \pm 0.1) \text{ dB}$ or even less.

In this paper, we will describe improvements in OPMo, maintaining its original operational principle, simplicity and cost. The new prototype laboratory was developed based on the previous prototypes. However, some aesthetic improvements based on physical principles (electrostatic shielding), seeking to eliminate noise and external interferences in the measured results, were implemented here. The electrical circuit of the device was integrated into the prototype, which had not been done before. With this, it was possible to verify a low insertion loss, greater sensitivity, dynamic range and stability.

Keywords: Optical Fiber, Polymer Optical Fiber, Optical Power Monitor,

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	9
1.2 – OBJETIVOS.....	10
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	10
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 – INTRODUÇÃO	12
2.1 - POF de PMMA	12
2.2 - Atenuação em POF de PMMA	17
2.3 - Espalhamento Rayleigh e Mie em POFs	19
2.4 - Transistor TBJ.....	23
2.5 - Transistor tipo Darlington	25
2.6 – Foto-transistor.....	26
3 - DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO PROTÓTIPO DO MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA (OPMo-4)	30
3.1 – INTRODUÇÃO	30
3.2 – O PROTÓTIPO	30
3.3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	33
3.4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
3.5 – CONCLUSÕES.....	46
4 – PERDAS POR INSERÇÃO do OPMo-4.....	48
4.1 – INTRODUÇÃO.....	48
4.2 – PERDAS POR INSERÇÃO CAUSADA PELO OPMo-4	49
4.4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.5 – CONCLUSÕES.....	55
5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS.....	59
ANEXOS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo genérico da reação de polimerização do PMMA. [19]	15
Figura 2: Esquema dos filmes PMMA depositados sobre substrato de silício. [8]	16
Figura 3: Exemplo de espectro óptico de transmissão de POFs de materiais diferentes. [21]	18
Figura 4: Atenuação de Fibra Ótica. [2]	20
Figura 5: Intensidade do Espalhamento Rayleigh. [10].....	21
Figura 6: Estrutura de um Transistor NPN. [16]	23
Figura 7: Esquema de Polarização de um Transistor para operar como um amplificador. [5]	25
Figura 8: Especificações de data sheets para um par Darlington típico. [7].....	26
Figura 9: Constituição do Foto-transistor. [6].....	28
Figura 10: Constituição do Foto-transistor. [23,24].....	28
Figura 11: Constituição do Foto-transistor. [6].....	29
Figura 12: Trecho de fibra sem a proteção de PE. [26]	31
Figura 13: Esquema do Protótipo do OPMo-4.....	32
Figura 14: Imagem real do OPMo-4 aberto.	33
Figura 15: Clivador de POF e Decapador da Hintermaier GmbH	34
Figura 16: Esquema do arranjo para realização dos testes com o OPMo-4 ao centro, onde temos os equipamentos de medição (voltímetro e OPM) devidamente conectados a cada parte do OPMo-4 e na entrada o LED fornecendo luz a fibra.	35
Figura 17: A responsividade relativa dos foto-Darlingtons SD3410 e SD5410.	36
Figura 18 – Foto do arranjo utilizado para realização dos testes do OPMo-4.	37
Figura 19: Curva de comparação entre as respostas do OPMo-4 para os fotodarlingtons SD3410 e SD5410, utilizando uma impedância de 680 K Ω	38
Figura 20: Curva de resposta do OPMo-4 para os foto-darlingtons SD3410 (roxo) e SD5410 (amarelo), para uma carga de 680 K Ω	40
Figura 21: Tensão X Potência óptica, para 3 valores de impedâncias diferentes observados pelo PD SD3410.	42
Figura 22: Tensão X Potência óptica, para 3 valores de impedâncias diferentes observados pelo PD SD3410 em escala logarítmica.	44
Figura 23: Esquemático da montagem inicial para caracterizar as perdas por inserção do OPMo-4 em um enlace de POF.....	50
Figura 24 Esquema das emendas realizadas depois de inserido o OPMo-4, pelo método 1.	51
Figura 25: Esquema das emendas realizadas depois de inserido o OPMo, pelo método 2..	51
Figura 26: Foto do experimento de perda por inserção do OPMo com 1 emenda método 2.	52
Figura 27: Foto do experimento de perda por inserção do OPMo com 2 emendas. Método 1.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução histórica dos importantes marcos relatados para a FOP nos últimos trinta anos. [21]	14
Tabela 2: Fatores de perdas e limites de atenuação teóricos para POFs. [21]	17
Tabela 3: Atenuação em fibras com diferentes composições de núcleo. [21].....	19
Tabela 4: Modos de Operação de um TBJ. [5]	24
Tabela 5: Transistor Darlington NPN. [7].....	26
Tabela 6 : Valores máximos e mínimos medidos em mV e mW para cada foto-darlington...	39
Tabela 7: Valores máximos e mínimos medidos em mV e mW para cada foto-darlington....	39
<i>Tabela 8: Valores máximos e mínimos em mV e μW para o SD3410 variando as cargas em 1 MΩ, 2 MΩ e 4 MΩ. E os valores das conversões optoeletrônica para os 3 respectivamente.</i>	43
<i>Tabela 9: Valores máximos e mínimos em escala logarítmica para o SD3410 variando as cargas em 1 MΩ, 2 MΩ e 4 MΩ, e os valores das conversões optoeletrônica para os 3 respectivamente. E valores das faixas dinâmica obtidas.</i>	45
Tabela 10: Cálculo da Média e desvio padrão para Perda por inserção seca (IL _d) e Perda por inserção com o gel adesivo (IL _g) na emenda dos 3 tipos mais comuns de POFs. [27]	49
Tabela 11: Potência medida para os experimentos do caso de uma e duas emendas, realizado 3 vezes tomando como base o valor de referência P ₀ (sem emenda).	53
Tabela 12: Perda por inserção para cada bateria de testes realizados e a perda por inserção média, para cada caso.	54

LISTA DE ACRÔNIMOS

DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FTTH	Fiber To The Home
IL	Insertion Loss
LED	Light Emitting Diode
MMA	Methyl-Methacrylate
OPMo	Optical Power Monitor
OPM	Optical Power Meter
PC	Polycarbonato
PC	Polycarbonato
PD	Photodiode
PDPMMA	Perdeuterado Poly-Methyl-Methacrylate
PMMA	Poly-Methyl-Methacrylate
POF	Plastic Optical Fibers
PS	Poliestireno
PVC	Polivinila
SI	Step Index
TBJ	Transistor Bipolar de Junção
WDM	Wavelength Division Multiplexing

1 - INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas de comunicações ópticas, permitiu que a tecnologia, no que diz respeito a transmissão de dados e informações, desse um salto considerável. Em diversos setores da indústria, de bens e serviços, podemos notar a presença de componentes que se utilizam dessa tecnologia, como por exemplo em procedimentos hospitalares, iluminação e no setor automobilístico.

As fibras ópticas impulsionaram e conectaram o mundo como nunca visto antes. Nas telecomunicações, tivemos um aumento significativo da capacidade de transmissão, como o caso do DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Os componentes responsáveis pelo monitoramento e pelo funcionamento das redes também tiveram grandes avanços, como os amplificadores, transmissores, receptores, moduladores e medidores/monitores de potência. Este último componente será o assunto de discussão e estudo no decorrer deste trabalho.

Diferente dos medidores de potência convencionais (OPM), os monitores de potência óptica (OPMos) são dispositivos que atuam de modo ativo na rede, ou seja, eles fornecem informações a respeito da potência do sinal que trafega pela fibra, sem interromper o enlace. Esta classe de monitores não é muito comum em comunicações ópticas. A maioria dos monitores existentes funcionam retirando uma pequena parcela da potência do sinal ($\sim 1\%$) através de uma derivação da fibra óptica. O grande interesse por este componente óptico é que ele pode realizar o monitoramento da rede sem que seja necessário interromper o sinal (somente no momento de sua inserção ou remoção).

Desta forma, o trabalho tem como objetivo, continuar com o desenvolvimento de um OPMo minimamente invasivo, baseado no espalhamento espontâneo da luz que pode ser captado lateralmente a fibra. As principais contribuições desta dissertação com relação ao desenvolvimento de um protótipo aperfeiçoado de OPMo são: melhora na sua implementação física em si como a integração da placa elétrica, vedação óptica, blindagem eletromagnética, etc, medidas da atenuação por inserção num enlace e ao final deste, e aumento de sua sensibilidade e de sua faixa dinâmica de operação com o aumento da carga resistiva no circuito de recepção.

1.2 – OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho tem como foco projetar um dispositivo que deve ser inserido em linha no meio ou final do enlace, que realize medições da intensidade luminosa, independente do sentido de propagação da luz. Deverá ser capaz de realizar o monitoramento em tempo real e permanente da potência óptica do enlace de POF.

Este novo protótipo do OPMo deve manter o aspecto robusto, econômico e compacto, porém, este último não sendo um limitador, visto que o principal objetivo é o de aumentar a estabilidade, faixa dinâmica e a sensibilidade.

1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 4 capítulos adicionais conforme serão descritos a seguir.

O capítulo 2, traz o embasamento teórico necessário para um melhor entendimento desta dissertação. Este capítulo não se aprofunda nos temas que ele aborda visto que não há esta necessidade. Os principais tópicos são os conceitos de POFs (tipos, padrões e características de propagação luminosa). Apresenta uma base sobre os conceitos básicos e funcionamento de transistores e fototransistor, fotodarlington, medidor de potência e monitor de potência, e o espalhamento da luz em fibras ópticas, notadamente de PMMA.

No capítulo 3, será apresentado o desenvolvimento do protótipo do OPMo-4, ou seja, como foram as etapas para se chegar ao novo protótipo, assim como as montagens realizadas para a coleta das medições, apresentando os resultados e as discussões pertinentes ao que foi observado e as conclusões sobre o que foi visto.

O capítulo 4, faz uma análise do que diz respeito às perdas causadas pela inserção do OPMo num enlace. Esta análise é realizada através de dois modelos que foram testados e seus resultados apresentados e discutidos.

O capítulo 5, apresenta as conclusões obtidas e as considerações finais a respeito deste trabalho de dissertação, fornecendo uma visão do potencial que ainda pode ser explorado e sugestões para futuros trabalhos.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – INTRODUÇÃO

Fibras ópticas são guias de onda, capazes de guiar a luz que é uma onda eletromagnética. Isto se faz devido ao fenômeno da reflexão total, que faz com que os diversos modos de propagação viajem pelo interior da fibra. Uma característica das fibras é que a informação que viaja por ela na forma de luz possui elevadas taxas de transmissão e baixíssimas taxas de erros se comparadas a outros meios.

Existem fibras de sílica e poliméricas e cada uma é utilizada segundo suas características de transmissão, porém nesta dissertação temos como principal interesse o conhecimento sobre fibras poliméricas, que geralmente são empregadas em redes de curtas distâncias, iluminação e automóveis.

Como é de particular interesse desta tese, abordaremos somente as características da POFs de PMMA, que foi o tipo de fibra utilizado nos testes e no projeto do OPMo-4.

2.1 - POF de PMMA

As aplicações mais frequentes das fibras ópticas poliméricas (POFs) ocorrem na indústria automobilística, em ferramentas da área de medicina, em redes locais de escritórios, em contextos industriais com alta indução eletromagnética, em iluminação, em sensores ópticos e contextos semelhantes.

Elas também são utilizadas com frequência na área doméstica (FTTH), já que apresentam alta duração e resistência. Ademais, elas têm como característica flexibilidade de aplicação em rotas de cabos convencionais em que há curvaturas com raios bem acentuados. Outra possibilidade favorável de utilização é em locais úmidos. Um de seus principais benefícios, além de todos os elementos citados, é o baixo custo que oferece para o desenvolvimento dos sistemas ópticos com base em POF. Alguns marcos das últimas décadas em relação ao POF são importantes, como se observa na tabela 1:

Ano	Organização	Desenvolvimento
1968	Du Pont	Primeiro informe de núcleo-PMMA índice degrau FOP (500 dB/km a 650nm)
1972	Toray	Núcleo de Poly(styrene) índice degrau (SI) FOP.
1981	NTT	Baixa atenuação de núcleo-PMMA SI POF (55 dB/km)
1982	Keio Univ/NTT	Índice gradual (GI) FOP (1070 dB/km a 670 nm) e SI FOP (20dB/km a 650 nm)
1983	Mitsubishi Rayon	Núcleo-PMMA SI FOP “ESKA” (110 dB/km a 570nm)
1987	France	Foi criado French Plastic Optical Fiber (FOP) Club
1990	Keio Univ.	Alta velocidade de transmissão GI FOP base PMMA (300MHz km at 670 nm)
1991	Hoechst Celanese	Núcleo PMMA SI POF “INFOLITE” (130 dB/km a 650 nm)
1992	Keio Univ.	Perdeuterato PMMA base GI POF (55 dB/km a 688 nm)
1993	Essex Univ.	531 Mb/s 100m transmissão por núcleo-PMMA com equalizador de circuito
1994	USA, Japão e outros	Consórcio High Speed FOP Network (HSPN) foi criado nos EEUU; criado consórcio FOP no Japão; 1.0 Gb/s 30m transmissão por PMMA GI FOP e VCSEL vermelho a 670 nm; 2.5 Gb/s 100m transmissão a 650 nm por PMMA base GI FOP; Multi-núcleo SI FOP para transmissão em alta velocidade de dados
1995	Mit. Rayon, NEC	156 Mb/s 100 m transmissão SI FOP e alta velocidade por LED vermelho
1996	Keio, KAST	Primeiro perfluorurato (PF) base polimérica GI FOP para 1.3µm (50 dB/km)
1997	POF Consortium Japão	Padronização de ATM LAN (156 Mb/s 50m link SI FOP) no ATM Fórum padronização do IEEE 1394
1998	COBRA e outros	Transmissão a 2.5 Gb/s 300m PF base GI POF a 645nm e transmissão 500 Mb/s 50 m Gi FOP LED rápido (RC-LED; 650 nm)
1999	COBRA e outros	Transmissão a 2.5 Gb/s 500m PF base GI POF a 840 e 1310 nm; transmissão 7 Gb/s 80 m GI FOP 950 nm; 11

		Gb/s transmissão de dados a 100m PF base GI FOP a 830 nm e 1310 nm
2000	Asahi Glass	GI FOP (Lucina) com atenuação de 16 dB a 1300 nm e 569 MHz*km

Tabela 1: Evolução histórica dos importantes marcos relatados para a FOP nos últimos trinta anos. [21]

Os polímeros acrílicos surgiram com a preparação do etilmetacrilato por Frankland e Duppa, em 1865. Aproximadamente dez anos após esse fator, Fittig e Paul começaram a perceber possibilidades de polimerização. No início do século XX, os acrílicos mais populares, em sua maioria, já possuíam preparação em laboratório, bem como pesquisas a respeito da polimerização desses elementos já tinham sido iniciadas.

Neste panorama, foi iniciada, na Alemanha, uma série de trabalhos bem estruturados acerca dos acrílicos por Dr. Rohn, o qual, posteriormente, participou de forma ativa no processo de desenvolvimento industrial do Ester acrílico na Alemanha. Seu primeiro trabalho, em parceria com Mass, focado na produção de acrílico foi com o poli-metacrilato de metila (PMMA), que teve seu surgimento industrial em 1927. A solução do polímero em solvente orgânico foi muito utilizada em lacas e em formulações para revestimento de superfície. Posteriormente, as pesquisas em torno do metacrilato e da sua polimerização contribuíram para origem a uma técnica mais econômica para a fabricação dos monômeros [4].

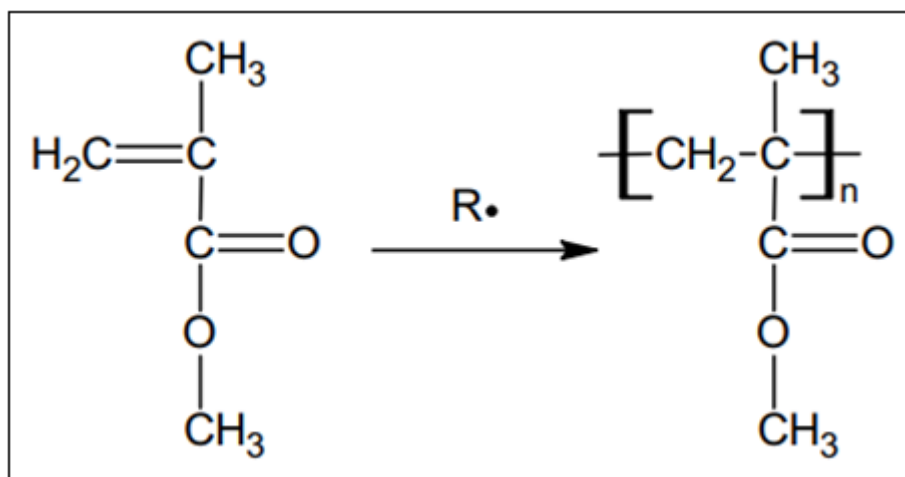


Figura 1: Exemplo genérico da reação de polimerização do PMMA. [19]

Como se observa na Figura 1, o PPMA é obtido através da polimerização do metacrilato de metil. Suas características incluem: resistência a intempéries, alta estabilidade dimensional e combinações de propriedades estruturais e térmicas favoráveis. Sua transmitância gira em torno de 92% na região do visível do espectro eletromagnético e seu nível de refração é de 1,49, considerado propício para aplicação em lentes e demais matérias ópticas especiais [11]. Enquanto o PMMA possui resistência a soluções aquosas, ele apresenta baixa resistência aos ésteres, hidrocarbonetos aromáticos e cetonas [9].

As características ópticas e mecânicas do PMMA são superiores aos demais polímeros, por exemplo, o poliestireno (PS), policarbonato (PC) e polímidas. No que consiste a estabilidade térmica, fibras ópticas de PC apresentam maior estabilidade do que fibras constituídas por PMMA (120°C para o PC e 80°C para o PMMA). Contudo, fibras de PMMA contam com perdas de transmissão na região visível da luz menores do que as de fibras de PC - fator de grande importância para sistemas de iluminação [15] e transmissão de dados. As fibras ópticas de PS têm atribuições mecânicas inferiores às fibras de PMMA, que têm a possibilidade de resistir a deformações elásticas de até 13%. Já no caso do PS, este número cai para até 6% [8].

Diversas pesquisas têm sido elaboradas em torno das propriedades do PMMA. Em um trabalho produzido por Giacon (2004), pode-se observar a exposição

de guias de onda planares a base de PMMA em substrato de silício com modificação na superfície por plasma de CHF₃. Essa fluoração reduz o nível de refração da superfície do filme de PMMA, conferindo-lhe a propriedade de um guia de onda, de acordo com a demonstração na Figura 2. A escrita de circuitos ópticos por fotolitografia com aplicações em sistemas de óptica integrada é possibilitada por meio destes filmes [8].



Figura 2: Esquema dos filmes PMMA depositados sobre substrato de silício. [8]

Ma et al. (2006), realizaram uma pesquisa com foco na fabricação de fibras ópticas poliméricas com índice de refração gradual. Observou-se a polimerização rápida do MMA por ativação térmica e depois a co-extrusão. O resultado apontou para uma baixa polidispersividade do PMMA na distribuição de pesos moleculares em comparação com as técnicas tradicionais de obtenção do PMMA recorrentes por engenheiros. Ademais, as fibras ópticas originárias desse PMMA apresentaram perdas ópticas menos elevadas, perceptíveis com mais expressão em comprimentos de ondas de aproximadamente 650 nm.

Outro assunto que tem sido pesquisado é a utilização de ligas poliméricas com base de PMMA para a fabricação de fibras ópticas poliméricas, com aplicabilidade referente ao contexto de iluminação e ao contexto de transmissão de dados. O MMA tem polimerização realizada juntamente com o butilacrilato e o etilenoglicoldimetacrilato, com a finalidade de ampliar as características mecânicas das fibras ópticas produzidas [13].

2.2 - Atenuação em POF de PMMA

O produto das contribuições de todas as formas de perdas de potência óptica (atenuação) em função do comprimento de onda da luz injetada na fibra óptica é ilustrada graficamente pelo espectro óptico na figura 3 [14]. Este espectro é altamente necessário para a identificação das regiões em que o material que compõe a fibra óptica sofre atenuação mínima. Essas regiões, chamadas “janelas ópticas”, influenciam na opção pelo melhor comprimento de onda a ser usado no enlace óptico.

A principal finalidade nas aplicações em comunicações ópticas, consiste em obter alcances cada vez mais elevados, o que pressupõe atenuações bem reduzidas. Nesse sentido, os trabalhos em torno das POFs são crescentes e se desenvolvem com base na redução contínua das perdas de transmissão até o limite fundamental (ou limite de atenuação teórico), definido pela absorção intrínseca do material que compõe a fibra [14], “os valores de atenuação experimentais aproximam-se dos limites de atenuação teórico à medida que os processos de fabricação melhoram”. Esse limite teórico é constante nas fibras ópticas, e veremos mais a frente que parte desse limite é a contribuição do espalhamento Rayleigh.

Pode-se observar, na Tabela 2, os limites teóricos para os elementos variados de perda e os limites de atenuação para as fibras plásticas fabricadas com PMMA, PS e CYTOP para os comprimentos de onda de 568, 672 e 1300nm. Deve-se notar também que o CYTOP pertence à classe dos polímeros fluoretados, diferente do PMMA.

Tabela 2: Fatores de perdas e limites de atenuação teóricos para POFs. [21]

Fator de perda [dB/km]	PMMA (568nm)	PS (672nm)	CYTOP2 (1300nm)
Absorção	17	26	10
Espalhamento Rayleigh	18	43	2
Imperfeições estruturais	20	45	4
Perda total	55	114	16
Atenuação limite teórica	35	69	12

Na Figura 3, é possível observar a atenuação do espectro nos distintos materiais utilizados para o núcleo da POF, os quais são: PMMA, PMMA Perdeuterado (PDPMMA), Policarbonato (PC) e CYTOP.

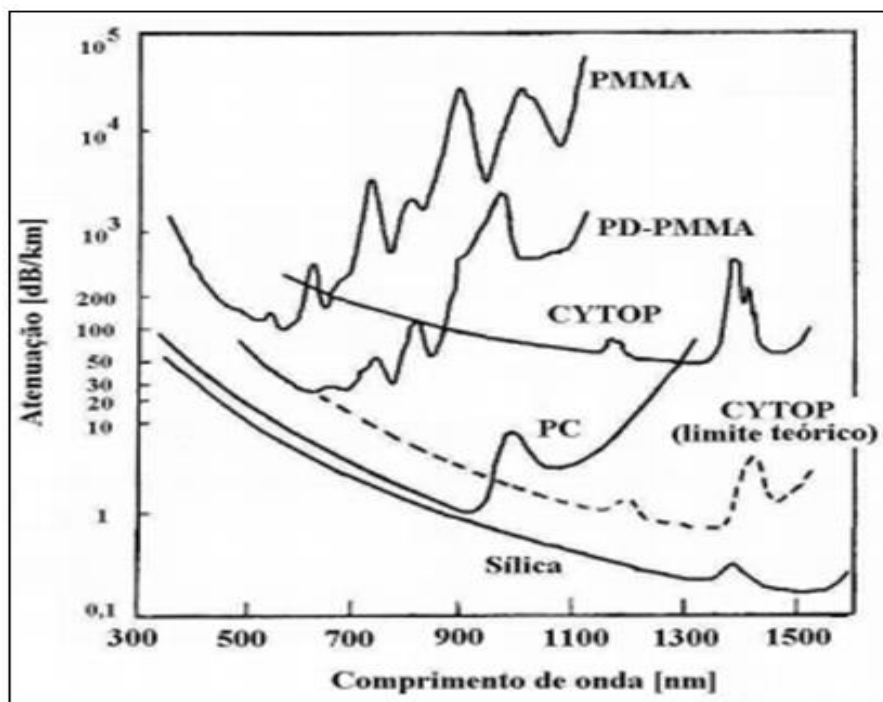


Figura 3: Exemplo de espectro óptico de transmissão de POFs de materiais diferentes. [21]

A utilização de fibras ópticas de sílica em comunicações ópticas só pode ser considerada, quando as perdas forem diminuídas a um grau propício para chegar a uma distância de transmissão de 10 km ou mais [1]. A fibra óptica plástica, por sua vez, possui uma elevada atenuação quando comparadas às fibras de sílica, chegando, dessa forma, a distâncias menores. A Tabela 3 apresenta os valores de atenuação dos diferentes materiais.

Tabela 3: Atenuação em fibras com diferentes composições de núcleo. [21]

	Material	Atenuação	n1/n2	NA
Fibras Poliméricas	PMMA	55 dB/km @ 538nm	1,492/1,417	0,47
	PS	330 dB/km @ 570nm	1,592/1,416	0,73
	PC	600 dB/km @ 670nm	1,582/1,305	0,78
	CYTOP	16 dB/km @ 1310nm	1,353/1,34	---
Fibra de vidro	Sílica	0,2dB/km @ 1310nm		

2.3 - Espalhamento Rayleigh e Mie em POFs

De acordo com [20], “o espalhamento consiste no mecanismo de atenuação que exprime o desvio de parte da energia luminosa guiada pelos vários meios de propagação em várias direções”.

O espalhamento é decorrente de imperfeições (de dimensões inferiores, similares e/ou superiores ao comprimento de onda) da estrutura da fibra e tem como principal característica o desvio da luz em direções distintas. Como já exposto, o espalhamento é um dos elementos mais relevantes para que haja atenuação. Sua ocorrência advém da colisão da luz com átomos individuais no vidro. Essa luz se espalha em ângulos fora da abertura numérica da Fibra, sendo absorvida na casca ou transmitida (retro-espalhada) de volta à fonte. O espalhamento é uma função do comprimento de onda λ , dado pela relação [3]:

$$E(\lambda) = K / \lambda^4 \quad (\text{Eq. 1})$$

Dessa forma, ao dobrar o comprimento de onda, o espalhamento diminui em 16 vezes (ou o contrário). Sendo assim, torna-se mais interessante a utilização de comprimento de onda maiores nas transmissões a longa distância, pois assim haverá uma mínima atenuação e máxima distância entre repetidores.

Os principais mecanismos de espalhamento que influenciam nas perdas de transmissão em fibras são os seguintes:

- Rayleigh;
- Mie;
- Raman estimulado;
- Brillouin estimulado.

Destes citados, os de maior relevância para POFs são o Rayleigh e o Mie. O espalhamento Rayleigh ocorre devido à ausência de homogeneidade microscópica como flutuações térmicas, flutuações de composição, variação de pressão, pequenas bolhas, variação no perfil de índice de refração. [20].

Esse tipo de espalhamento é constante na fibra óptica e fixa o limite mínimo de atenuação nas fibras na região de baixa atenuação. A característica de atenuação presente no espalhamento Rayleigh é de $\frac{1}{\lambda^4}$.

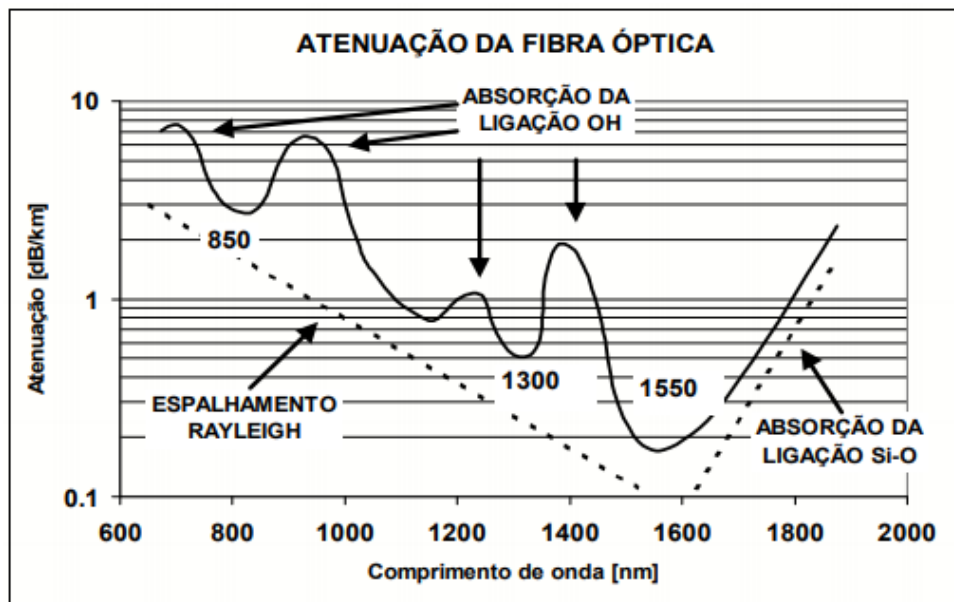


Figura 4: Atenuação de Fibra Óptica. [2]

Portanto, o espalhamento de Rayleigh consiste em um dos tipos mais importantes, advindo de defeitos sub-microscópicos na composição e na densidade

do material que podem aparecer no decorrer do processo de fabricação da fibra ou em razão de irregularidades específicas na estrutura molecular do vidro [17].

O espalhamento Mie pode ser verificado em razão de irregularidades da fibra com dimensões semelhantes em comprimento de onda da luz. Ocorre devido a não homogeneidade de índice de refração em uma escala maior do que o comprimento de onda óptico. Em geral, é tomado cuidado para assegurar que o raio do núcleo não varie de modo significativo ao longo do comprimento da fibra durante a fabricação. Tais variações podem ser mantidas abaixo de 1%.

Os dois tipos de espalhamento - Rayleigh e Mie - são mecanismos lineares de espalhamento que ocorrem devido à transferência linear de potência de um modo guiado para modos vazados ou irradiados.

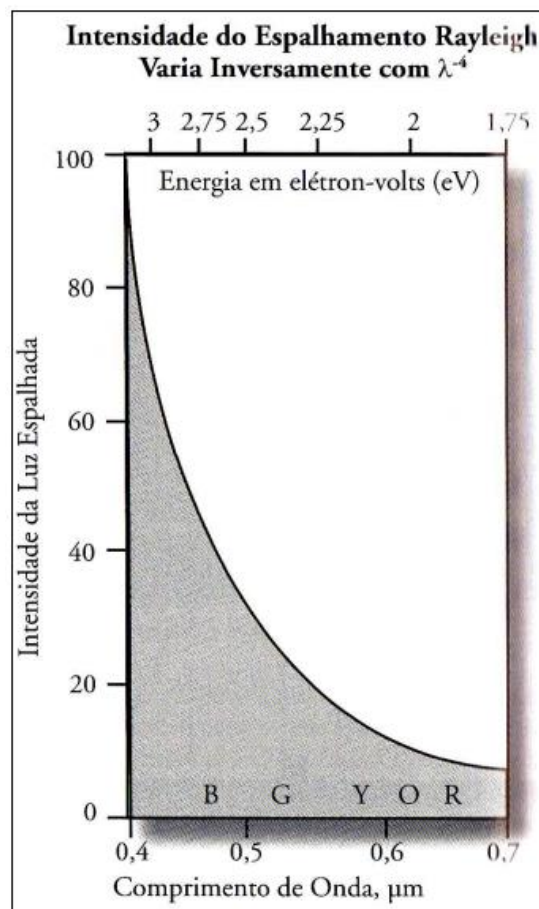


Figura 5: Intensidade do Espalhamento Rayleigh. [10]

As propriedades mais relevantes de cada um dos tipos de mecanismos de espalhamentos podem ser descritas como:

Espalhamento de Rayleigh: derivado de variações de natureza aleatória na densidade do material da fibra surgido em distâncias mínimas se comparadas com o comprimento de onda de luz transmitida. Tais variações são o produto de flutuações na composição do material de fibra. Segundo [3], o coeficiente de perdas por espalhamento Rayleigh tem representação em:

$$\gamma_{Rayleigh} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 \cdot p^2 \cdot K \cdot T_F \cdot \beta_T \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

λ = comprimento de onda da luz transmitida;

n = índice de refração do meio;

p = coeficiente fotoelástico do meio;

K = constante de Boltzmann;

β_T = compressibilidade isotérmica na T_F

T_F que é relativo à temperatura em que o material entra em equilíbrio termodinâmico.

Já a atenuação em decibéis por quilômetro decorrente do espalhamento de Rayleigh em uma fibra de comprimento L (em km), pode ser representado por:

$$\alpha_{Rayleigh} \cong \frac{4,343}{L} \gamma_{Rayleigh} \quad (\text{Eq. 3})$$

Espalhamento de Mie: como já visto, decorre pela presença da de não-homogeneidades de dimensões semelhantes às dimensões do comprimento de onda da luz transmitida. Esse tipo de espalhamento é produto de imperfeições na estrutura cilíndrica da fibra, como por exemplo: irregularidades na interface núcleo-casca, flutuações do índice de refração ao longo da fibra, flutuações do diâmetro [3]. As perdas por espalhamento Mie se apresentam especialmente na direção de propagação e têm possibilidades de redução se considerarmos os critérios de:

- Redução de imperfeições durante a fabricação do vidro ou polímero;
- Monitoramento da extrusão e encapsulamento da fibra;
- Elevação da diferença relativa de índices de refração.

2.4 - Transistor TBJ

Há três regiões semicondutoras no transistor Bipolar de Junção NPN: a região do emissor (tipo N), a região da base (tipo P), a região do coletor (tipo N) [5].

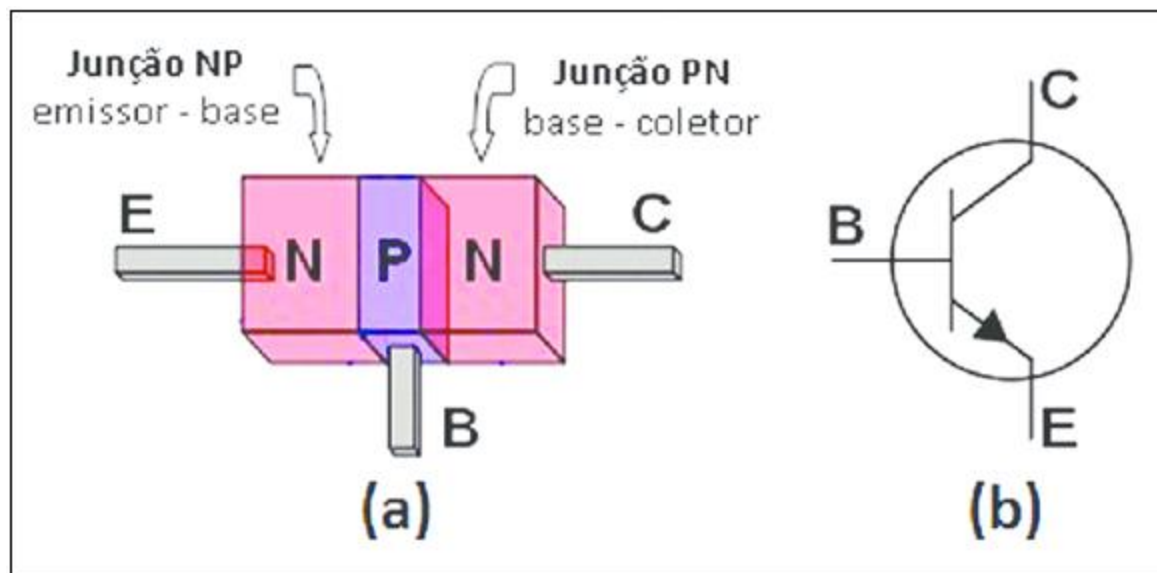


Figura 6: Estrutura de um Transistor NPN. [16]

O transistor possui em sua estrutura duas junções PN: a junção Base-Emissor e a Junção Base-Coletor. As junções PN são constituídas com base em pastilhas de

silício dopadas. A dopagem consiste em um procedimento que produz um desbalanceamento de cargas na estrutura, que ocorre devido à introdução de impurezas de dois tipos: Doadoras ou Receptoras [5].

As impurezas doadoras são caracterizadas pela existência de elétrons livres capazes de se mover de modo livre pela pastilha de silício, enquanto as impurezas receptoras possuem a característica da ocorrência de lacunas as quais apresentam comportamento de cargas positivas, isto é, cristais de silício dopados com impurezas doadoras são do tipo N e cristais de silício dopados com impurezas receptoras são do tipo P.

O desbalanceamento de cargas existente neste processo é fundamental para que a passagem de corrente elétrica seja possível no momento em que o transistor é polarizado diretamente. As junções PN podem estar polarizadas de modos distintos e, dessa forma, agir sobre a forma de operação do Transistor TBJ. A tabela 5 apresenta modos distintos de operação de um transistor TBJ:

Tabela 4: Modos de Operação de um TBJ. [5]

MODO	POLARIZAÇÃO NO JBE	POLARIZAÇÃO NO JBC
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Saturação	Direta	Direta

Para que um transistor TBJ funcione como um amplificador, é necessário que ele opere na região ativa e uma corrente DC constante seja estabelecida no seu coletor, necessitando esta apresentar insensibilidade diante de variações de temperatura. Para tanto, é preciso, ainda, que todas as suas tensões de polarização sejam estabelecidas de forma correta, como pode ser observado na Figura 7:

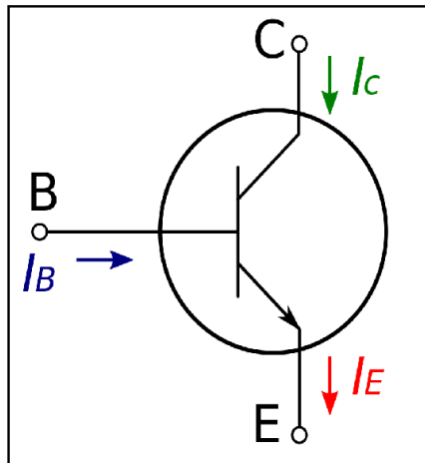


Figura 7: Esquema de Polarização de um Transistor para operar como um amplificador. [5]

Observa-se, por fim, que a relação ($V_c > V_b > V_e$) precisa ser necessariamente obedecida para que, dessa forma, o TBJ possa operar na região ativa, já que é fundamental “que a junção base coletor esteja polarizada reversamente e a junção base emissor esteja polarizada diretamente”.

2.5 - Transistor tipo Darlington

Essa configuração tem como uma de suas principais propriedades, a possibilidade de alcançar alta impedância de entrada e alto ganho de corrente. O arranjo do Transistor Darlington conecta dois transistores semelhantes (um fototransistor de entrada conectado à um transistor), de modo que, caso o ganho de corrente de um transistor seja β_1 e do outro seja β_2 , haverá o ganho de corrente do arranjo proporcional a $\beta_D = \beta_1 \cdot \beta_2$. O transistor tipo Darlington age como um novo dispositivo, em que os ganhos individuais geram ganho de corrente. Assim, pode-se verificar este esquema na figura abaixo:

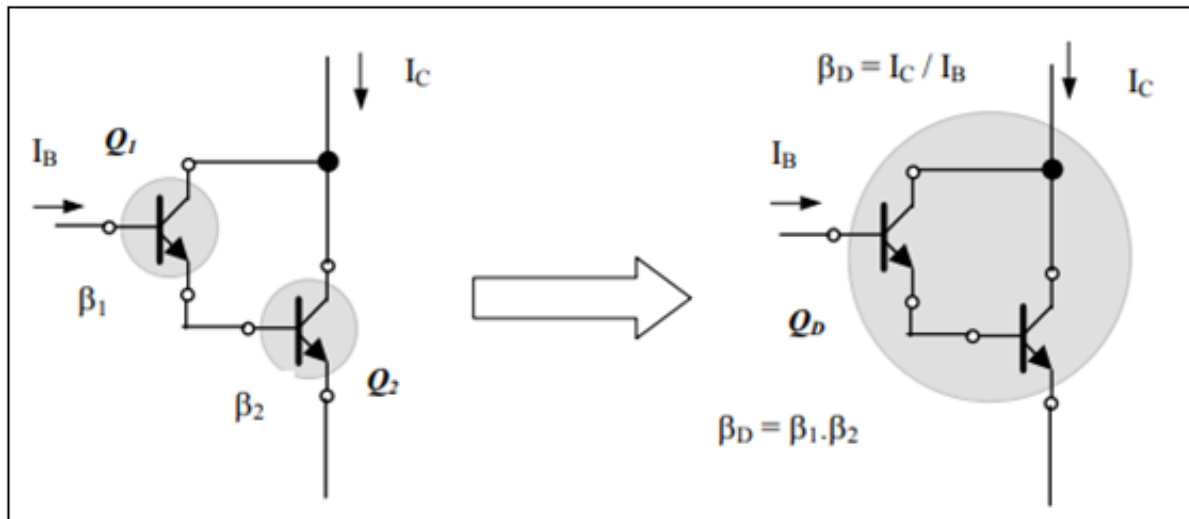


Figura 8: Especificações de data sheets para um par Darlington típico. [7]

É necessário salientar que esse tipo configuração também é possível com transistores PNP. Já que transistor Q_1 opera com baixas correntes, o β_1 não é reduzido.

Tabela 5: Transistor Darlington NPN. [7]

Parâmetro	Condições de Teste	Min. – Max.
V_{BE}	$I_C = 100\text{mA}$	1,8V
h_{FE}	$I_C = 10\text{mA}$	4000
(β_D)	$I_C = 100\text{mA}$	7000 70.000

Estes tipos de transistores são extremamente úteis quando se quer obter uma elevada amplificação, visto que o segundo transistor pode ser projetado para conduzir correntes intensas. Deste modo, este tipo de transistor pode controlar altas correntes a partir de sinais fracos.

2.6 – Foto-transistor

O foto-transistor consiste em um dispositivo opto-eletrônico que conduz a corrente quando incide luz em sua base. Contudo, este tipo de dispositivo possui mais sensibilidade à luz quando comparado a um fotodiodo, sendo capaz de produzir mais

corrente de saída para uma dada intensidade de luz. Entretanto, a sua banda é significativamente menor que a de um foto-diodo.

A composição de um foto-transistor se dá por meio de um fotodiodo no circuito da base de um transistor de NPN. A corrente da base do transistor é alterada com a incidência de luz no fotodiodo, colaborando para que a corrente de coletor se amplifique.

Assim como o transistor convencional, o foto-transistor consiste em uma combinação de dois diodos de junção, mas com a associação ao efeito transistor, ocorre o efeito fotoelétrico. Geralmente, conta com somente dois terminais acessíveis: o coletor e o emissor.

Como observado nas outras células fotocondutivas, a incidência de luz (fótons) influencia na aparição de buracos na vizinhança da junção base-coletor. A tensão conduzirá os buracos para o emissor, e os elétrons, por sua vez, transitarão do emissor para a base.

Esse movimento acarretará na elevação da corrente de base, que, por sua vez, produzirá uma variação da corrente de coletor beta vezes maior. Dessa forma, essa variação é proporcional à intensidade da luz incidente.

Em decorrência de a base estar, em geral, desconectada, a corrente que circula será subordinada somente ao fluxo luminoso incidente. Dessa forma, com a falta de luz, a corrente de base será zero e o fototransistor será cortado, produzindo a tensão do coletor proporcional à tensão de polarização V_{cc} . Se houver luz incidindo, a tensão no coletor será reduzida de acordo com a elevação da corrente.

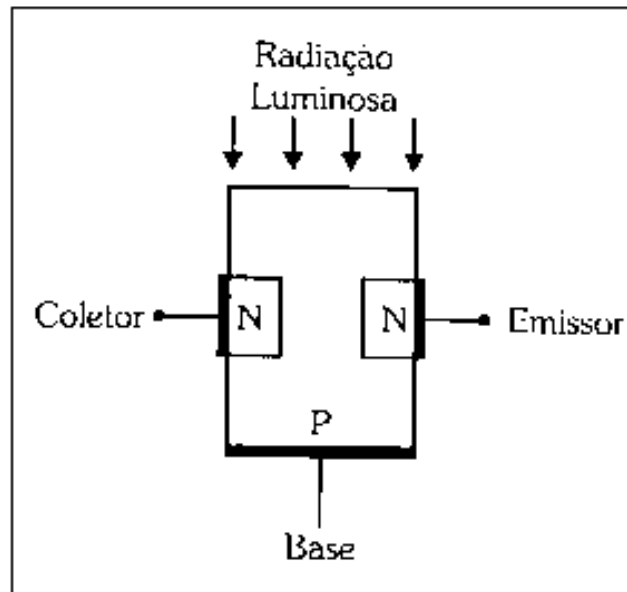


Figura 9: Constituição do Foto-transistor. [6]

Dentre as várias aplicações do foto-transistor, a mais comum é a *on-off*, em que a não-linearidade do transistor não consiste em um dano. O uso do interruptor na aplicação é frequente. Na ausência de luz incidindo no foto-transistor, não será possível ocorrer uma corrente no emissor e, portanto, a tensão de saída será zero, estando ele em corte. Caso haja presença de luz, haverá uma corrente no emissor, que produzirá uma tensão proporcional a $I_e R_e$.

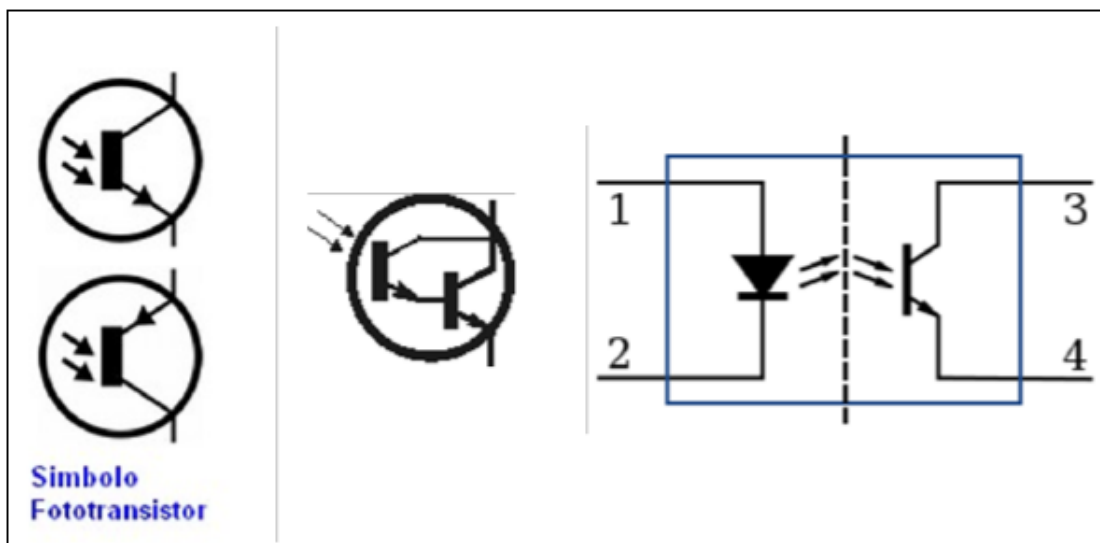


Figura 10: Constituição do Foto-transistor. [23,24]

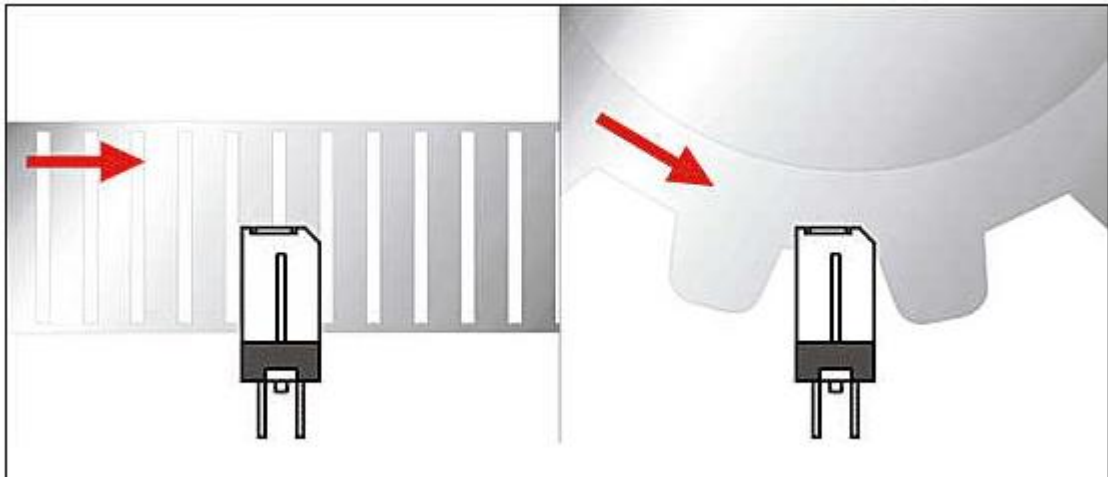


Figura 11: Constituição do Foto-transistor. [6]

Existe a possibilidade de o foto-interruptor ser somado à uma barra perfurada com a finalidade de medir movimentos lineares ou, ainda, com uma engrenagem, para medição angular. Assim como os transistores bipolares, os foto-transistores são susceptíveis a alterações de temperatura. Se houver elevação da temperatura a nível de aproximadamente 10 °C, a corrente I_{CEO} , que circula no componente enquanto não existe incidência de luz, será dobrada.

Em temperaturas mais altas, a corrente terá um valor consistente relativo à corrente em sua totalidade. Contudo, esse problema pode ser revertido com o uso de dois foto-transistores. Para tanto, é necessário uni-los, como observado na Figura 12. Isso fará com que a corrente I_{CEO} estabeleça os mesmos valores nos dois elementos, provocando um cancelamento total. Dessa forma, a corrente produzida pela presença da luz poderá passar integralmente pelo resistor R_L .

3 - DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO PROTÓTIPO DO MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA (OPMo-4)

3.1 – INTRODUÇÃO

O OPMo-4 foi baseado no princípio de funcionamento de seus antecessores [26], aproveitando-se a luz que é espalhada espontaneamente pela lateral da fibra. O que o difere dos demais protótipos, é a elaboração de um circuito eletrônico mais robusto e imune a ruídos e interferências e a sua integração com a unidade optomecânica. Suas características de simplicidade e baixo custo foram preservadas para manter a originalidade dos protótipos anteriores.

A proposta para sua reformulação, era aumentar sua sensibilidade e a faixa dinâmica, mantendo seu aspecto compacto. Assim como nas últimas versões do OPMo, foi utilizado o PD da Honeywell, modelo SD3410 e foi adicionado o modelo SD5410, com encapsulamento TO-46 (sem lente e com lente respectivamente). Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOP) da Universidade Federal Fluminense. Os datasheets destes dois modelos de fotodarlingtons se encontram-se no anexo dessa dissertação

3.2 – O PROTÓTIPO

Diferentemente dos últimos protótipos, no OPMo-4 foi dada uma ênfase maior em organizar seus componentes para diminuir ruídos e vibrações que pudessem interferir nos resultados. Por este motivo, o OPMo-4 foi projetado como uma caixa metálica com dimensões 9,5 cm x 5,0 cm x 3,0 cm, revestida internamente com um material isolante elétrico para evitar curto dos componentes eletrônicos em seu interior. Esta caixa tem como função, realizar uma blindagem eletrostática. Esta blindagem foi necessária pois em testes iniciais, o protótipo se mostrou muito sensível a perturbações eletromagnéticas externas, fazendo com os valores lidos pelos equipamentos de medição oscilassem bastante. O esquema do OPMo pode ser visto na figura 12.

Em suas laterais, foram feitos furos com diâmetro de 2mm, por onde passa o trecho de POF com aproximadamente 5,0 cm de comprimento, sendo que no centro desta medida (na parte interior da caixa), existe um trecho de 1,1 cm em que a proteção de polietileno (PE) foi retirada, ou seja, POF descascada (sem a jaqueta) figura 12.

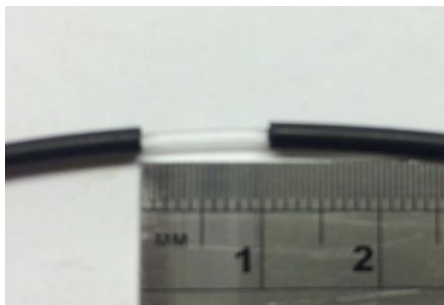


Figura 12: Trecho de fibra sem a proteção de PE. [26]

Em seu interior foi inserido uma placa de circuito elétrico composto pelos foto-darlingtons e resistências dispostos em série. Cada foto-transistor dispõe de um circuito independente com os componentes dispostos em série, porém ambos são alimentados pela mesma tensão de entrada de 5 V.

Esta placa foi projetada, pois se verificou que em protótipos anteriores não foi dada a devida atenção ao circuito eletrônico, deixando a parte eletrônica do OPMo exposta e consequentemente mais sensível a perturbações. Por este motivo foi projetado o novo protótipo que uniu a parte óptica e a eletrônica num único encapsulamento! Para construção deste circuito, foi utilizada uma placa revestida com cobre. As trilhas foram desenhadas com caneta permanente para que se pudesse mergulhar a placa numa solução de perclorato de ferro e assim corroer o cobre que não estava marcado. Em seguida foram feitos os furos onde cada componente seria soldado. Jumpers foram conectados para que se pudessem inserir os conectores do tipo BNC do tipo fêmea. Estes conectores foram utilizados devido a sua maior imunidade a perturbações externas.

Como não foi encontrado potenciômetros com valores maiores de $2\text{ M}\Omega$, foi utilizado um soquete para poder encaixar resistências de valores diferentes e com isso variar o valor da impedância de acordo com o interesse dos testes (figura 13 e 14).

Para medir o valor da tensão sobre a resistência do circuito, foram inseridos terminais na entrada e saída desta impedância, e ligados a um conector do tipo BNC.

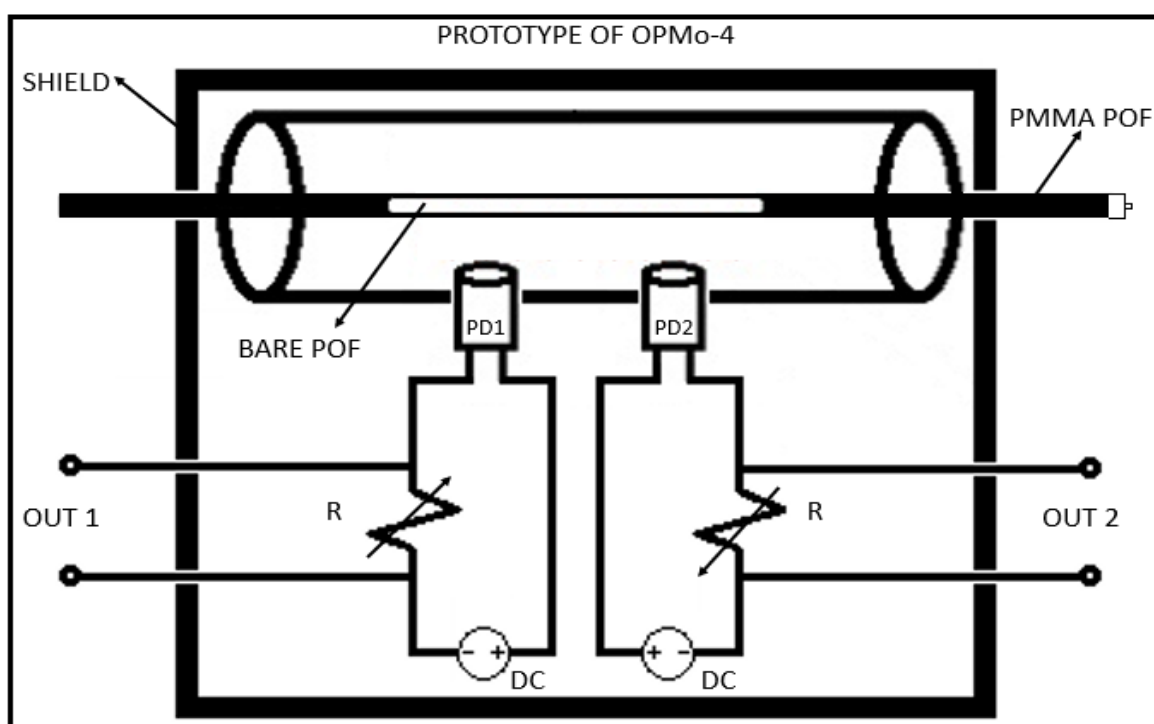


Figura 13: Esquema do Protótipo do OPMo-4.

Os conectores do tipo BNC, foram utilizados nos terminais de saída devido também a sua maior imunidade a ruído, já que num primeiro momento tomou-se todos os cuidados necessários para que o novo protótipo fosse bastante robusto em relação a perturbações de qualquer espécie.

A peça de polivinila (PVC) por onde passa a região da fibra sem a proteção, utilizada em protótipos anteriores do OPMo, foi mantida para garantir um isolamento luminoso maior. Além de dispor da região exposta da fibra em seu interior, este tubo de PVC possui dois orifícios em sua lateral, por onde são inseridos os foto-darlingtons que têm como função captar a intensidade luminosa espalhada naturalmente pela casca da fibra, conforme vemos na figura 14.

Dois tubos de plástico foram inseridos pelos orifícios laterais da caixa do OPMo para garantir que não houvessem curvaturas que pudessem interferir nas medições. A POF utilizada para o teste continha um conector em uma de suas extremidades para que fosse ligado diretamente ao medidor de potência utilizado, como é possível verificar na figura 18.

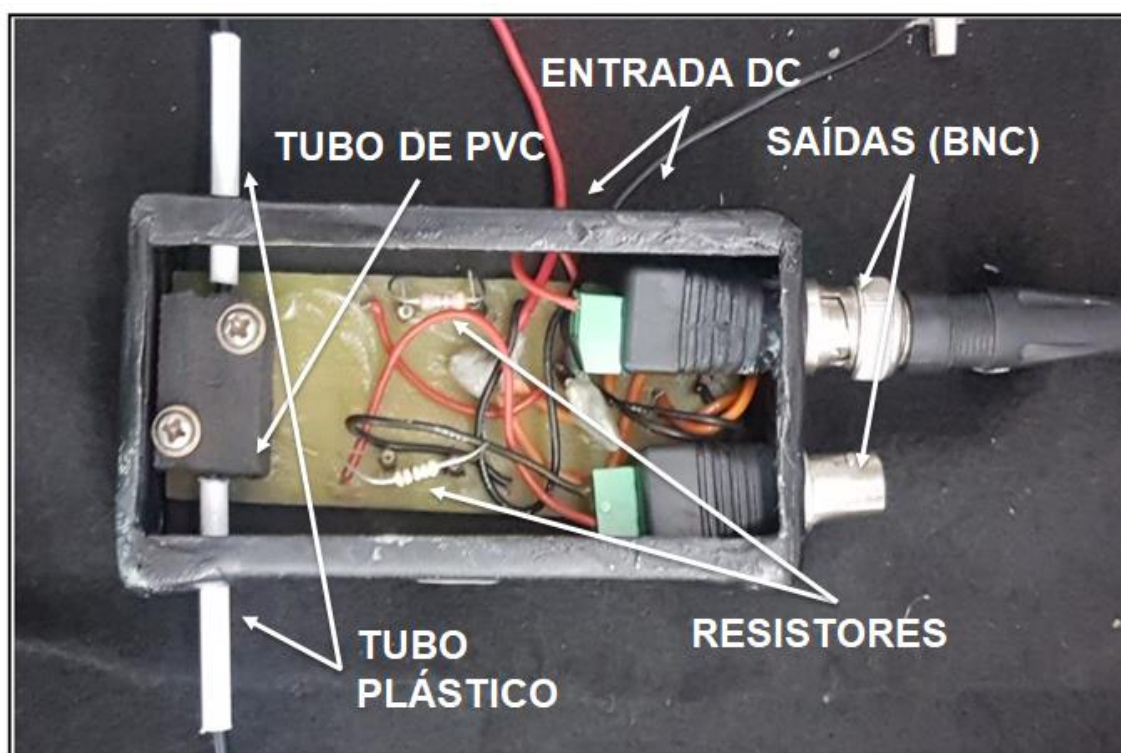


Figura 14: Imagem real do OPMo-4 aberto.

3.3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados em algumas etapas, sendo num primeiro momento necessário identificar qual aspecto do protótipo poderia ser melhorado. Para isso foram realizados alguns testes para escolher a melhor montagem para coletar os dados. Como já havia sido constatado nos protótipos anteriores, o OPMo se mostrou imune quanto à distribuição modal [26] desde que $\sim 1\text{m}$ de POF precedesse o OPMo, portanto, não foi utilizado um misturador de modos.

Conforme realizado em outros protótipos, foi mantido exposto um trecho de aproximadamente 11 mm de fibra sem a proteção de polietileno. Este procedimento de exposição da casca foi feito com um decapador da Hintermaier GmbH (figura 15 lado esquerdo). Para realizar este procedimento um pequeno trecho da POF foi inserido no orifício do decapador e em seguida foi feita uma leve pressão para que se conseguisse cortar somente a proteção externa da POF. Por último, cuidadosamente, foi tracionado para que se expusesse um pequeno trecho de aproximadamente 11 mm.

Como vimos no capítulo anterior, a luz espalha naturalmente pelas laterais da POF. Sem o revestimento de polietileno, torna-se possível coletar esse percentual de luz que é espontaneamente espalhada. Para realizar a clivagem da extremidade da POF, por onde a luz entra, foi utilizado um clivador padrão para POFs, conforme pode ser verificado na figura 15.

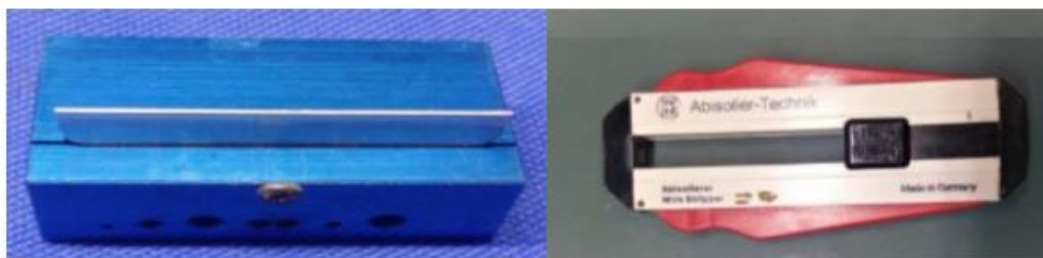


Figura 15: Clivador de POF e Decapador da Hintermaier GmbH

Como fonte de luz para testes, utilizamos um LED simples na cor vermelha (650 nm). Esta fonte foi inserida no início do trecho de POF que atravessa o OPMo-4. Na outra extremidade, após atravessar o OPMo, foi colocado um medidor de potência óptica da *Thorlabs*, modelo PM20, de -60 dBm de sensibilidade, para que fosse utilizado com referência nas medidas (figura 16).

Os foto-darlingtonos foram polarizados com uma tensão de 5 V DC. Nos terminais de saída da impedância (Resistor), foi conectado um voltímetro para medir a tensão. Como dispomos de um circuito em série, formado por uma fonte DC, PD e resistor, é possível visualizar quer a tensão medida nos terminais da impedância, varia

de acordo com a intensidade de luz espalhada pela lateral da fibra nua, a qual é coletada pela microlente e detectada pelo PD (figura 16).

Os valores da resistência foram deixados em aberto pois foram realizados testes com diversos valores, afim de verificar alguma melhora na sensibilidade e na faixa dinâmica (DR). Todas as medidas foram coletadas em tempo real e não foi necessário realizar procedimentos de cálculos de médias, o que desta forma poderia aumentar a relação sinal-ruído. Para cada valor de carga resistiva foram realizados 3 testes para verificar a reprodutibilidade nas medições.

Conforme podemos verificar na montagem da figura 16, a luz espalhada pela lateral da fibra é coletada diretamente pela microlente do PD sem a necessidade de utilizar qualquer meio para guiar essa luz espalhada até essa microlente.

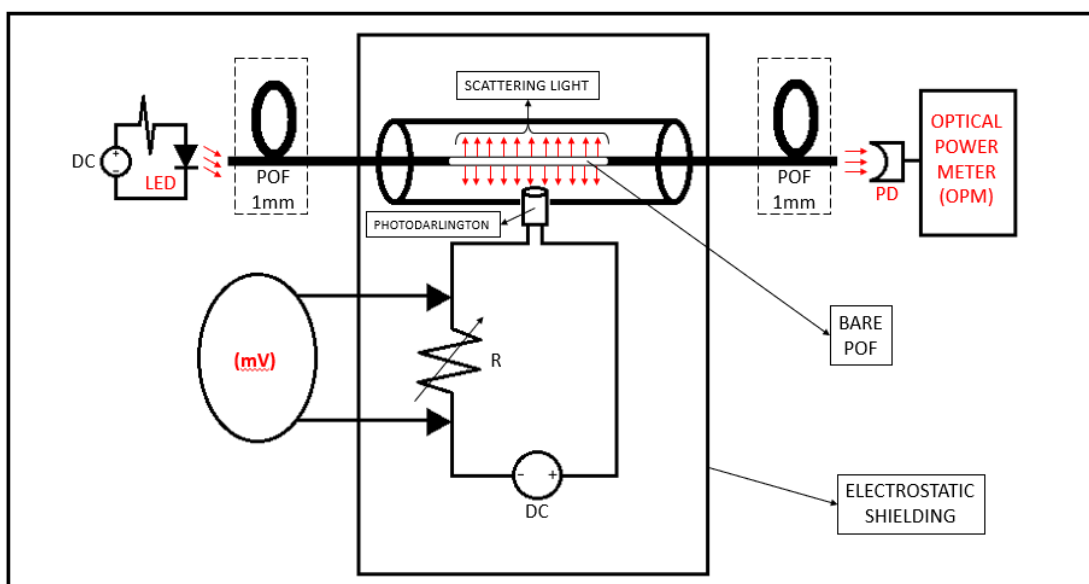


Figura 16: Esquema do arranjo para realização dos testes com o OPMo-4 ao centro, onde temos os equipamentos de medição (voltímetro e OPM) devidamente conectados a cada parte do OPMo-4 e na entrada o LED fornecendo luz a fibra.

A responsividade relativa de cada um dos foto-darlingtons, SD3410 e SD5410 encontram-se representadas pelos gráficos da figura 17. Podemos observar que em aproximadamente 850 nm esses fotodetectores geram um ganho máximo e que 650 nm, que é a região de operação dos testes, esse ganho cai pela metade. Esta

configuração do tipo Darlington, dispensa em princípio, a necessidade de utilização de amplificadores operacionais.

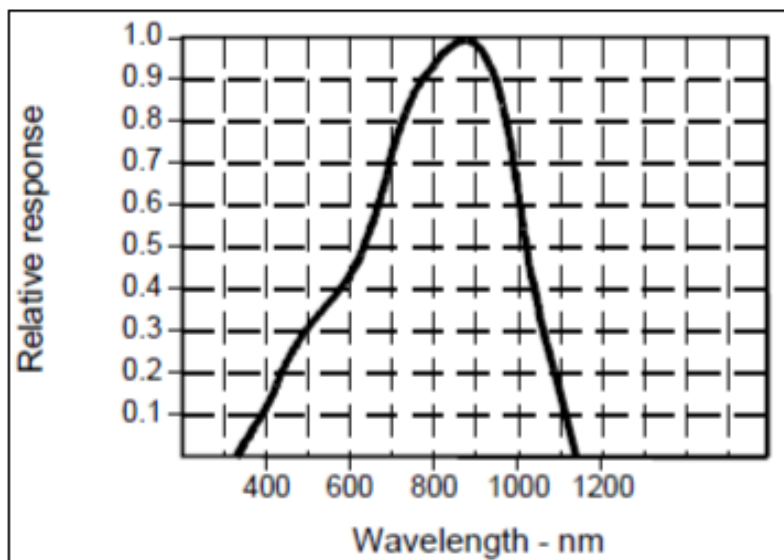


Figura 17: A responsividade relativa dos foto-Darlingtons SD3410 e SD5410.

A tensão aplicada no LED variou de 0 a 25 Vpp, fazendo variar a intensidade luminosa de um valor mínimo até um valor máximo. A tensão aplicada ao circuito eletrônico foi de 5 V, seguindo as especificações fornecidas pelo datasheet do fotodarlington. Foram realizadas 3 leituras para cada valor de impedância resistiva do circuito (carga). Os valores de impedância utilizados foram de 1 M Ω , 2 M Ω e 4 M Ω . Todos os dados foram postos em planilha e suas curvas foram plotadas pelo software Origin, onde foram definidas as curvas mais adequadas para se realizar as comparações necessárias, afim de se verificar as melhorias obtidas pelo novo protótipo proposto.

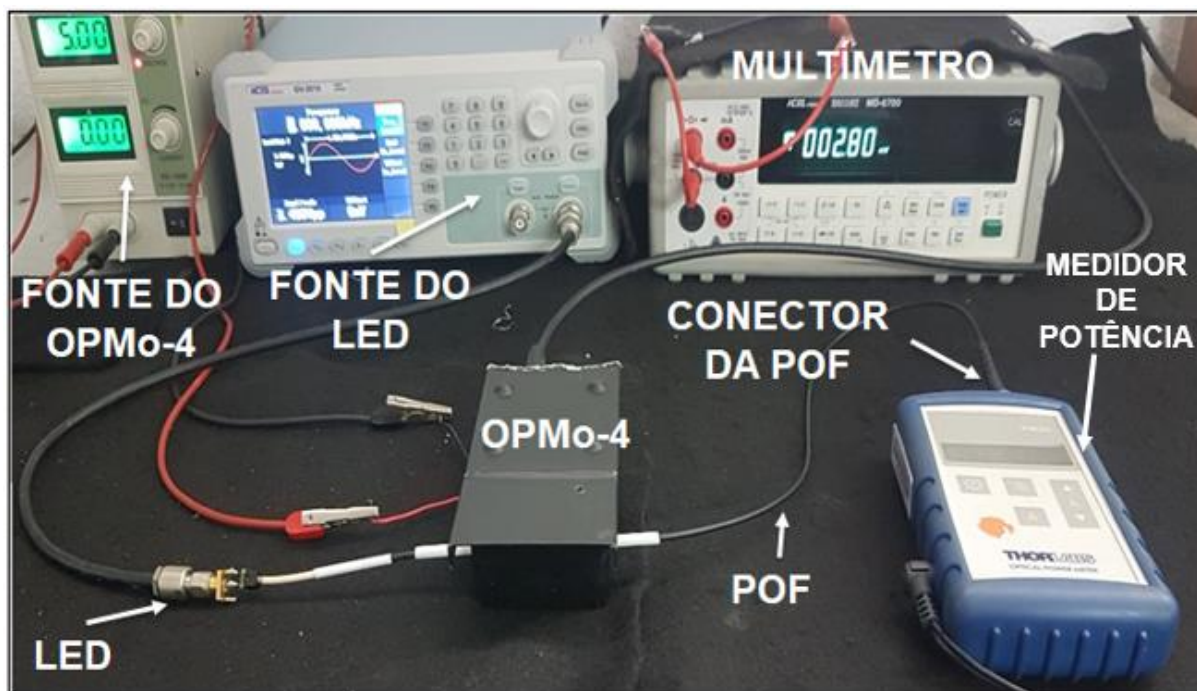


Figura 18 – Foto do arranjo utilizado para realização dos testes do OPMo-4.

3.4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Num teste inicial do OPMo-4, onde caracterizamos os dois foto-darlingtons, SD3410 e SD5410, foi possível notar que apesar da lente presente no encapsulamento do SD5410, o foto-darlington SD3410 se mostrou mais sensível e, portanto, o PD de maior relevância para o projeto. Para os testes de caracterização foi utilizado o setup da figura 16 e 18, porém sem a blindagem de metal que reveste o OPMo-4, e a resistência utilizada foi a mesma dos protótipos anteriores, ou seja, 680 K Ω [26]. Seguindo o padrão de coletas dos valores medidos foram realizados 3 testes para cada foto-darlington, e os valores obtidos foram planilhados e filtrados pelo Origin e seus gráficos foram plotados e dispostos na figura 19.

Verificou-se também que o SD5410 atingia o ponto de saturação exposto a uma potência luminosa menor, se comparado ao outro PD (SD3410). Este fato se deu muito provavelmente pela lente presente em seu encapsulamento. No gráfico da figura 19, podemos observar o comportamento da variação da tensão na carga de prova (tensão de saída do OPMo) com impedância de 680 K Ω . Este gráfico relaciona a tensão de saída (mV) e a potência óptica injetada (mW). Observe que o SD5410 atinge

a saturação para uma potência luminosa de 682,6 μW enquanto o SD3410 atinge a saturação para valores de potência de 842 μW (tabela 6).

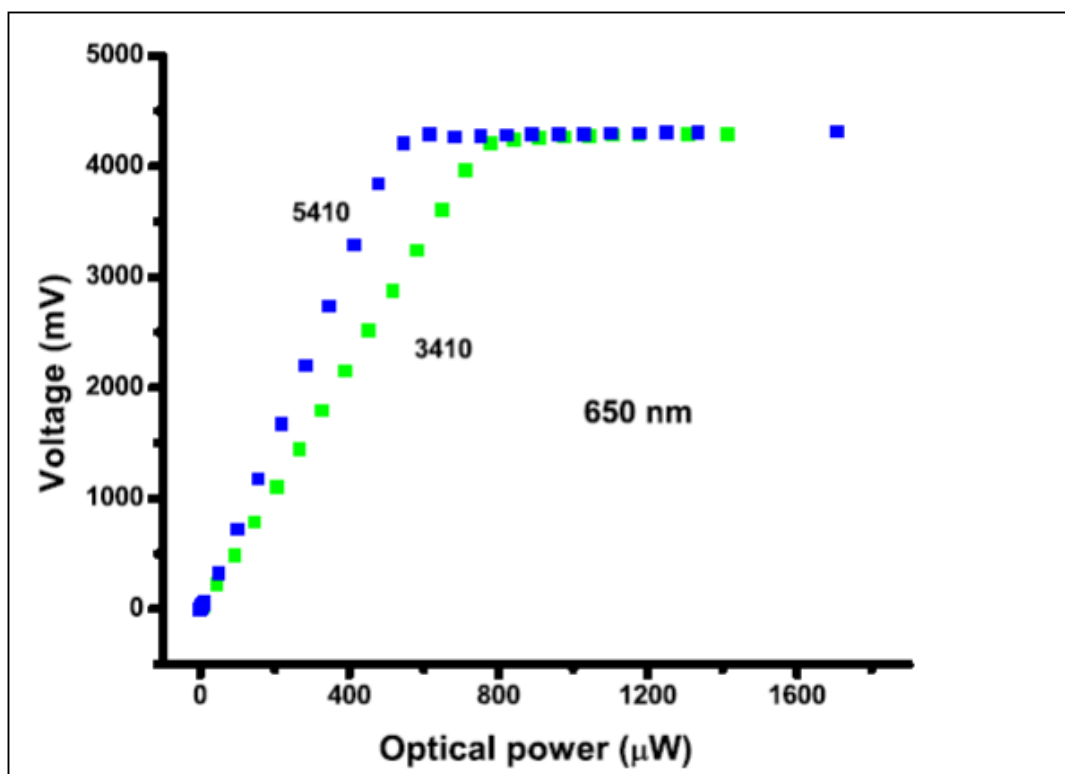


Figura 19: Curva de comparação entre as respostas do OPMo-4 para os fotodarlingtones SD3410 e SD5410, utilizando uma impedância de 680 K Ω .

A sensibilidade ficou dentro dos previstos -50 dBm para ambos os fotodarlingtones [26]. Sendo que o SD3410 chegou a uma sensibilidade de 0,007 μW equivalente a - 51,23 dBm na escala logarítmica e o SD5410 de 0,010 μW equivalente a - 49,90 dBm (tabela 6), como já havia mencionado anteriormente é notável que o SD3410 se mostrou mais eficiente para ser utilizado no novo protótipo, por este motivo, todos os testes foram feitos utilizando este PD.

Realizando a regressão linear dos valores medidos para cada foto-darlington, foi obtido os valores 7,16 mV/ μW para o SD3410 e 5,41 mV/ μW para o SD5410. Observe que um tem maior sensibilidade, mas satura com uma menor potência passante, no caso do SD3410 como vemos na tabela 6 esse valor foi de 4241,1 mV e para o SD5410 foi de 4264 mV.

Tabela 6 : Valores máximos e mínimos medidos em mV e mW para cada foto-darlington.

	SD3410		SD 5410	
	mV	μ W	mV	μ W
Min	0,03	0,007	0,02	0,010
Máx	4241,1	842	4264	682,6

Observe que o sinal de saída saturado é próximo a 5V, tensão de alimentação dos PDs. Isso se deve ao fato de o circuito obedecer a leis das malhas, pois sendo alimentado com uma tensão de 5 V, e tendo os componentes (PD e resistência) ligados em série, a ddp na saída do OPMo será sempre 5 V menos a ddp nos terminais do fotodarlington.

A faixa dinâmica também melhorou atingindo o valor de 50,48 dB contra 45 dB dos protótipos anteriores [26]. Na tabela 17 e na figura 20, é possível ver os valores máximos e mínimos obtidos nos testes, e o gráfico correspondente com os valores convertidos em dBm e dBV. A faixa dinâmica para o OPMo fornece a informação da gama de valores que ele pode medir tendo em vista sua sensibilidade (valor mínimo) e ponto de saturação (valor máximo).

Tabela 7: Valores máximos e mínimos medidos em mV e mW para cada foto-darlington.

	SD3410		SD 5410	
	dBV	dBm	dBV	dBm
Min	- 90,46	- 51,23	- 93,97	- 49,09
Máx	12,56	- 0,74	12,60	- 1,66

Para calcular o valor da faixa dinâmica utilizamos a equação 4, onde foi realizado a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo da potência óptica injetada no OPMo-4.

$$DR = P_{\text{máx}} - P_{\text{min}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$DR = -0,75 \text{ dBm} - (-51,23 \text{ dBm}) = 50,48 \text{ dB}$$

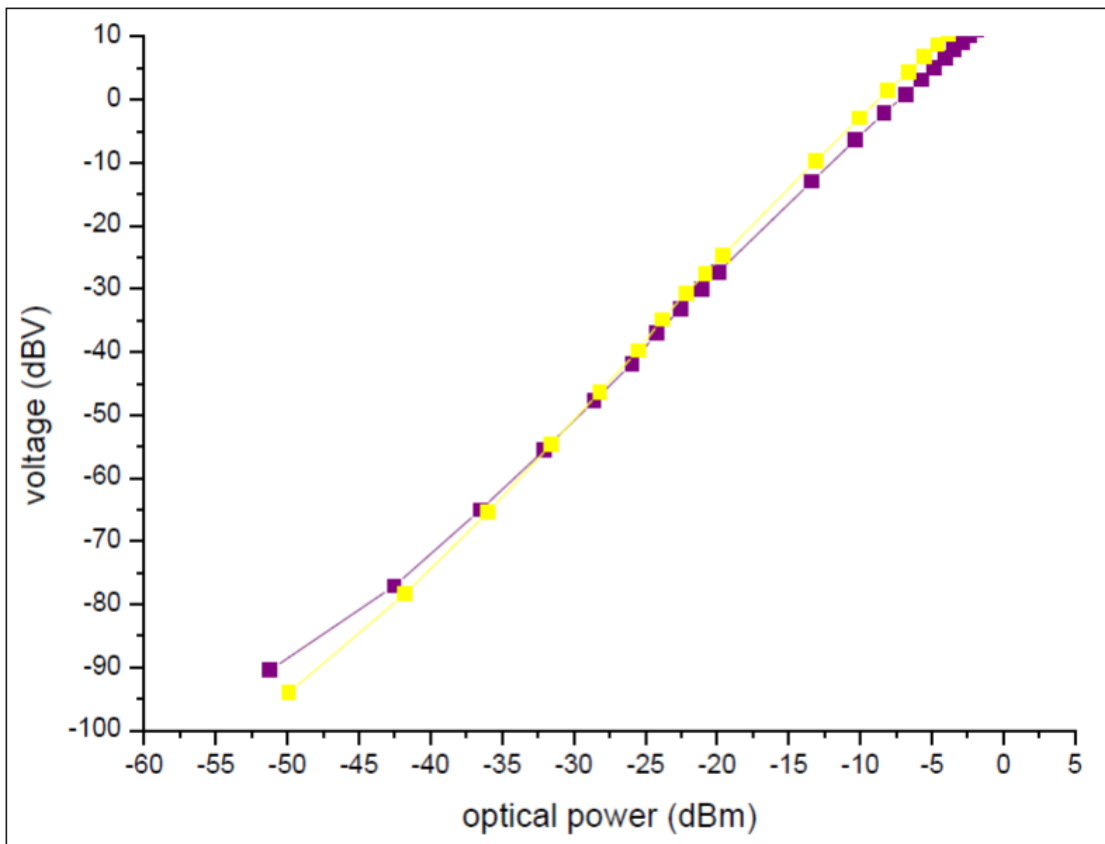


Figura 20: Curva de resposta do OPMo-4 para os foto-darlingtonos SD3410 (roxo) e SD5410 (amarelo), para uma carga de 680 KΩ.

Como havia sido observado em experimentos com protótipos de versões anteriores, o aumento na carga da impedância, fornece um ganho na sensibilidade de aproximadamente 10 dB [26] e consequentemente na faixa dinâmica, e por este motivo, a meta da segunda bateria de testes que foi a de ultrapassar o valor de 1 MΩ

de carga e tentar verificar um aumento ainda maior na faixa dinâmica e na sensibilidade [26].

A principal ideia neste procedimento de coletar informações sobre como se comporta o OPMo aumentando a carga da impedância veio dos trabalhos anteriores apresentados pelos antecessores do OPMo-4, pois o monitor de potência mostrou tendências de aumento da sensibilidade e da faixa dinâmica quando aumentado o valor da carga [26].

Partindo deste princípio, foram testadas cargas de aproximadamente 1 M Ω , 2 M Ω e 4 M Ω , onde obtivemos resultados que por sua vez condiziam com o que havia sido observado anteriormente, ou seja, aumentando-se a carga foi possível verificar que a sensibilidade (-50 dBm) [26] e a faixa dinâmica (45 dB) [26] apresentavam valores melhores, como será possível verificar nos resultados que serão apresentados nas próximas páginas dessa dissertação.

O problema da instabilidade das medições, ou seja, das flutuações dos valores de tensão não foram observadas no OPMo-4, visto que ele foi projetado para ser mais imune a ruídos externos e oscilações que não fossem fornecidas pela variação da potência óptica injetada no enlace.

Analisando os resultados obtidos e após plotar o gráfico de potência luminosa (mW) pela tensão medida pelo voltímetro (mV), podemos chegar a algumas conclusões interessantes que será visto mais adiante. Vale ressaltar que nesta bateria de testes, a fibra de PMMA está diretamente ligada ao medidor de potência óptica, através do conector. E que emendas desnecessárias foram retiradas para eliminar atenuações que pudessem influenciar nos resultados (figura 16).

Com base na figura 21, que exibe o gráfico mencionado no parágrafo anterior e após uma análise mais profunda, podemos observar que para cargas de 1 M Ω , não observamos o ponto de saturação. Este fato se repetiu toda as vezes em que se testou o OPMo com este valor de impedância.

Para cargas de 2 M Ω , o OPMo já começou a exibir um valor de potência luminosa a partir da qual observou-se a presença de saturação em 3,87 dBm do PD. O mesmo ocorreu para a impedância de 4 M Ω , porém como é possível observar na

figura 21, a saturação ocorre para valores ainda menores de potência luminosa incidente ou seja 1,39 dBm.

Uma observação a respeito da referida saturação, é que a tensão na impedância é dada pelo produto $V = R.i$, onde i é a corrente fornecida pelo fototransistor em estímulo à luz injetada nele. Portanto, quando aumentamos o valor de R , consequentemente o valor da tensão neste componente aumenta. As medidas coletadas foram realizadas com os valores de R fixos, variando somente corrente i de acordo com a potência óptica injetada no PD. Como a tensão de alimentação do circuito é de 5 V, o produto $R.i$ não consegue ultrapassar esse valor, ficando no máximo em torno de 4,4 V como verificado pelas medições.

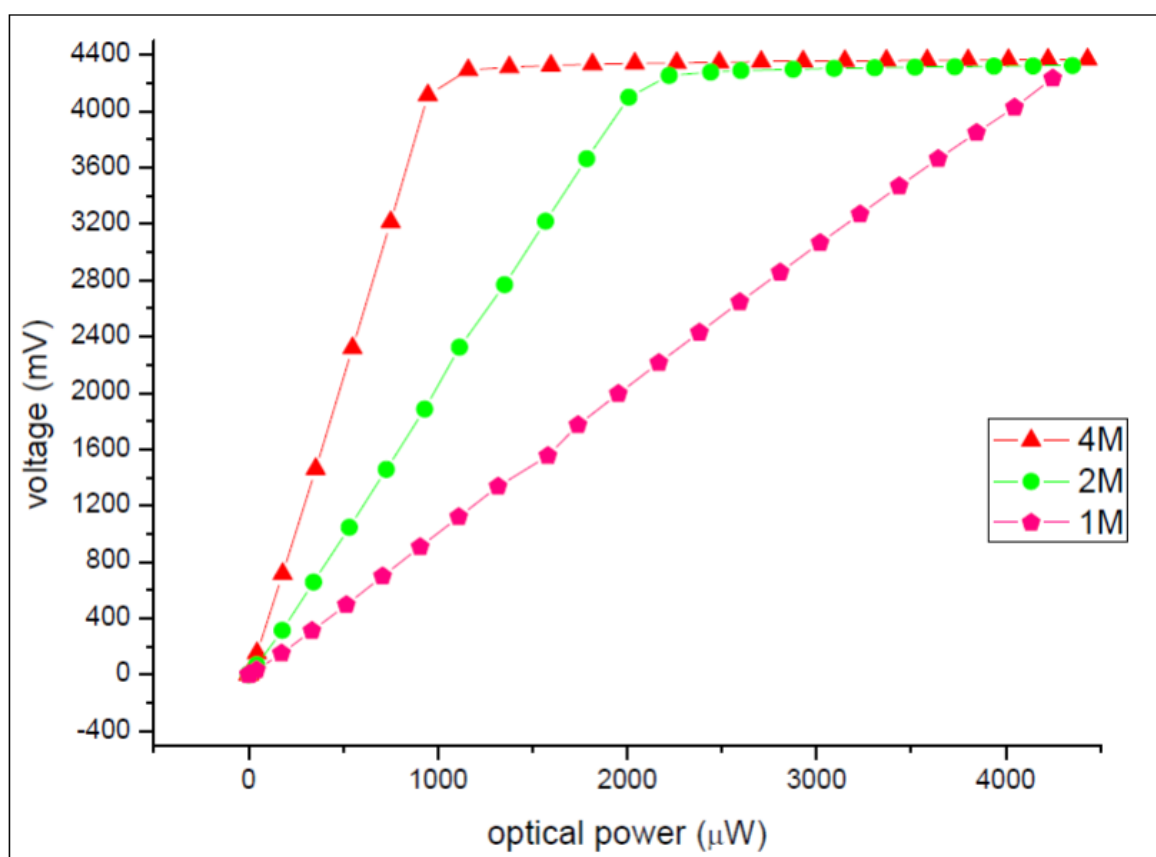


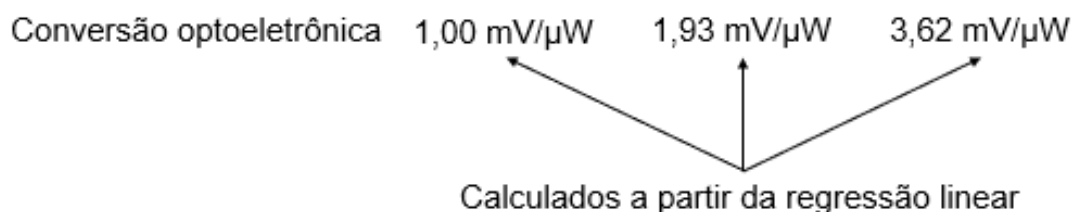
Figura 21: Tensão X Potência óptica, para 3 valores de impedâncias diferentes observados pelo PD SD3410.

No que diz respeito a sensibilidade, destacamos outro ponto interessante e confirmando em parte as previsões anteriores, vemos que conforme os valores de

impedância aumentam temos um ganho significativo nos valores da sensibilidade. Isto pode ser observado analisando os resultados obtidos na tabela 8, onde temos os valores da regressão linear dos valores analisados. É possível observar a maior sensibilidade para resistência de 4 M Ω .

Tabela 8: Valores máximos e mínimos em mV e μ W para o SD3410 variando as cargas em 1 M Ω , 2 M Ω e 4 M Ω . E os valores das conversões optoeletrônica para os 3 respectivamente.

	1M		2M		4M	
	mV	μ W	mV	μ W	mV	μ W
Mín	0,02	0,009	0,02	0,006	0,04	0,003
Máx	4234,2	4248	4277,7	2441	4313,9	1378



Enquanto que para 1 M Ω o valor de sensibilidade medido foi de – 49,85 dBm, para 4 M Ω foi de – 55,21 dBm. Estes valores demonstram que realmente com o aumento da carga resistiva a sensibilidade aumenta [26] , e se mostram de extrema importância pois demonstra que o OPMo-4 se mostrou superior aos seus antecessores, como exemplo, o primeiro protótipo de OPMo desenvolvido no LaCOP [18][26] apresentava cerca de – 50 dBm de sensibilidade (e 45 dB de faixa dinâmica).

Deve-se atentar que tal valor de sensibilidade foi obtida de forma a aproximada, a partir de uma interpolação da reta de sensibilidade região na qual a potência óptica incidente era muito baixa e então a relação sinal-ruído era também muito baixa comprometendo a confiabilidade das medidas.

Na presente dissertação, foi possível não só obter valores menores de sensibilidade (e valores maiores de DR) onde foi atingido $-55,21$ dBm, como também um comportamento bem mais estável, e confiável, quando baixas potências (como $-55,2$ dBm) incidiam no foto-Darlington do OPMo-4.

A Figura 21 e a tabela 9 mostra que para $R = 4\text{ M}\Omega$ a potência óptica de saturação medida era de $1,39$ dBm enquanto que a sensibilidade também medida foi de $-55,21$ dBm. Isto significa que para $R = 4\text{ M}\Omega$, obteve-se $DR = 1,39\text{ dBm} - (-55,21\text{ dBm}) = 56,6\text{ dB}$. Deve-se notar que este valor de faixa dinâmica de operação em $56,6\text{ dB}$ é bem superior e mais confiável que os 45 dB obtidos na 1ª geração de OPMo (OPMo-1) desenvolvido no LaCOP [18].

Valores menores de sensibilidade são difíceis de serem medidos com os atuais recursos de laboratório pois ainda que se utilize um fotodetector melhor, a potência óptica mínima capaz de ser medida é limitada pelo voltímetro utilizado, que por sua vez não é capaz de medir as tensões menores do que $0,01\text{ mV}$ ($= -100\text{ dBV}$).

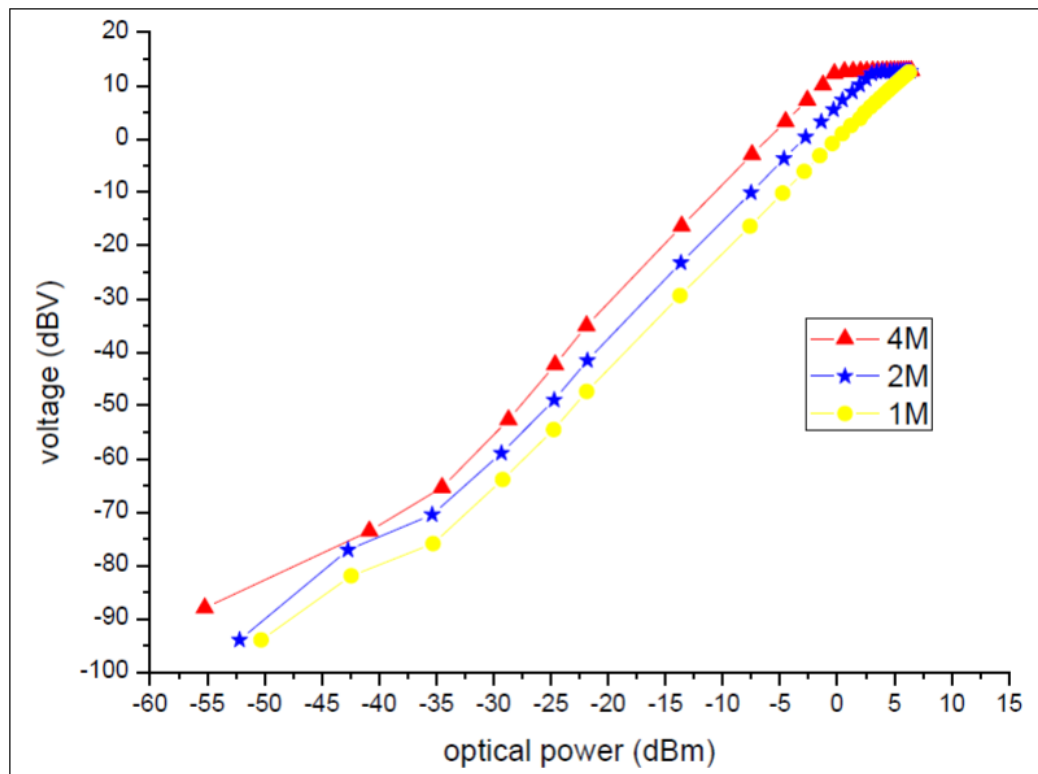


Figura 22: Tensão X Potência óptica, para 3 valores de impedâncias diferentes observados pelo PD SD3410 em escala logarítmica.

No que diz respeito a faixa dinâmica, o que foi observado é que os valores aumentaram significativamente. Enquanto em protótipos anteriores era observado uma faixa de 45 dB, o OPMo-4 demonstrou que este valor pode chegar 56,6 dB isso para a maior impedância em teste, utilizando a equação 4 e os valores da tabela 9. Apesar deste valor, as cargas de 1 M Ω e 2 M Ω , também se mostraram com uma faixa dinâmica bem expressiva ficando em torno de 56,57 dB e 56,04 dB, respectivamente, utilizando também a equação 4 e os valores da tabela 9.

	1 MΩ		2 MΩ		4 MΩ	
	dBV	dBm	dBV	dBm	dBV	dBm
Min	-93,98	-50,29	-93,98	-52,17	-87,96	-55,21
Máx	12,53	6,28	12,62	3,87	12,70	1,39

	FAIXA DINÂMICA
1 MΩ	56,57 dB
2 MΩ	56,04 dB
4 MΩ	56,60 dB

Deve-se também comparar os resultados aqui obtidos de DR ~ 56 dB como sendo o mesmo obtido em [18][26] onde utilizou-se 2 PD atuando em conjunto, e aqui

apenas um PD. Esta simplificação foi obtida com a otimização da impedância de carga e o aperfeiçoamento do circuito como um todo em termos de estabilização.

3.5 – CONCLUSÕES

O OPMo-4 como proposto, se mostrou mais imune a interferências externas, isto devido a sua blindagem metálica. O aumento da faixa de 45 dB para 56 dB, com o aprimoramento do circuito e utilizando uma impedância de carga adequada, confirmou o que havia sido preconizado em teses e artigos anteriores [18][25][26] a respeito do OPMo.

Um fator mencionado em protótipos anteriores [26], era a utilização de médias para se estabilizar os resultados medidos, porém este procedimento não foi necessário visto que o OPMo-4 se mostrou razoavelmente imune a oscilações de grande magnitude.

O principal objetivo deste protótipo, era o de aumentar a sensibilidade e a faixa dinâmica. Apesar deste aumento ter sido observado, os componentes eletrônicos ainda são um limitante em se conseguir aumentar ainda mais estes valores. A proposta de captar a luz espalhada de forma natural pela casca se mostrou uma técnica muito eficiente para POFs de PMMA que operam na faixa visível onde o espalhamento de Rayleigh é mais significativo, quando se compara, por exemplo, com o infravermelho em fibras de sílica. Mesmo com as melhorias obtidas em nossos resultados, acredita-se que o OPMo pode ir muito além dos 56 dB de faixa dinâmica lembrando que 75 dB é a DR típica dos modelos comerciais de OPM.

A sensibilidade obtida -55,21 dBm teve uma melhora significativa se comparado aos -50 dBm [26], porém como os equipamentos para medições não possuem uma precisão maior, não foi possível verificar um grande aumento conforme era esperado. Utilizando equipamentos que consigam medir a tensão com sensibilidade maior do que -100 dBV, acredita-se que seja possível demonstrar um aumento maior na sensibilidade com o aumento da impedância, apesar de isso ter sido comprovado pelas medidas.

Uma questão interessante e testada durante este projeto do OPMo-4, era a perda por inserção. Sabendo que o OPMo será inserido em linha, ou seja, no enlace de comunicações, por onde trafegam dados para monitorar os valores de potência do mesmo, fez-se necessário caracterizar as medidas de perdas por inserção que será assunto do próximo capítulo.

4 – PERDAS POR INSERÇÃO do OPMo-4

4.1 – INTRODUÇÃO

As medidas de perda por inserção do OPMo-4 em um enlace de POF, é de extrema importância prática, visto que redes baseadas neste tipo de fibra são extremamente limitadas pelo fenômeno da atenuação óptica. Como já mencionado, o OPMo-4 e protótipos anteriores, foram projetados para serem inseridos *in-line*. Consequentemente, a referida inserção irá acrescentar algum débito na potência luminosa entregue ao receptor, devido a(s) emenda(s) necessária(s).

As emendas em POFs geralmente usam ferramentas e procedimentos de manuseio simples, porém as diversas técnicas de conexão e junção disponíveis não resultam numa mesma qualidade. Torna-se altamente conveniente/necessário dispor de alguma técnica bem simples e prática para se realizar uma emenda de alta qualidade entre POFs. Técnicas atuais, com procedimento de clivagem e polimento das extremidades, resultam em perdas de inserção de até 0,5 dB [27].

Por outro lado, foi pesquisado uma técnica mais simples, que qualquer pessoa sem treinamento pudesse realizar. Esta técnica de emenda mecânica simples, rápida, econômica e prática para os principais tipos de POF baseados em PMMA, utiliza um gel adesivo transparente amplamente disponível [27]. Esta técnica obteve valores médios de perda por inserção de 0,4 dB com desvio padrão de 0,1 dB, conforme podemos visualizar na tabela 6.

Tabela 10: Cálculo da Média e desvio padrão para Perda por inserção seca (IL_d) e Perda por inserção com o gel adesivo (IL_g) na emenda dos 3 tipos mais comuns de POFs. [27]

PMMA-Based POF	IL_d (dB)	IL_g (dB)
Standard high-NA-SI (Toray PFU-CD1001-22-E1 1 mm fiber, 2.2 mm cable)	1.4 ± 0.5	0.4 ± 0.1
Low-NA-DSI (Toray PMU-CD1002-22-E1 1 mm fiber, 2.2 mm cable)	1.9 ± 0.5	0.6 ± 0.1
GI (Optimedia OMJ-Giga/FF-GI-SE100 1 mm fiber, 2.2 mm cable)	2.2 ± 0.6	0.8 ± 0.4

A técnica consiste em utilizar o gel adesivo “Superbonder gel” (Loctite 454) após realizar apenas o procedimento de clivagem (com lâminas frescas) das extremidades da POF. Após realizar uma clivagem adequada e verificar que as extremidades estão visualmente planas, utiliza-se uma luva metálica (sleeve) como guia pra unir as duas extremidades. Uma pequena gota do gel adesivo é aplicada a uma das extremidades e elas são unidas dentro da luva e mantidas manualmente sob pressão durante aproximadamente 2-3 minutos [26].

Como este procedimento não necessita de nenhum conhecimento técnico para realizar emendas em POFs, se tornou o mais viável para a caracterização das perdas por inserção do OPMo.

4.2 – PERDAS POR INSERÇÃO CAUSADA PELO OPMo-4

Para medir a perda por inserção (IL) causada pelo OPMo-4, foi estabelecido uma montagem para se realizar o experimento e coletar os dados. Conforme no capítulo 3 dessa dissertação, utilizamos um LED simples com comprimento de onda de 650 nm como fonte de luz de prova.

Existem dois modos de se inserir um OPMo em um enlace. O primeiro modo seria em qualquer ponto do enlace, que não fosse próximo ao receptor, sendo necessárias duas emendas. O segundo, e mais simples, é conectar o OPMo-4

diretamente ao foto-detector do fluxo luminoso de dados. Neste último caso, o OPMo possui em uma de suas extremidades um conector, que pode ser ligado diretamente ao equipamento do receptor. Por este motivo, somente uma emenda é necessária.

A montagem experimental foi organizada pelos seguintes estágios, conforme observado na figura 23. Numa extremidade da POF foi inserido o LED, esta POF possuía uma medida de 30 cm (passando por dentro do clivador) e um medidor de potência da Thorlabs, onde a outra extremidade da POF foi inserida.

Inicialmente, foi injetada luz numa das extremidades fibra e o valor da potência luminosa detectada pelo equipamento de medição foi tomado como referência. Em seguida a fibra era clivada sem se desconectar nenhum dos componentes das extremidades. Neste momento, nenhum valor de potência era detectado pelo medidor.

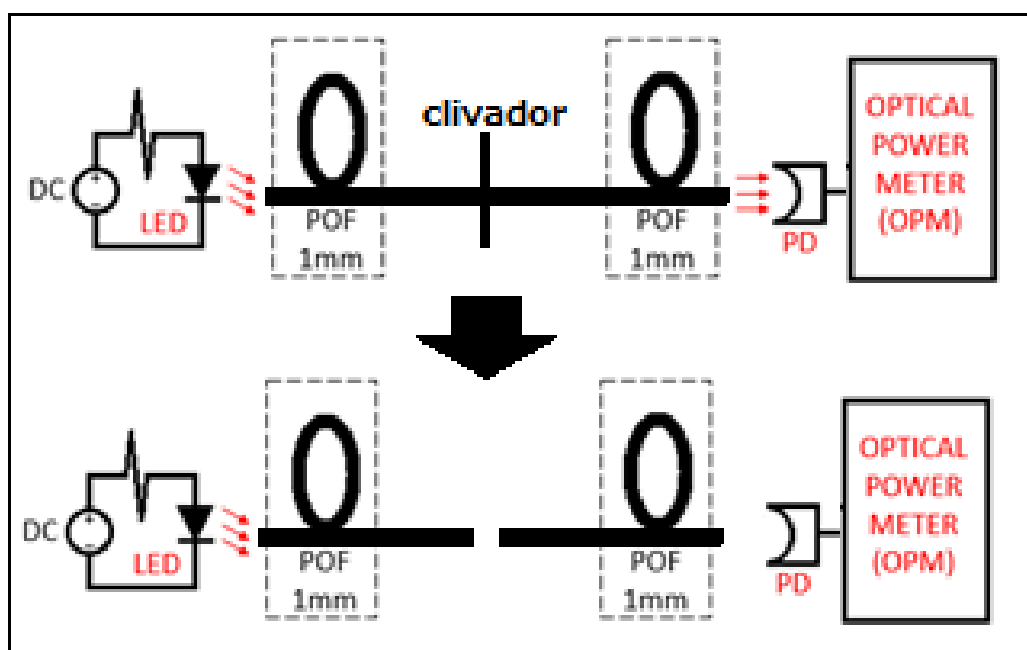


Figura 23: Esquemático da montagem inicial para caracterizar as perdas por inserção do OPMo-4 em um enlace de POF.

O procedimento de inserção do OPMo-4 neste enlace rompido foi iniciado após a clivagem da POF, onde cada segmento da região clivada foi inserido nas extremidades do trecho de POF que passa por dentro do OPMo, conforme o método de duas emendas. Com a técnica de utilizar o gel adesivo, foram realizadas as duas

emendas, e imediatamente ao final da segunda emenda o equipamento de medição respondeu com um valor de potência luminosa, conforme ilustra a figura 24.

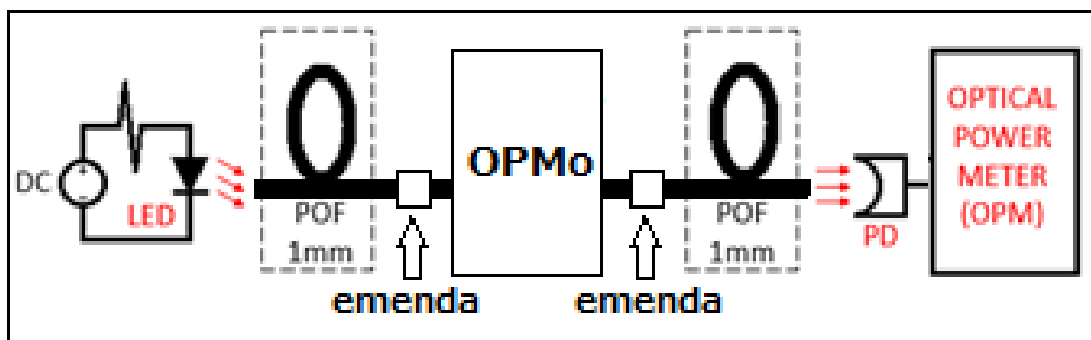


Figura 24 Esquema das emendas realizadas depois de inserido o OPMo-4, pelo método 1.

Este procedimento foi repetido 5 vezes e os valores obtidos foram anotados e comparados com o valor de potência medido inicialmente com o trecho de POF antes da clivagem. Este teste de medida de inserção tem uma grande relevância para aplicações práticas do OPMo em enlaces reais.

No segundo método de inserção, onde é necessária somente uma emenda, o trecho da montagem inicial que é ligado ao medidor de potência foi descartado e o OPMo foi inserido no trecho restante (iluminado pelo LED) e conectado ao medidor de potência diretamente, como podemos ver na figura 25.

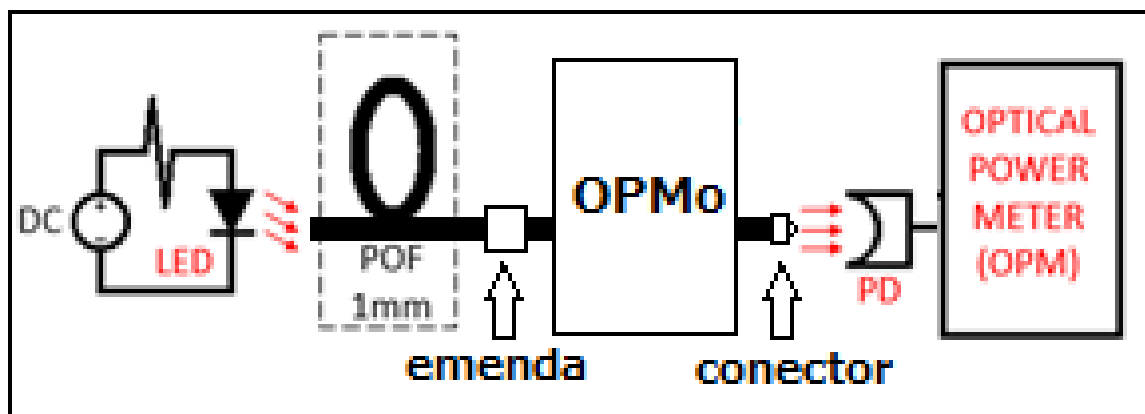


Figura 25: Esquema das emendas realizadas depois de inserido o OPMo, pelo método 2.

Nas figuras 26 e 27 podemos observar como ficou a montagem final de ambos os métodos de inserção utilizados. Observe que neste experimento não estamos interessados nos valores fornecidos pelo OPMo e sim o quanto de perda ele causa num enlace que ele será inserido. Por este motivo o OPMo encontra-se inativo e não realizamos nenhuma medida com ele.

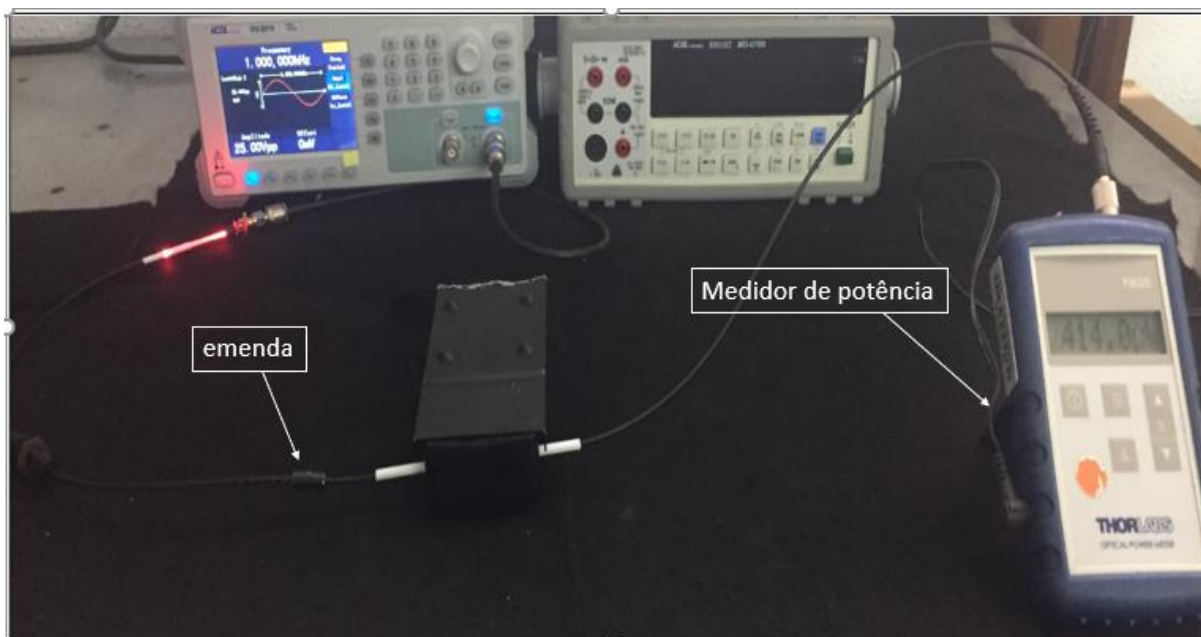


Figura 26: Foto do experimento de perda por inserção do OPMo com 1 emenda método 2.

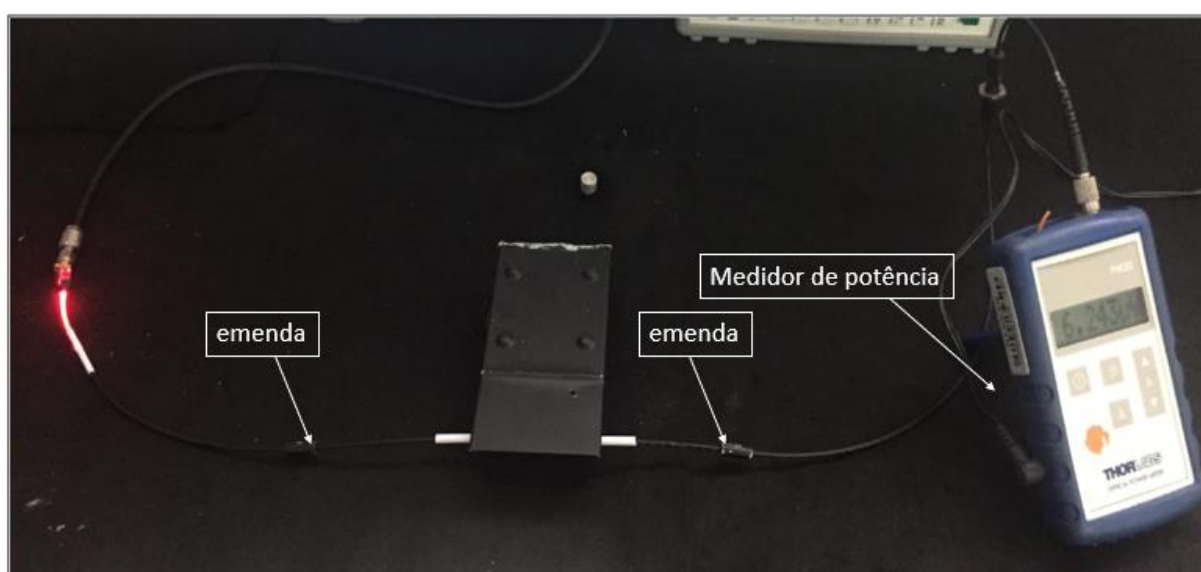


Figura 27: Foto do experimento de perda por inserção do OPMo com 2 emendas. Método 1.

4.4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados coletados a respeito da perda por inserção foram armazenados para análise onde temos uma potência de referência retirada do valor de potência obtida com a montagem inicial.

Chamamos de P_0 , o valor da potência de referência, medida em dBm e obtivemos 3,4 dBm. Este valor foi medido com a fibra de prova antes da clivagem, e foi mantido na base de dados para comparação com os resultados obtidos após a clivagem e emenda da fibra conforme tabela 11.

Para o primeiro caso, em que foram feitas duas emendas, os valores da perda se mostraram um pouco diferente do esperado. Na primeira medição verificamos que o medidor de potência forneceu o valor de P_1 igual a 2,0 dBm. Onde P_1 é o valor da primeira medida após a emenda. Após coletar esse resultado, o procedimento foi repetido mais 2 vezes para que fosse possível verificar a veracidade dos valores que estavam sendo medidos. Os valores de P_2 e P_3 relativos aos segundo e terceiro testes respectivamente se foram de 1,9 dBm e 1,7 dBm como é possível observar na tabela 11.

Tabela 11: Potência medida para os experimentos do caso de uma e duas emendas, realizado 3 vezes tomando como base o valor de referência P_0 (sem emenda).

Potência Medida	1 Emenda	2 Emendas
P_0	3,4 dBm	3,4 dBm
P_1	2,8 dBm	2,0 dBm
P_2	2,6 dBm	1,9 dBm
P_3	2,9 dBm	1,7 dBm

Para calcular o valor da perda causada pela inserção do OPMo, foi feito a diferença do valor de referência P_0 , com cada um dos valores obtidos nas 3 medidas posteriores, dado pela equação 5. Em seguida foi calculado a perda por inserção média dado pela equação 6.

$$IL = P_0 - P \quad (\text{Eq. 5})$$

$$IL_M = (\sum_1^i IL_i) / i \quad (\text{Eq. 6})$$

Desta forma o valor da perda por inserção média (IL_M) foi de 1,5 dB. Este valor não ficou dentro do esperado, pois segundo [27], os valores médios para cada emenda ficavam em torno de 0,4 dB como visto na tabela 6. No caso do OPMo o valor de IL_M por emenda foi de 0,75 dB, conforme podemos observar na tabela 12. Esse valor pode ainda ser reduzido melhorando a técnica de emenda com a supercola.

Tabela 12: Perda por inserção para cada bateria de testes realizados e a perda por inserção média, para cada caso.

Perda por Inserção	1 Emenda	2 Emendas
IL_1	0,6 dB	1,4 dB
IL_2	0,8 dB	1,5 dB
IL_3	0,5 dB	1,7 dB
IL_M (média)	0,6 dB	1,5 dB

Para o segundo caso onde tivemos somente uma emenda, os valores se mostraram melhores, porém dentro do esperado (0,4 dBm) baseado nos experimentos do primeiro caso. Como valor de referência mantivemos os 3,4 dBm, pois a montagem não foi alterada e os testes foram realizados em sequência, ou seja, após coletar os dados do primeiro caso, o trecho que estava conectado no medidor de potência foi retirado. Desta forma, utilizou-se a fibra com conector passando por dentro do OPMo e ligada diretamente no medidor de potência.

Analisando os valores obtidos para o OPMo sendo inserido na extremidade do enlace, para o primeiro teste, tabela 11, obtivemos o valor de P_1 igual a 2,8 dBm. Fazendo a diferença com o valor de referência P_0 , obtivemos um valor de 0,6 dB de

perda por inserção, que se mostrou muito próximo do valor esperado segunda a tabela da figura 6.

Mais dois testes foram realizados obtendo-se os valores de P_2 e P_3 de respectivamente 2,6 dBm e de 2.9 dBm, gerando portanto uma perda de inserção de 0,8 dB e de 0,5 dB, quando comparados com o valor de referência de 3,4 dBm. Após calcular a média dos três valores obtidos nos testes consecutivos chegamos ao valor de IL_M de 0,6 dB.

Estes resultados mostram portanto que o OPMo-4 não insere perdas significativas no enlace, considerando o valor de perda por emenda que fica potencialmente tão baixa quanto em torno de 0,4 dB.

Os valores dos desvios observados podem ser originários do trecho de fibra sem a proteção de polietileno que passa pelo interior do OPMo, ou de algum outro fator não observado.

O interessante, é que o OPMo-4 se mostrou um dispositivo apto a operar em situações reais, sendo inserido em enlaces de redes sem causar prejuízos significativos a potência que chega no receptor.

4.5 – CONCLUSÕES

A análise dos valores de perda por inserção se mostrou de grande relevância, pois nunca houve uma publicação conhecida de um experimento que testasse esse parâmetro para OPMos. Os resultados obtidos mostram que o OPMo tem um grande potencial de se tornar um dispositivo comercial, visto que ele produz perdas razoavelmente baixas, podendo ser reduzidas, ou seja, o valor da perda inserida por ele em um enlace se equipara a de uma emenda.

Apesar dos valores das perdas estarem um pouco acima do esperado, acredita-se que seja possível realizar emendas com perdas ainda menores e dentro dos valores esperados de 0,4 dB. Neste caso, teríamos uma perda total de inserção de 0,8 dB considerando um OPMo inserido no meio de um enlace de POF. Este valor

poderia ainda ser reduzido, acredita-se para 0,4 dB (total para 2 emendas ou 0,2 dB/emenda), caso as extremidades de POFs envolvidas nas 2 emendas fossem clivadas e polidas ou clivadas com o método da pressão transversal sobre as POFs conforme descrito em [27] e referências aí listadas.

Como os enlaces de POFs de PMMA são curtos, tipicamente < 500 m, o segundo método de inserção se mostrou muito mais imune a perdas por inserção. Este fato é obviamente comprovado já que utiliza apenas uma emenda, contra duas emendas presentes no segundo método, que por consequência irá gerar mais que o dobro de perdas.

5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao fim desta dissertação, que teve diversos desafios, foi possível chegar a resultados que despertaram ainda mais o interesse por este método de monitoramento de potência óptica.

Por ser um método não invasivo, ou seja, a luz coletada pelo dispositivo não interfere na luz guiada pelo núcleo da fibra. Diferentemente dos modelos presentes no mercado atualmente, o OPMo se aproveita apenas da luz que é espalhada espontaneamente pela lateral descascada da POF.

O OPMo-4 foi desenvolvido assim como os seus antecessores, para ser inserido em linha, de preferência ao final do enlace, a poucos centímetros do receptor, visto que o trecho de POF em sua saída possui um conector que pode ser ligado ao equipamento de recepção do sinal óptico.

O escudo metálico em forma de paralelepípedo, se mostrou muito eficiente em isolar os componentes eletrônicos e com isso reduzir significativamente os ruídos eletromagnéticos provenientes de fontes externas. Contudo uma ênfase maior deve ser dada a esta parte do projeto em trabalhos futuros para melhorar ainda mais o isolamento do circuito.

O OPMo-4 conseguiu atingir níveis interessantes (56,6 dB) de faixa dinâmica, e seus resultados mostraram grande relevância no que diz respeito a esta questão. Os testes foram feitos apenas para comprimentos de onda de 650 nm e trabalhos futuros devem explorar outros comprimentos de onda e dar continuidade no estudo de monitores para canais WDM.

Sem a necessidade da realização de médias, foi possível manter estável todos as medidas dos dados coletados nos experimentos, descartando a necessidade da utilização de equipamentos mais aprimorados, sendo necessário somente utilizar um voltímetro simples para fazer a leitura.

A sensibilidade também foi melhorada visto que foi possível medir valores bem baixo de potência luminosa. Percebeu-se que os equipamentos de medições

como o voltímetro possui este último uma precisão muito baixa de 0,01 mV, se comparado com padrões mais modernos.

Nos experimentos de perda por inserção, verificamos que o OPMo pode ser inserido em qualquer ponto do enlace. Porém próximo ao receptor as perdas se mostraram menores devido ao menor quantidade de emendas necessárias. Concluimos também que o OPMo não gera perdas significativas, visto que a caracterização deste parâmetro se mostrou próximo do valor esperado de 0,4 dB.

Em trabalhos futuros, vislumbra-se a possibilidade de se inserir um visor de cristal líquido e um microcontrolador para controle de processamento de dados. A alimentação pode ser feita por baterias recarregáveis em conjunto com uma fonte de alimentação para recarregar estas baterias no caso de queda de energia, caso seja necessário manter o monitoramento intermitente ou permanente. O controle da distância dos PD da fibra sem a proteção também pode aprimorar ainda mais a qualidade do aferimento dos valores medidos. E por fim o aprimoramento do circuito eletrônico utilizando técnicas mais robustas.

REFERÊNCIAS

- [1] AGRAWAL, G. Fiber-optic communication systems. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley-Interscience Publication, 1997.
- [2] BASTOS, A. et al. Fibra Óptica. (Monografia) - Disciplina Princípios de Telecomunicações do Programa de Engenharia de Telecomunicações.UNIBH, Belo Horizonte, 2004.
- [3] BERGAMO, R. T. Sistemas de comunicações ópticas. São Jose, IFSC: 2007.
- [4] BRISTON, J. H.; MILES, D. C. Tecnologia dos polímeros. São Paulo: Polígono, 1975. 572 p.
- [5] CORREIA, M. M.Desenvolvimento de fontes amarelas rápidas para enlaces com fibras ópticas poliméricas de base PMMA / Marlon Medeiros Correia. – Niterói, RJ : [s.n.], 2017. 118 f.
- [6] COSTA, P. M. A. Projecto Sistemas em Tempo Real. Documento online. Disponível em:http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulomoises/STR/Trabalhos%20%20desenvolvidos%20%20STR_ficheiros/Infra_verm.pdf. Acesso em: 13/11/2018.
- [7] DEMIC - Departamento de Eletrônica e Microeletrônica. Unicamp. Documento online. Disponível em: <http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee640/6a%20Aula.pdf>. Acesso em: 13/11/2018.
- [8] GIACON, V. M. Modificação da superfície de filmes de PMMA via polimerização por plasma de CHF₃. 2004. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- [9] GRANADO, R. M. Avaliação da integridade superficial do polimetilmetacrilato (PMMA) no torneamento com ferramenta de diamante. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- [10] JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.
- [11] JORDÃO JUNIOR, A.; ROMÃO, E. Implante de lente intra-ocular dobrável acrílica em crianças. Arquivos Brasileiros de Oftalmologia, v. 63, n. 2, p. 115-118, 2000.
- [12] MA, S.; ZHONG, L.; WANG, P.; XU, C. A fast way to fabricate polymethyl methacrylate for graded-index polymer optical fibers. Polymer-Plastics Technology and Engineering, v. 45, p. 373-378. 2006.
- [13] NALWA, H. S. Polymer optical fibers. New York: American Scientific, 2004. 300 p.

- [14] OLIVEIRA, I. A. S. (2004). Estudo e caracterização de fibras ópticas plásticas para aplicações em telecomunicações. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 162 p.
- [15] PADILHA, G. S. Estudo das variáveis de fluoração via plasma na deposição e crescimento de polímero parcialmente fluorado sobre filmes de PMMA. 2006.132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- [16] PEDROSO, L. S. et al. Construção de um luxímetro de baixo custo. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº2, e2503 (2016).
- [17] PINHEIRO, J. M. S. Sistemas de transmissão e meios ópticos. Documento virtual. Disponível em: Acesso: 12/11/2018.
- [18] Ricardo M. Ribeiro, Taiane A.M.G. Freitas, Andrés P.L. Barbero and Vinicius N.H.Silva, “Non-Disturbing Optical Power Monitor for Links in the Visible Spectrum Using Polymer Optical Fibres”, Measurement Science and Technology, 2015
- [19] SEGURA, D. F. Estudos preliminares da preparação de fibras ópticas plásticas e híbridos orgânicos-inorgânicos luminescentes a partir de poli(metacrilato de metila) comercial.2010. Dissertação (Mestrado em Química) -- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, 2010.
- [20] SILVÉRIO, L. R. Fibras Ópticas. 2002. Monografia (Graduação em Física). – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- [21] ZUBIA, J.; ARRUE, J. Plastic optical fibers: an introduction to their technological processes and applications. Optic Fiber Technology, v. 7, n. 2, p. 101-140, 2001.
- [22] Ribeiro R M, Martins L and Werneck M M 2005 Wavelength demodulation of ultrabright green light-emitting diodes for electrical current sensing IEEE Sensors J. 5 38–47
- [23] MELLO, Hilton A. e INTRATOR, Edmond. Dispositivos Semicondutores, Livros Técnicos e Científicos, 4a edição.
- [24] Transistor. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/componenteseletronicos/transistor-tipos#darlington>>. Acessado em 20 de outubro de 2018.
- [25] R. M. Ribeiro, T. A. M. G. Freitas, A. P. L. Barbero, P. S. T. C. Cyrillo, W. S. Zanco and O. S. Xavier, “A Novel Optical Power Monitor (OPM) for Plastic Optical Fibre (POF) Links”, 20th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF 2011), Bilbao, Spain, September 14-16, 2011
- [26] Taiane A M G Freitas, Desenvolvimento de um Monitor de Potência Óptica aperfeiçoado para 1 ou 2 Canais WDM com Imunidade A distribuição Modal. ´

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

[27] Michele C. Zanon, Dispositivos de Multi-Demultiplexação WDM e emendas para Fibras Ópticas Poliméricas de PMMA Visando Aplicações em Redes Residenciais. 'Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

[28] Honeywell, Optical Sensors, Product Range Guide, Sensing and Control. Disponível em: < <https://sensing.honeywell.com/index.php?ciid=159835&laid=1No=0Nrpp=50Ntt=Photo-darlington> >, Acessado em 18 de Setembro de 2018.

[29] RIBEIRO, Ricardo Marques. Notas de Aula – Optoeletrônica e Fotônica. 2011

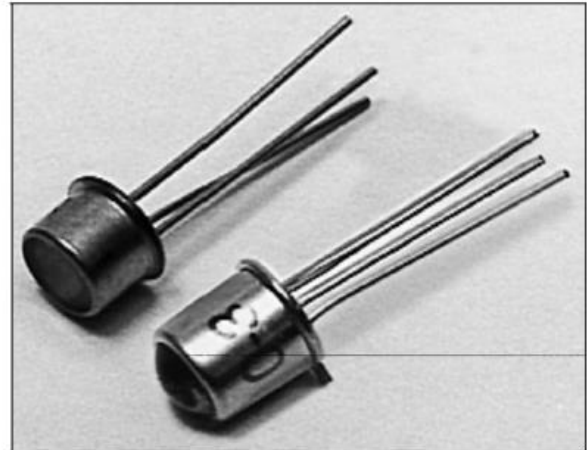
ANEXOS

SD3410/5410

Silicon Photodarlington

FEATURES

- TO-46 metal can package
- Choice of flat window or lensed package
- 90° or 12° (nominal) acceptance angle option
- Wide operating temperature range
(- 55°C to +125°C)
- Wide sensitivity ranges
- Mechanically and spectrally matched to
SE3450/5450, SE3455/5455 and SE3470/5470
infrared emitting diodes



INFRA-17.TIF

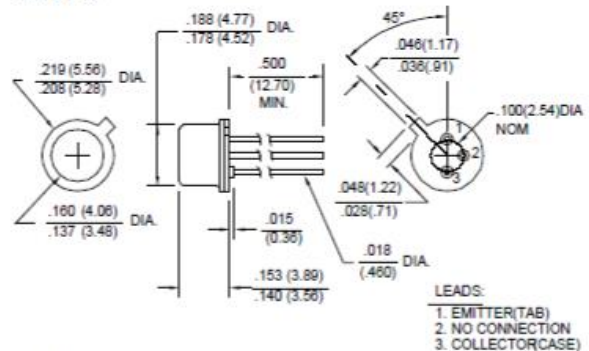
DESCRIPTION

The SD3410/5410 series consists of an NPN silicon photodarlington mounted in a TO-46 metal can package. The SD3410 has flat window cans providing a wide acceptance angle, while the SD5410 has glass lensed cans providing a narrow acceptance angle. The TO-46 packages are ideally suited for operation in hostile environments.

OUTLINE DIMENSIONS in inches (mm)

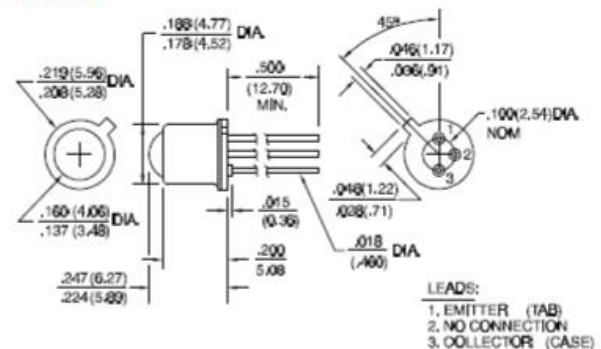
Tolerance	3 plc decimals	±0.005(0.12)
	2 plc decimals	±0.020(0.51)

SD3410



DIM_021.dwg

SD5410



DIM_21b.dwg

SD3410/5410

Silicon Photodarlington

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (25°C unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
Light Current SD3410-001 SD3410-002 SD3410-003 SD3410-004	I_L	0.6 2.0 4.0 8.0			mA	$V_{CE}=5\text{ V}$ $H=2\text{ mW/cm}^2$ (1)
Light Current SD5410-001 SD5410-002 SD5410-003	I_L	2.0 4.0 8.0			mA	$V_{CE}=5\text{ V}$ $H=0.2\text{ mW/cm}^2$ (1)
Collector Dark Current	I_{CEO}			250	nA	$V_{CE}=10\text{ V}$, $H=0$
Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{(BR)CEO}$	15			V	$I_C=100\text{ }\mu\text{A}$
Emitter-Collector Breakdown Voltage	$V_{(BR)ECO}$	5.0			V	$I_E=100\text{ }\mu\text{A}$
Collector-Emitter Saturation Voltage SD3410 SD5410	$V_{CE(sAT)}$			1.1	V	$I_C=1\text{ mA}$ $H=2\text{ mW/cm}^2$ $H=0.2\text{ mW/cm}^2$
Angular Response (2) SD3410 SD5410	$\emptyset$		90 12		degr.	$I_F=\text{Constant}$
Rise And Fall Time	t_r, t_f		75		μs	$V_{CC}=5\text{ V}$, $I_L=1\text{ mA}$ $R_L=100\text{ }\Omega$

Notes

1. The radiation source is a tungsten lamp operating at a color temperature of 2870°K.
2. Angular response is defined as the total included angle between the half sensitivity points.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

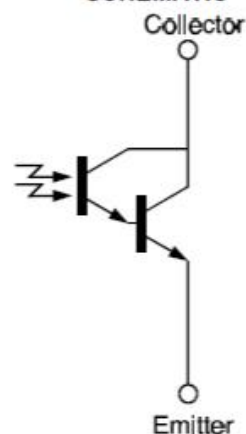
(25°C Free-Air Temperature unless otherwise noted)

Collector-Emitter Voltage	15 V
Emitter-Collector Voltage	5 V
Power Dissipation	150 mW (1)
Operating Temperature Range	-55°C to 125°C
Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Soldering Temperature (10 sec)	260°C

Notes

1. Derate linearly from 25°C free-air temperature at the rate of 1.43 mW/°C.

SCHEMATIC



Honeywell reserves the right to make changes in order to improve design and supply the best products possible.

Honeywell

SD3410/5410

Silicon Photodarlington

SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

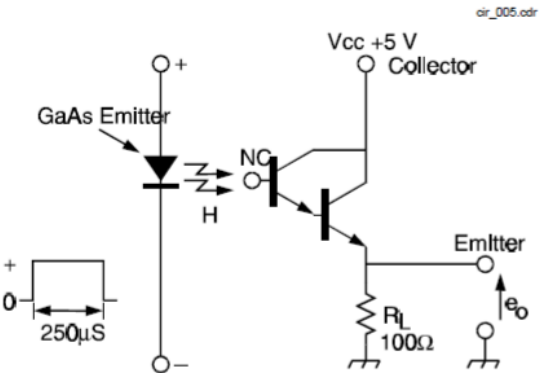


Fig. 1 Responsivity vs Angular Displacement (SD3410)

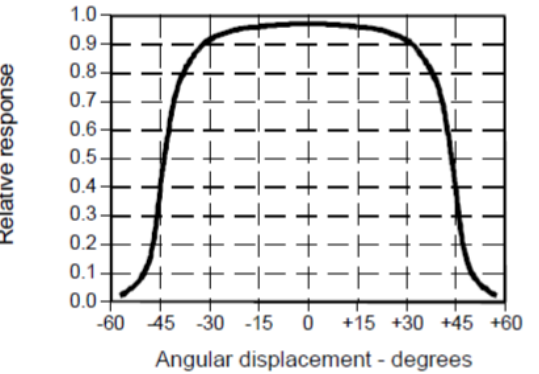
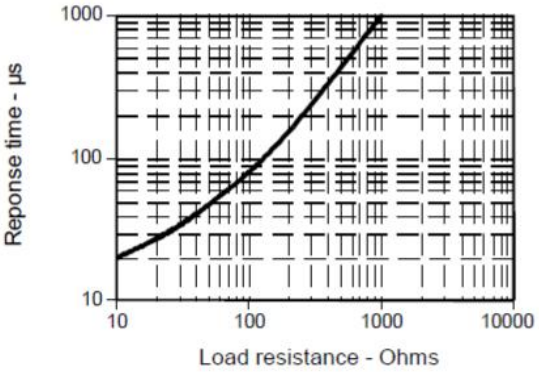


Fig. 3 Non-Saturated Switching Time vs Load Resistance



SWITCHING WAVEFORM

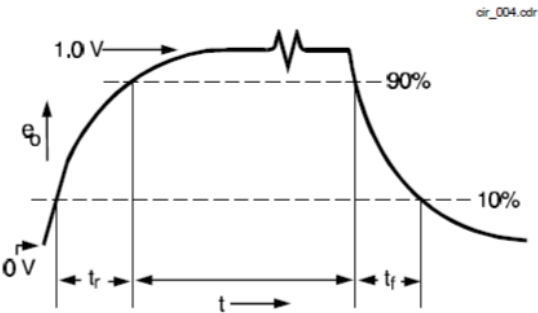


Fig. 2 Responsivity vs Angular Displacement (SD5410)

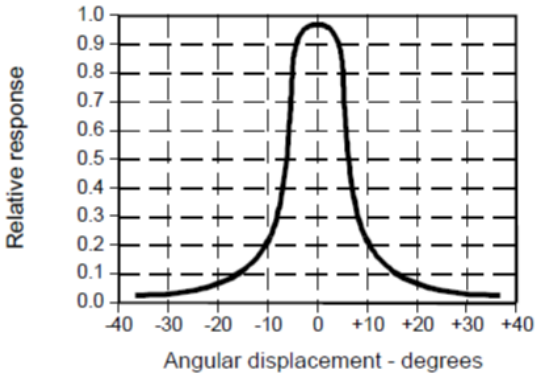
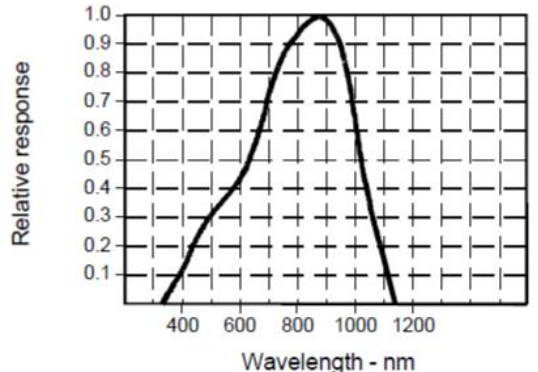


Fig. 4 Spectral Responsivity



All Performance Curves Show Typical Values