

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES (PPGEET)**

Dissertação de Mestrado em Sistemas de Comunicações Ópticas



JULIANA OLIVEIRA DE PAULA

**ANTENA DE FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA PARA
COMUNICAÇÕES POR LUZ VISÍVEL (VLC)**

NITERÓI

2021

JULIANA OLIVEIRA DE PAULA

**ANTENA DE FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA PARA
COMUNICAÇÕES POR LUZ VISÍVEL (VLC)**

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 título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Comunicações Ópticas.

Orientador:

Ricardo Marques Ribeiro

Co-orientador:

Vinícius N. H. Silva

NITERÓI

2021

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

D278a De paula, Juliana Oliveira
ANTENA DE FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA PARA COMUNICAÇÕES POR LUZ VISÍVEL (VLC) / Juliana Oliveira De paula ; Ricardo Marques Ribeiro, orientador ; Vinicius Nunes Henrique Silva, coorientador. Niterói, 2021.
109 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.14292318743>

1. Comunicação por luz visível. 2. Fibra óptica plástica. 3. Espalhamento. 4. Fluorescência. 5. Produção intelectual. I. Ribeiro, Ricardo Marques, orientador. II. Silva, Vinicius Nunes Henrique, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

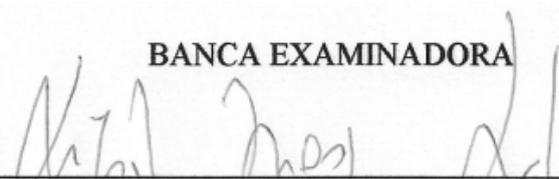
CDD -

JULIANA OLIVEIRA DE PAULA

ANTENA DE FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA PARA COMUNICAÇÕES POR LUZ VISÍVEL (VLC)

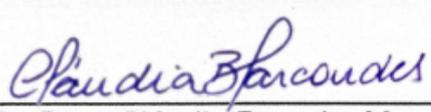
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Comunicações Ópticas.

BANCA EXAMINADORA


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


Prof. Dr. Vinícius Nunes Henrique Silva - Coorientador
Universidade Federal Fluminense - UFF


Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero
Universidade Federal Fluminense - UFF


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

NITERÓI

2021

*A minha família,
minha base,
minha vida*

Agradecimentos

Desde pequena fui muito espoleta, sempre procurando algo para fazer, e não podia ser qualquer coisa, tinha que ser algo que me despertasse a emoção. Então, escrevi um livrinho de poesia, fiz uma música, brinquei com miçangas, de pique- esconde, andei de bicicleta e patins, joguei video game, The Sims com o jogo salvo no disquete, enfim, tive a oportunidade de vivenciar as invenções e acompanhar as transições do século 21. Mas teve algo que nunca deixei de gostar, e que me acompanhou ao longo da minha jornada: o hábito de ouvir músicas, passando do rádio a pilha, pelo mp3, pelo mp4, pelo celular e hoje pela alexa e, em meus agradecimentos, não podia deixar de trazê-las aqui.

A Deus , "[Luz que me ilumina o caminho/E que me ajuda a seguir](#)"... e todos os momentos!

As minhas mães Rosana, Rosani e Guiomar... sim, são três mães, que me acolheram com todo amor do mundo aos meus 4 anos a pedido da minha falecida mãe e são a minha base, e ao meu avô Maurilio. Com eles sinto "[Como é grande o meu amor por você/ Nunca se esqueça, nem um segundo/ Que eu tenho o amor maior do mundo](#)";e eu sei que é recíproco! Obrigada por todo apoio, força, amor, pois mesmo diante às dificuldades nunca me deixaram desistir.

Aos meus amados amigos e companheiros de vida, Amanda, Camila, Celinha, Eliane, Jurema, Nilson, Michel, Luis Fernando, Nivea. A amizade nos alimenta, nos dá aconchego, são "[Lágrimas na vitória/ Sempre na derrota ou glória/ É luz na escuridão, Somos um só coração/ Sempre vivo na memória/ Faz parte da minha história, Nada vai nos separar/ A amizade é tudo!](#)"

A Ricardo Marques, meu orientador , inteligente, dedicado, calmo, apaixonado pelo que faz, que mediante os percalços deste último e difícil ano me incentivou a seguir em frente.A Claudia Barucke, Pablo Barbero e Vinicius Nunes, minha banca mais do que ilustre. Essa experiência no laboratório e na sala de aula foi marcante para a minha formação. Como foi bom contar com vocês nesta caminhada! Obrigada por multiplicarem saberes e ensinamentos que levarei para a minha vida, pois "[Pra que dividir sem raciocinar. Na vida é sempre bom multiplicar](#)".

A Gabriel, meu amor, companheiro, amigo, presente que a minha querida UFF me deu. “Foi só você chegar pra eu perceber/ Que o amor nasceu/ não tem jeito/ Com você meu mundo é perfeito”, obrigada por partilhar a vida comigo, me apoiar e me incentivar a atingir meus objetivos.

A Andréa, Claucy e Rafael, meus sogros e cunhado, minha segunda família, “Ainda bem/ Que agora encontrei vocês” obrigada por todo apoio e afeto

A Lorinho, que já não está mais nesse mundo, Chiquinho e Luna, os pets da minha vida, com vocês "o meu mundo fica mais completo". Nem toda riqueza deste mundo é comparável ao amor que vocês me dão e eu sinto por vocês.

E por fim, agradeço a mim, por ter conseguido concluir esta etapa tão importante da minha vida, não ter desistido, e “Deixo a minha fé guiar / Sei que um dia chego lá”

Resumo

Atualmente, as comunicações ópticas encontram-se concentradas, especialmente, na transferência de dados em meios confinados, como as fibras ópticas. Em busca de alternativas que mantenham os benefícios de transmissões de dados que as fibras ópticas proporcionam, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas, como as Comunicações Ópticas Sem-Fio, sendo uma opção que possui diversas vantagens se comparadas com algumas comunicações cabeadas e comunicações via rádio. Em consequência de uma alta demanda por banda, baixa probabilidade de interceptação, capilaridade, baixa latência e confiabilidade requeridas pelas tecnologias de Rede 5G e futuramente o 6G juntamente com a popularidade das IoT, torna-se cada vez mais atraente o uso das comunicações ópticas sem-fio. Dentro deste cenário, considerando o ambiente atmosférico, temos a Óptica no Espaço Livre (FSO- *Free-Space Optics*) e a tecnologia de Comunicação por Luz Visível (VLC- *Visible Light Communication*) que podem complementar as redes por RF.

Esta Dissertação está focada na tecnologia VLC aplicada a cenários domésticos como um *abat-jour* óptico que ilumina e transmite dados assim como também, aproveitando para iluminação/comunicações, as micro-lâmpadas a LED branco que podem ou já estão instaladas acima das poltronas de ônibus, trem, avião, não excluindo o uso simultâneo do Wi-Fi.

Mais especificamente, o objetivo deste trabalho é o de apresentar o desenvolvimento de uma “antena” óptica que poderá fazer parte de um receptor móvel VLC. O cenário em que deverá operar a “antena” óptica, consiste em um enlace VLC de curtas distâncias ($\sim 1\text{m}$), apenas em *downlink*, com relação a um transmissor óptico fixo. A “antena” óptica aqui apresentada consiste em duas versões básicas: pequeno segmento de fibra óptica plástica (POF) de PMMA funcionando com base no espalhamento de luz aumentado ou não, e nas POFs fluorescentes fabricadas em matriz de poliestireno dopado de modo a tornar-se uma fibra fluorescente. Nos dois casos, a POF era acoplada ao fotodiodo PIN de um medidor de potência óptica ou de um fotodetector com pré-amplificador de transimpedância. Além da construção das “antenas” ópticas em si, as principais contribuições foram em detalhes da referida construção no sentido de aumentar a eficiência (sensibilidade) do dispositivo. Todos os experimentos foram realizados com incidência de luz ortogonalmente ao eixo longitudinal da “antena” óptica qualificando-a para planificar o campo-de-visão em sistemas VLC, embora tais medidas não tenham sido aqui realizadas. Como uma última contribuição deste trabalho, é mostrado que as “antenas” ópticas fluorescentes podem operar com pelo menos com sinais modulados em tom senoidal de 10 MHz.

Palavras-chave: Comunicação por luz visível. Fibra óptica plástica. Espalhamento. Fluorescência

Abstract

Currently, optical communications are mainly focused on data transfer in confined media such as optical fibers. In search of alternatives that maintain the benefits of data transmissions that optical fibers provide, new technologies have been developed, such as Wireless Optical Communications, which is an option that has several advantages compared to some wired communications and radio communications. As a result of a high demand for bandwidth, low probability of interception, capillarity, low latency and reliability required by 5G Network technologies and in the future 6G together with the popularity of IoT, the use of optical communications without -thread. Within this scenario, considering the atmospheric environment, we have Free Space Optics (FSO-Free-Space Optics) and Visible Light Communication (VLC-Visible Light Communication) technology that can complement RF networks.

This dissertation is focused on VLC technology as applied to domestic scenarios such as an optical lampshade that illuminates and transmits data, as well as taking advantage of white LED micro-lamps that can or are already installed above the seats for lighting/communications. by bus, train, plane, not excluding simultaneous use of Wi-Fi.

More specifically, the objective of this work is to present the development of an optical “antenna” that could be part of a VLC mobile receiver. The scenario in which the optical “antenna” should operate consists of a VLC link with short distances ($\sim 1\text{m}$), only in downlink, with respect to a fixed optical transmitter. The optical "antenna" presented here consists of two basic versions: small segment of plastic optical fiber (POF) of PMMA working on the basis of increased light scattering or not, and fluorescent POFs manufactured in doped polystyrene matrix in order to become if a fluorescent fiber. In both cases, the POF was coupled to the PIN photodiode of an optical power meter or a photodetector with a transimpedance preamplifier. In addition to the construction of the optical “antennas” themselves, the main contributions were in the details of that construction in order to increase the efficiency (sensitivity) of the device. All experiments were performed with light incidence orthogonally to the longitudinal axis of the optical “antenna”, qualifying it to plan the field-of-view in VLC systems, although such measurements were not performed here. As a last contribution of this work, it is shown that fluorescent optical “antennas” can operate with at least 10 MHz sinusoidal modulated signals

Keywords: Visible Light Communication. Plastic Optical Fiber. Spreading. Fluorescence.

Lista de Figuras

Figura 1	Abat-Jour Óptico Para Downlink De Dados	3
Figura 2	Estrutura Bipolar De Um LED	6
Figura 3	Arquitetura E Design De Um LED de Encapsulamento Hemisférico Com Emissão Superficial (Sled – Surface Led)	7
Figura 4	{A} Absorção De Energia (B) Emissão Espontânea	7
Figura 5	Iluminação Pública Inteligente	9
Figura 6	Benefícios Iluminação Pública Inteligente	10
Figura 7	(A) Led Diemount.(B) Estrutura Externa Do LED Diemount	11
Figura 8	Micro-Refletor Parabólico Do LED	11
Figura 9	Leds De Alto Brilho Com Encapsulamento Hemisférico Transparente Emitindo Branco, Azul E Verde.	12
Figura 10	Frequências Utilizadas Por Dispositivos De Comunicação Rf Wireless	15
Figura 11	Enlace Óptico	17
Figura 12	Equipamento Para Enlace Fso Baseado Em Laser	17
Figura 13	Comparação Do Raio Da Abertura (Divergência) Do Sinal por Rf e FSO	19
Figura 14	Efeitos Atmosféricos Em Um Enlace Fso	19
Figura 15	Exemplo De Aplicação De Vlc Em Um Avião	22
Figura 16	Conexão Machine-Machine Em Diferentes Localidades	23
Figura 17	Conectividade E Mobilidade	24

Figura 18	Dispositivos Interconectados	25
Figura 19	Fotodiodo Pin	31
Figura 20	Estrutura Fotodiodo Apd	31
Figura 21	(A) Fototransistor If-D92 (B)Esquema De Circuito De Polarização If-D92	32
Figura 22	(A) Fototransistor If-D93 (B)Esquema De Circuito De Polarização If-D93	33
Figura 23	Metodologia De Trabalho	34
Figura 24	Deslocamento De Stokes	38
Figura 25	(A) Leds Alto-Brilho Branco Azul E (B)Dimensões De Um Led Hemisférico	39
Figura 26	Arquitetura E Design De Um LED De Encapsulamento Hemisférico	40
Figura 27	Ilustra O Processo De Emissão Espontânea Em Um Semicondutor	41
Figura 28	Foto Tirada Em Laboratório Do LED Azul Utilizado	43
Figura 29	(A) MPO (B) PDA	43
Figura 30	(A) Fotodiodos Modalidade Fotovoltaica (B) E Modalidade Fotocondutiva	45
Figura 31	Diagrama Esquemático Da Montagem Experimental Para Caracterizar Comparativamente Alguns Tipos De “Antenas Ópticas” Plásticas No Pior Caso Quanto A Linha-De-Visada, Ou Seja, Em 90° Com Relação A Reta Normal À Superfície Do Fotodiodo. O Retângulo Pontilhado Destaca A Pof-Antena	45
Figura 32	Incidência De Luz Num Ângulo Menor Que $\pi/2$	48
Figura 33	Fonte De Luz Dirigida Ao Fotodetector	49
Figura 34	“Antenas” Ópticas Fluorescentes Encapsuladas No Capilar De Vidro, De Vários Tamanhos	51
Figura 35	(A) “Antenas” De Pmma E De Pof Fluorescente E (B) Pmma	51
Figura 36	(A) A Pof Pmma Standard E A (B) Pof Fluorescente In Natura Modelo If-810087 Que Emite Luminescência No Vermelho	

	(Centrado Em 635 Nm). Ambas sem qualquer cobertura. Deve-Se Notar Que Naturalmente As Fibras Se Encurvam	52
Figura 37	Ferro De Soldar Com Lâmina Na Extremidade Utilizado Para Imprimir Ranhuras Superficiais “A Frio” Ou A “Quente” Na “Pof-Antena”	53
Figura 38	Foto De Uma Pof Pmma Com Ranhuras Superficiais Impressas À Frio	53
Figura 39	(A) Tubo Capilar (B) ”Antenas” Fpof In Natura Envoltas Pelo Capilar E (C) ”Antenas” Fpof Com Ranhuras Envoltas Pelo Capilar	54
Figura 40	(A) Fotos Do Superbonder Gel, Capilar De Vidro E "Antena" De Pof Fluorescente, (B)Esquema Da Segunda Melhoria Quanto A Interface Com A Antena Óptica Visando Reduzir Perda De Inserção	55
Figura 41	Montagem Experimental Que Conecta A Antena Óptica Encapsulada No Capilar Com Um Conector Fc Que Deve Ser Enroscado No Mpo Ou No Pda10. Deve-Se Notar A Emenda Utilizando Superbonder Gel Entre A Fpof E A Pof Pmma Que Conduz A Luz Até O Fotodiodo	56
Figura 42	Esquema Simplificado Da Montagem Experimental De Caracterização Óptica Estática (Sem Modulação) Das Antenas Ópticas	57
Figura 43	Um Zoom Na Foto Montagem Experimental Momentaneamente Configurada Para Enlaces Muito Curtos . Focando Na “Antena Óptica” Sem Encapsulamento Conectada Diretamente No Mpo E A Fonte De Luz	56
Figura 44	Medições Utilizando Led Branco (A) E Azul (B) Como Fontes De Transmissão Óptica	59
Figura 45	Enlace De Medições	59
Figura 46	Esquema Da Montagem Experimental Que Mostra Resposta Da Antena-Óptica Ao Tom Senoidal Em 10 Mhz Impresso Na Portadora Óptica No Azul De Um Led Diemount	60
Figura 47	Montagem Em Laboratório Mostrando Gerador De	

	Funções, Osciloscópio, Pda10 E “Antena-Óptica”	61
Figura 48	Curva P X L Para Tamanhos Variados De FPOFs	67

Lista de Tabelas

Tabela 1	Distâncias por Classificação de Alcance VLC	21
Tabela 2	Resultados comparativos do nível de sinal óptico Pout gerado pelas “antenas ópticas” a 10 cm de distância do LED azul emissor no Ciclo 1. Cada POF-antena possuía 5 cm de comprimento.	61
Tabela 3	Resultados comparativos do nível de sinal óptico Pout gerado pelas “antenas ópticas” FPOF-vermelhas a 10 cm de distância do LED azul emissor no Ciclo 2. As FPOFs-antenas possuem todas 5 cm de comprimento.	63
Tabela 4	Resultados Ciclo 3 - Diferentes tamanhos de FPOFs	64
Tabela 5	Resultados de experimentos com sinal óptico variando no tempo.	66

Lista de Abreviaturas e Siglas

APD	<i>Avalanche photodiode</i>
dBm	<i>Decibel Miliwatt</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LED	<i>Light-emitting diode</i>
Li-Fi	<i>Light Fidelity</i>
PN	<i>Junção Formada com Impurezas Receptoras e Doadoras</i>
POF	<i>Plastic optical fiber</i>
RF	<i>Radio frequency</i>
VLC	<i>Visible light communication</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 OBJETIVO	3
1.4 ROTEIRO PARA OS PRÓXIMOS CAPÍTULOS	4
CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 TECNOLOGIA DE DIODOS EMISSORES DE LUZ - LEDS	6
2.2.1 Princípio de funcionamento e características	8
2.2.2 Usos e Aplicações do LED em Iluminação	10
2.2.3 LEDs utilizados neste trabalho	10
2.3 COMUNICAÇÃO SEM FIO: GENERALIDADES E O WIFI	13
2.4 COMUNICAÇÃO ÓPTICA SEM FIO	16
2.5 COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL (VLC, LIFI)	19
2.6 INTERNET DAS COISAS (IOT), 5G E APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA VLC	22
2.7 FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS (POFS)	25
2.7.1 POFs (Generalidades)	25
2.7.2 Fluorescência e POFs fluorescentes	26
2.7.3 Espalhamento Mie e Rayleigh em POFs	27
2.8 “Antenas ópticas” para VLC	27
2.9 FOTODIODOS: PIN, FOTOTRANSISTOR, FOTODARLINGTON E APD	29
2.9.1 Fotodiodo PIN e Fotodiodo Avalanche	29
2.9.2 Fototransistor	31
2.9.3 Fotodarlington	32
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	33
3.1 INTRODUÇÃO	33
3.2 FONTES DE LUZ (LEDS):	34
3.3 FOTODETECTORES UTILIZADOS	42
3.4 “ANTENA ÓPTICA” BASEADA EM FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA	45
3.5 MONTAGENS EXPERIMENTAIS DE CARACTERIZAÇÃO	55
3.5.1 Introdução	55
3.5.2 Montagens experimentais de caracterização estática	56
3.5.3 Montagem experimental com tom senoidal acionando a fonte óptica	58
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES	61
4.1 INTRODUÇÃO	61

4.2 Resultados experimentais	62
4.2.1 Resultados Ciclo 1 de medidas	62
4.2.2 Resultados do Ciclo 2 de medidas	64
4.2.3 Ciclo 3 : Resultados das FPOFs de tamanhos variados nas mesmas condições do Ciclo 2	65
4.2.4 Resultados de experimentos com sinal óptico variando no tempo.	67
4.2.5 Discussão Geral	68
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
Referências	72
Apêndices	77
Artigo Publicado no Artigo Aceito no SBrT (Simpósio Brasileiro de Telecomunicações) 2021.	77
Artigo Publicado no MOMAG (Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica) 2020	80
Artigo Publicado na Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação - ENCOM 2021	83
Anexos	85
Datasheet IFD92	85
Datasheet IFD93	89
Datasheet LED Diemount	92

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A chegada da tecnologia 5G ao cenário mundial ocorreu em 2019 e teve como sua principal incentivadora a Coreia do Sul [1], que leva o título de primeiro país a lançar comercialmente essa tecnologia, ocupando atualmente o segundo lugar no ranking de maior velocidade de *download*. A Coreia do Sul destaca-se também em cobertura, pois 85 de suas 100 cidades cobrem o serviço. Entretanto não encontramos essa realidade em todos os países do mundo.

No Brasil, por exemplo, poucas operadoras iniciaram testes com o 5G e há um impasse político quanto à licitação do espectro eletromagnético, que promete ser o maior leilão de radiofrequências da história do país e está previsto para acontecer no segundo semestre de 2021, o que torna mais lento o processo de implementação dessa tecnologia. [2]

Dentro desse cenário de questões regulatórias e o fato do espectro eletromagnético na região de RF ser escasso, tem-se observado uma densificação de antenas para o estabelecimento das tradicionais redes Wi-Fi, com o consequente aumento da probabilidade de interferências e competição pela banda. Com isso, oportunidades para a utilização do Espectro de Luz em comunicações vem se intensificando.

Em face do exposto, o presente trabalho surge dentro dessa conjuntura de comunicação por luz visível. O fato do espectro de luz em que as Comunicações Ópticas em espaço livre operam não ser regulado oferece uma maior flexibilidade para se trabalhar quando comparada com o espectro da faixa de rádio, que é regulamentada como dito anteriormente. Adicionalmente, como mais um atrativo, as comunicações por luz são mais rápidas, têm maior banda e sigilosas se comparadas às comunicações em Radiofrequências (RF). Em alguns ambientes, como o uso do RF pode não ser permitido ou recomendável, a comunicação via luz pode entrar em cena. Entretanto, como um contra-ponto, comunicações via RF permitem mobilidade enquanto que com a luz esse quesito fica limitado.

1.2 MOTIVAÇÃO

Vivemos um fenômeno de constante mudança e evolução tecnológica, em que dispositivos em rede estão sendo incorporados em diversos segmentos de nossa rotina. São transformações que acontecem em grande velocidade e que provocam profundas modificações nas nossas formas de viver, pensar, ser e agir. Essa multiplicidade de dispositivos, sensores e equipamentos conectados em rede, no que se conhece por Internet das Coisas (IoT) causará um aumento na demanda por banda. Dessa forma, a tecnologia de Comunicações por Luz Visível ou VLC (*Visible Light Communications*), atualmente chamada de LiFi (Light Fidelity), torna-se interessante e tem sido bastante explorada nos últimos anos, sem o intuito de substituir o Wifi e, sim, complementá-lo.

Dessa forma, a tecnologia VLC ou Li-Fi é interessante de ser explorada. Mais especificamente, levando-se em conta as pesquisas em POFs que vêm sendo realizadas (inclusive no LaCOP/UFF), é aqui julgado relevante desenvolver sistemas, dispositivos e processos que promovam conexões ópticas em espaço livre entre terminais de redes-POFs (ou cabos metálicos) e dispositivos móveis como tablets e smartphones.

Tablets, smartphones e notebooks já contém embutido, câmeras de vídeo baseadas em detectores de imagens do tipo CCD [3] (Charge-Coupled Device, baseado na tecnologia CMOS) cuja “banda” é medida em taxa de transferência de *frames*. A ideia que vem sendo desenvolvida nos últimos poucos anos é a de aproveitar essas câmeras já existentes como um fotodetector “rápido” para enlace óptico de dados em *downlink* [4]. Uma outra vertente é que os dispositivos móveis sejam dotados de fotodetectores rápidos e que estes possam ter prolongamentos para capturar luz em diversos ângulos de incidência – “antena óptica”.

A motivação de desenvolver uma “antena óptica” plástica surgiu do interesse em buscar uma alternativa de como aproveitar a luz proveniente do LED que ilumina ambientes fechados para transmissão de dados, por exemplo, um *abat-jour* óptico que ao mesmo tempo ilumina, transmite dados, assim como a luz proveniente de seu assento do ônibus, avião ou trem. Então, a principal motivação nesta Dissertação, no que tange às aplicações reais, é na utilização de fotodetectores rápidos para *downlink* e LEDs para *uplink*, em dispositivos móveis. São inúmeras as possibilidades, sendo o Li-fi uma tecnologia promissora e muito atraente dentro do cenário de Internet das Coisas.

1.3 OBJETIVO

O objetivo desta Dissertação é desenvolver “antenas ópticas” a partir de fibras ópticas plásticas (POFs), com o intuito de melhorar a recepção de luz por parte de um dispositivo móvel dentro da tecnologia de Comunicações por Luz Visível (VLC) para distâncias de até 1m. Em última instância, o trabalho aqui apresentado lida com os dois problemas clássicos da tecnologia VLC: sensibilidade com banda e o desvanecimento devido à mobilidade.

A ideia de produto final seria a de termos um *Abat-jour* para VLC a partir de redes residenciais de POFs como esboçado na figura 1. A ideia também pode ser adaptada de forma que o *abat-jour* óptico fique fixo no teto (LED branco fixo, por exemplo) logo acima de uma poltrona do usuário dotado de algum dispositivo móvel. O referido usuário sentado na poltrona, pode estar dentro de uma ônibus, trem, barco ou avião.

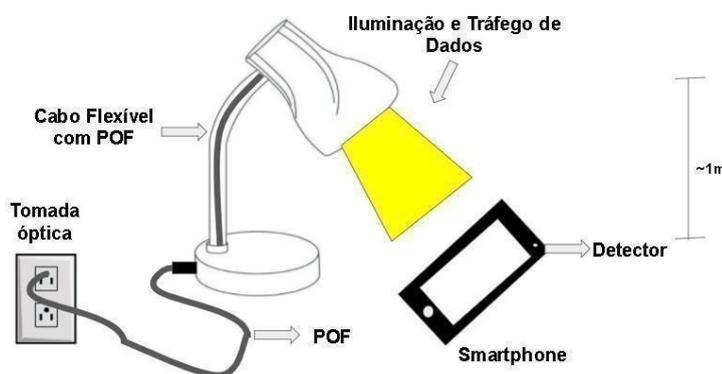


Figura 1: *Abat-Jour* óptico para *downlink* de dados

Deve se deixar claro que o objetivo central desta dissertação é a de desenvolver “antenas ópticas” baseadas em fibras plásticas dando especial atenção à sua sensibilidade com relação à incidência luminosa. O aspecto da banda das “antenas ópticas” é apresentado ao final do trabalho apenas com o intuito de mostrar a sua serventia para os enlaces VLC.

1.4 ROTEIRO PARA OS PRÓXIMOS CAPÍTULOS

O restante desta Dissertação está estruturado em 4 capítulos. No capítulo 1, temos a introdução ao trabalho. No Capítulo 2 há uma breve revisão bibliográfica dos principais assuntos e fundamentos teóricos que pautaram os experimentos. Em seguida, no Capítulo 3, o processo experimental é apresentado. No Capítulo 4, são mostrados os resultados e discussões. Por fim, o Capítulo 5 conclui a Dissertação, revisitando os principais pontos discutidos neste trabalho, destacando as principais contribuições e estabelecendo sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita uma breve revisão bibliográfica do referencial teórico para entendimento do presente trabalho. Este capítulo faz um passeio pelos componentes do bloco de transmissão, seguindo pelo meio de transmissão e, por fim, chegando no bloco de recepção dividindo-se em 8 partes, são elas:

2.2 Tecnologia de Diodo Emissores de Luz - LED

2.2.1 Princípio de funcionamento e características

2.2.2 Usos e Aplicações do LED em Iluminação

2.2.3 LEDs utilizados neste trabalho

2.3 Comunicação sem Fio

2.4 Comunicação Óptica sem Fio

2.5 Comunicação por Luz visível (VLC, LiFi)

2.6 Internet das Coisas (IoT), 5G e aplicações da Tecnologia VLC

2.7 Fibras Ópticas Plásticas (POFs)

2.7.1 POFs (generalidades)

2.7.2 Fluorescência e POFs fluorescentes

2.7.3 Espalhamento Mie em POFs

2.7.4 Espalhamento Rayleigh em POFs

2.8 Antenas ópticas para VLC

2.9 Fotodiodos: PIN, Fototransistor, Fotodarlington e APD

2.9.1 Fotodiodo PIN e Fotodiodo Avalanche

2.9.2 Fototransistor

2.9.3 Fotodarlington

2.2 TECNOLOGIA DE DIODOS EMISSORES DE LUZ - LEDS

Nesta seção serão apresentadas as principais características, princípio de funcionamento, vantagens, desvantagens, usos e aplicações aos Sistemas de Telecomunicações da fonte de transmissão de luz escolhida para o presente trabalho: o Diodo Emissor de Luz (LED: Light Emitting Diode).

2.2.1 Princípio de funcionamento e características

Criado em 1963 por Nick Holonyac, inicialmente somente na cor vermelha, o LED é um dispositivo semicondutor que tem a propriedade de transformar energia elétrica em luz, ou seja, emite luz em resposta à passagem de corrente elétrica [5]. A figura 2 representa estruturalmente o LED, destacando sua estrutura bipolar, os pólos anodo e catodo, cuja polarização elétrica influencia na passagem de corrente pelo seu circuito.

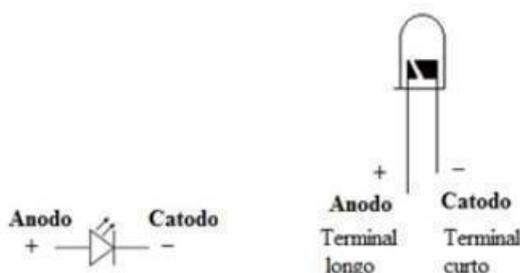


Figura 2: Estrutura bipolar de um LED[6]

Em termos técnicos, o LED constitui-se de um diodo de junção pn (ilustrado como exemplo no LED de encapsulamento hemisférico da figura 3), que após aplicação de uma tensão entre seus terminais, alguns elétrons saltam para um nível de energia maior. Depois disso, ocorre a recombinação dos pares elétrons e lacunas, ou seja, os elétrons voltam espontaneamente ao seu estado normal de energia, realizam transição dos elétrons de um estado de energia superior para um estado de energia inferior. Nesse processo, fótons, com energia equivalente à diferença entre os estados excitado e normal, são emitidos no que se chama de emissão espontânea.

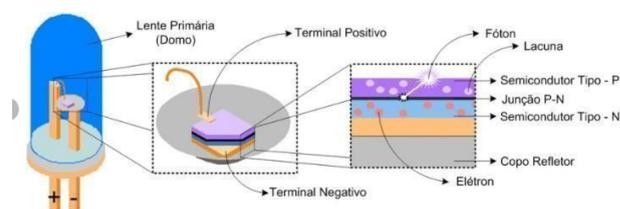


Figura 3: Arquitetura e design de um LED de encapsulamento hemisférico com emissão superficial (SLED – Surface LED). [7]

Esse processo de Absorção de energia e Emissão Espontânea pode ser visto nas figuras 4 (a) e (b), respectivamente.

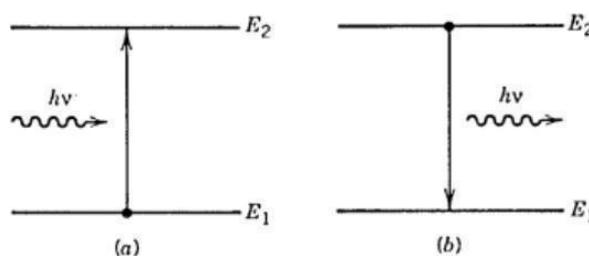


Figura 4: Absorção de energia (a) Emissão espontânea (b). [8]

Normalmente, os materiais absorvem a luz ao invés de emití-las. O processo de emissão é fortemente dependente do material semicondutor utilizado. Essa diferença de materiais pode fazer com que a perda de energia por parte dos elétrons e a emissão do fóton ocorra através de recombinação direta ou recombinação indireta entre a camada de condução e a camada de valência. A combinação de diferentes materiais, dopagens e estruturas semicondutoras permite criar LEDs emitindo em diversos comprimentos de onda.

Associa-se, frequentemente, o termo LED àqueles diodos que emitem luz visível, ou seja, operam no espectro de 750 nm (vermelho) a 420 nm (violeta) aproximadamente. Há também os chamados LEDs infravermelhos (Infrared LED - IR-LED), que operam na faixa superior a 800 nm, ou seja, não visível. Apresenta-se, a seguir, um breve histórico dos estudos e das descobertas que levaram aos LEDs de luz visível, foco deste trabalho.

Em 1907, o pesquisador inglês Henry J. Round, um dos assistentes do físico Guglielmo Marconi, relatou ter observado emissões de várias cores de luz visível, de forte brilho, a partir da região de um semicondutor próxima a um ponto de contato com metal. Esse

diodo era de carbeto de silício (SiC) ou carborundum. O fenômeno, observado pela primeira vez e relatado à época, é conhecido como eletroluminescência. Trata-se do princípio de funcionamento do LED que fora descrito acima, ou seja, a emissão de luz por um material em resposta a uma corrente elétrica que o atravessa (DUPUIS e KRAMES, 2008).[9]

2.2.2 Usos e Aplicações do LED em Iluminação

Os LEDs estão se tornando cada vez mais baratos, mais acessíveis, mais potentes e energeticamente eficientes. É por isso que os LEDs estão substituindo a iluminação convencional, em grande escala, em todo o mundo. A título de curiosidade, a cidade de Buenos Aires, capital da Argentina, é a primeira cidade latino-americana com iluminação pública totalmente em LED. O processo de substituição das lâmpadas de sódio da Cidade de Buenos Aires teve início em 2013 e resultou em uma economia de 50% do consumo energético.

A iluminação pública inteligente utiliza lâmpadas de LED que não necessitam de um reator para operar. Essa economia energética também ajudou a reduzir a emissão de dióxido de carbono, um composto químico gasoso que provoca graves desequilíbrios no planeta Terra, sendo o principal deles o efeito estufa. Outro benefício observado foi que com a melhora na iluminação, também aperfeiçoaram-se a visibilidade das câmeras de segurança, devido ao fato da luz branca ter favorecido o reconhecimento facial e a percepção correta das cores [10], além do baixo consumo de energia, os postes inteligentes captam informações de trânsito, clima e movimentação de pessoas.

Com a possibilidade do gerenciamento da iluminação ser centralizado, podendo ser monitorado à distância e em tempo real, houve a possibilidade de baixar ou subir a intensidade de cada emissor de luz individualmente, detectar falhas e programar reparações. Além disso, os LEDs possuem uma distribuição de luz mais eficiente, garantindo um foco em apenas uma direção, sendo que menos lâmpadas são necessárias para atingir o mesmo brilho de outras lâmpadas fluorescentes e incandescentes.

Ainda em termos de sustentabilidade, os tubos de LEDs são recicláveis e duram até seis vezes mais que qualquer outro tipo de iluminação, garantindo um menor gasto com lâmpadas, materiais de embalagem e transporte [11]. Todas essas transformações estão dentro do conceito atual de *Smart City*, Futuro Sustentável e Mobilidade Inteligente.

Em suma, alguns dos benefícios da Iluminação Pública inteligente são:

- Grande redução de custos de energia e manutenção.
- Maior segurança pública com iluminação melhorada.

- Tráfego mais seguro devido ao aumento da visibilidade.
- Impacto ambiental mensurável devido ao consumo reduzido de energia.
- Controles de semáforo.
- Estacionamentos inteligentes.
- Estações de carregamento de veículos elétricos (EV).
- Monitoramento ambiental (emissões, ruído).
- Segurança pública através de câmeras de vídeo.
- Gestão de tráfego.
- Possibilidade de conectividade de banda larga móvel.

A Figura 5 representa o conceito de Iluminação Inteligente e suas Possibilidades de uso e a Figura 6 , da empresa Intelilight, sintetiza os benefícios citados da *Smart Lighting* que tende a ser muito promissora, tendo grandes empresas como Philips e Signify investindo nesse ramo.



Figura 5 Iluminação Pública Inteligente. [12]

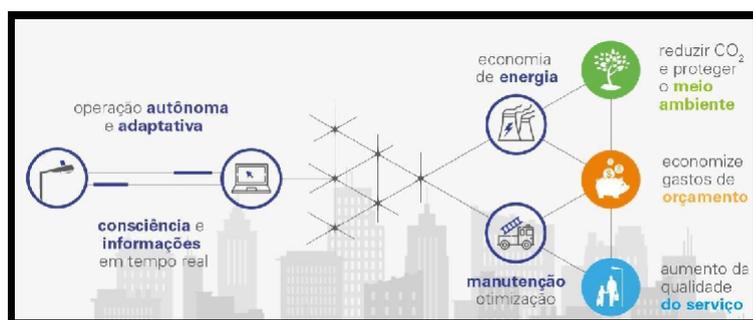


Figura 6 : Benefícios Iluminação Pública Inteligente.[13]

Neste estudo, não apenas os aspectos fundamentais da tecnologia serão discutidos, mas também os obstáculos técnicos que devem ser resolvidos. A tecnologia visa atender à necessidade crescente de economia de energia e transmissão de dados de rede em alta velocidade na última milha, aproveitando a onipresença da rede elétrica.

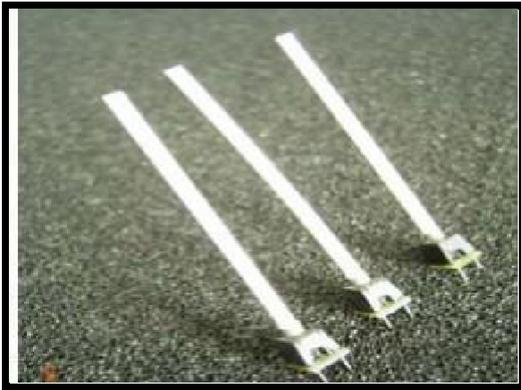
A próxima seção tem o intuito de apresentar os tipos de LEDs escolhidos para este trabalho. Devido às suas características, os LEDs podem ser eletricamente chaveados de forma rápida para produzir luz modulada em altas frequências, de dezenas a centenas de MHz, permitindo a transmissão de dados em alta velocidade.

2.2.3 LEDs utilizados neste trabalho

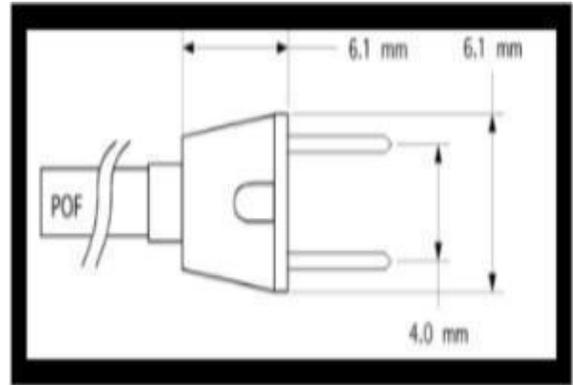
LEDs ultra-brilhantes foram os LEDs utilizados no presente trabalho, existindo os LEDs ultra-brilhantes que podem ser usados em comunicação de dados (através de POFs ou VLC), iluminação e em *outdoors* e os LEDs de baixa potência muito usados como sinalizador em circuitos eletrônicos e equipamentos. LEDs de visualização (display) são LEDs de baixa ou alta potência, porém de resposta lenta ou rápida em modulação. Já os LEDs de comunicações são LEDs de baixa potência, porém de resposta rápida em modulação. Em termos estruturais, LEDs ultra-brilhantes azuis e verdes basicamente são construídos a partir de estruturas semicondutoras baseadas na liga de InGaN em multi-poços quânticos enquanto que os LEDs de baixa potência são formados por hetero-estruturas (hetero-junções) semicondutoras.

Para a construção do enlace de luz (sem modulação) em espaço livre, neste estudo, dois tipos de LEDs ultra-brilhantes foram utilizados. Em um primeiro momento, o tipo de LED escolhido para compor o bloco de transmissão foi o LED Diemount (Figura 7(a) Azul (460 nm). A escolha do LED Diemount mostrou-se *a priori* ser vantajosa, primeiramente, devido a sua configuração estrutural cujo chip semicondutor está posicionado no foco de um micro-refletor parabólico, responsável pela alta eficiência de injeção de potência óptica e o

seu feixe de luz ser quase que colimado internamente. Sua estrutura pode ser vista na Figura 7 (b) e o micro-refletor parabólico na Figura 8, a seguir:



(a)



(b)

Figura 7: (a)LED Diemount.(b) Estrutura externa do LED Diemount [14]

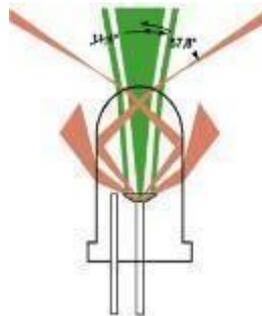


Figura 8 : Micro-refletor parabólico do LED [15]

Em uma segunda etapa de testes, o objetivo foi o de realizar medições utilizando uma fonte de luz com um feixe luminoso um pouco mais aberto, ou seja, de maior divergência. Foram utilizados LEDs de encapsulamento hemisférico (domo transparente) de alto-brilho branco, azul e verde. A Figura 9 ilustra os LEDs utilizados em emissão luminosa.



Figura 9: LEDs de Alto Brilho com Encapsulamento Hemisférico transparente emitindo branco, azul e verde.[16]

A escolha de se trabalhar com LED como fonte óptica foi muito vantajosa devido a sua longa vida útil, principalmente pelo fato de não emitir calor; custos baixos de implantação e manutenção reduzidos, devido à baixa complexidade do componente; o fato da utilização de baixa voltagem, não oferecendo risco; resistência a impactos; seu feixe luminoso não é prejudicial ao olho humano. Adicionalmente, conforme explicado anteriormente, LEDs brancos têm sido cada vez mais utilizados em iluminação e, como são moduláveis na faixa de MHz, podem simultaneamente transmitir dados.

Existem dois métodos para produzir luz de LED branca: fotoluminescência e mistura adicional de cores. Na Fotoluminescência LEDs azuis se tornam brancos. Esse procedimento é conhecido como o princípio da fotoluminescência. Nele, uma camada fina de fósforo luminescente é aplicada à parte superior do LED azul (chip semiconductor que emite azul). A luz azul que possui uma alta energia das ondas curtas do LED estimula a camada de fósforo a acender e ela emite luz amarela com baixa energia. Parte da luz azul é então transformada em luz branca. Esse tom da cor da luz branca pode variar com a medida do corante do fósforo luminescente. Diferentes tons de branco, como o branco quente, branco neutro ou branco frio são assim produzidos. O segundo processo para produzir luz de LED branca é baseado no princípio da mistura adicional de cores. Nele, a luz branca é produzida pela mistura das luzes vermelha, verde e azul (RGB) em diferentes comprimentos de cor.

2.3 COMUNICAÇÃO SEM FIO: GENERALIDADES E O WIFI

Quando falamos de Comunicação sem Fio, a primeira tecnologia que nos vem em mente é o Wireless Fidelity, popularmente conhecido como Wi-Fi. Redes sem fio possibilitam a transferência de dados sem vínculo a um meio físico confinante.

Na história das comunicações, o termo comunicação sem fio foi utilizado com dois significados distintos. Em um primeiro momento, em meados de 1920, o termo foi utilizado para definir o sistema que depois passou a ser chamado de rádio transmissor. Posteriormente, em meados de 1980, o termo ressurgiu sendo utilizado para qualquer tipo de tecnologia que fizesse comunicações sem utilizar fios [17].

Atualmente, em um cenário de constante evolução dos meios de comunicação, as comunicações sem fio são amplamente utilizadas em diversos dispositivos e contextos. Podemos citar como exemplo alguns tipos e aplicações de tecnologia sem fio, são eles (padrões):

- LTE
- LTE-advanced
- Wi-Fi
- Bluetooth
- Infravermelho
- Comunicações via Microondas
- Comunicações via Satélite
- Rádio Broadcast
- Comunicação Telefônica

- Assistente Pessoal Digital (PDA)
- Dispositivo GPS
- Controle automático de porta comum ou de porta de garagem
- Mouse sem fio
- ZigBee
- WiMax
- Rádio de comunicação entre aviões, navios e cidades
- Roteadores de redes internas empresariais

Algumas vantagens e desvantagens da utilização de Comunicação sem Fio em relação às com fio podem ser destacadas:

Vantagens

- Qualquer dado e informação podem ser transmitidos rapidamente e com alta velocidade.
- Manutenção e instalação de baixo custo.
- A internet pode ser acessada de qualquer lugar sem fio, desde que tenha sinal.
- Maior grau de mobilidade durante a comunicação.
- Capacidade de atender um maior número de usuários sem necessidade de mais equipamentos (no caso de uma comunicação com fio, seriam necessários mais cabos para mais usuários).

Desvantagens

- Uma pessoa desautorizada pode facilmente obter os dados sendo transmitidos através da captura dos sinais no ar. Por isso, é necessário o uso de tecnologias de encriptação dos dados transmitidos para manter o sigilo e proteção do que está sendo transmitido.
- Sinais de transmissão suscetíveis a interferência que estão além do controle do administrador da rede. A presença de meios materiais no caminho de propagação das ondas como metais e água, assim como a incidência na antena de outros sinais podem causar interferência na comunicação e ocasionar perda de dados.

- A velocidade de transmissão de dados de uma rede sem fio é menor do que a velocidade de uma rede com fio.
- O alcance do sinal pode ser insuficiente dependendo da distância que se quer cobrir. Quanto maior a distância, maior será o número de repetidores ou pontos de acesso que deverão ser utilizados.

A maioria dos dispositivos wireless faz uso das faixas de frequência chamada Faixa ISM (Industrial Scientific and Medical), cujo intervalo de frequências compreende as frequências de 2.400 kHz a 2.483,5 kHz, sendo os primeiros 2 MHz e os 3,5 MHz finais atuam como guarda de banda [18] No Brasil, o espectro ISM 2,4 GHz foi disposto em 11 canais de 22 MHz.. Diversos dispositivos de comunicação operam na faixa de transmissão de GHz, frequência que faz parte da ISM, como será visto mais adiante.

Como o nome diz, a faixa ISM são bandas reservadas internacionalmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico. Esse conjunto de faixas foi desvencilhado do espectro de frequências para uso livre sem a necessidade de licenciamento de utilização da frequência. Foi determinado por órgão regulador da área de telecomunicações e radiodifusão chamado International Telecommunication Union (ITU), o qual introduziu normas para limitação de potência de transmissão e técnicas de modulação dentro dessas faixas.

A banda ISM compõe parte do espectro de rádio que pode ser utilizada para basicamente qualquer propósito sem a necessidade de requerer licença na maioria dos países. A figura 10 mostra o espectro da Banda ISM, frequências que antes eram desperdiçadas e, atualmente, bastante difundidas nas telecomunicações. Podemos citar algumas aplicações dentro do espectro ISM, tais como, Telefone sem Fio e Forno de microondas. Bluetooth e Wi-Fi - 802.11b/g (2,4 GHz) e Wi-Fi - 802.11a/n/ac (5GHz).

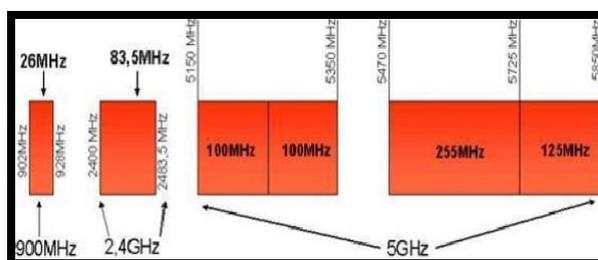


Figura 10: Frequências utilizadas por dispositivos de comunicação RF wireless [19]

Em suma, o espectro de frequência de 2,4GHz é de grande importância para as telecomunicações. É nele que operam diversas tecnologias de comunicação empregadas em diversos dispositivos que nos auxiliam no cotidiano, como os citados anteriormente Bluetooth e WIFI. As únicas restrições que estão associadas ao uso da ISM são relacionadas com a potência máxima transmitida e, naturalmente, com a largura de banda, que deve ser mantida dentro de certos limites.[20]

2.4 COMUNICAÇÃO ÓPTICA SEM FIO

Um enlace de comunicação Óptica sem fio constitui-se do bloco de transmissão e do bloco de recepção, tendo como portador da informação a luz com comunicação ponto a ponto. Com todo embasamento das seções anteriores, referente à densificação do espectro e o fato de que para esse sistema de comunicação não se torna necessário o licenciamento ou reserva de espectros de frequência ou até mesmo o fracionamento do espectro de frequência com outros serviços, verificou-se uma maior importância aos meios de comunicação Óptico sem fio. Visando oferecer disponibilidade a todo o momento e com velocidades de transmissão cada vez maiores, apresentando-se como alternativa promissora.

Os sistemas ópticos que utilizam o espaço livre como meio de comunicação, sistemas FSO (Free Space Optics) podem funcionar para distâncias de diversos quilômetros. O enlace terá melhor desempenho, ou mesmo só poderá operar quando não houver obstáculo entre os transceptores. A potência transmitida, por exemplo, por uma fonte óptica com tecnologia laser e a sensibilidade do receptor são dois parâmetros importantes para determinar o comprimento de um enlace entre os transceptores medidos através da taxa de bit de erros (BER).[21] A figura 11 representa um exemplo de um enlace óptico ponto a ponto entre dois prédios, os feixes de luz que compõem o enlace utilizam comprimentos de onda de 850 a 1550 nm, faixa padronizada pela ITU-T para o segmento de telecomunicações.



Figura 11: Enlace Óptico [22]

A tecnologia FSO pode empregar feixes de laser ou LED, com determinado comprimento de onda e potência, para estabelecer a comunicação entre dois pontos distantes. A figura 12 mostra um equipamento usado em enlaces FSO baseado em laser.



Figura 12: Equipamento para Enlace FSO baseado em Laser [23]

Além das altas velocidades de transmissão de dados, os meios ópticos (FSO) apresentam outros atrativos e vantagens para serem utilizados, destacam-se também seu uso comparativamente à radiofrequência como:[24]

- Amplo espectro de frequências disponível em oposição ao espectro de rádio que é relativamente pequeno, sem restrições de uso, precificação ou regulamentação, não havendo necessidade de licença.

- São inofensivos aos olhos e não causam efeitos biológicos. Depende, na realidade, do caminho seguido pelo feixe, potência média e comprimento de onda.
- Imunidade eletromagnética.
- Não causam interferências a outros meios de comunicação e/ou equipamentos, é extremamente difícil ocorrer interceptação tornando-se assim uma tecnologia bastante segura.
- Enlaces de comunicação extremamente privados, seguros (não atravessam paredes) e direcionáveis.
- Consomem significativamente menos energia, comparativamente aos dispositivos de rádio, devido a maior diretividade dos feixes.
- É de fácil atualização e suas interfaces abertas suportam equipamentos de uma variedade de fabricantes. Isso ajuda empresas e fornecedores a proteger seus investimentos nas estruturas de telecomunicações.
- Os enlaces podem ser facilmente instalados.
- Os produtos relacionados ao FSO podem ser integrados às soluções convencionais já existentes baseadas em sistemas de fios, facilitando o acesso às redes ópticas.

Em termos visuais, a figura 13 nos traz um comparativo interessante do raio da abertura de alcance do sinal por RF e FSO.

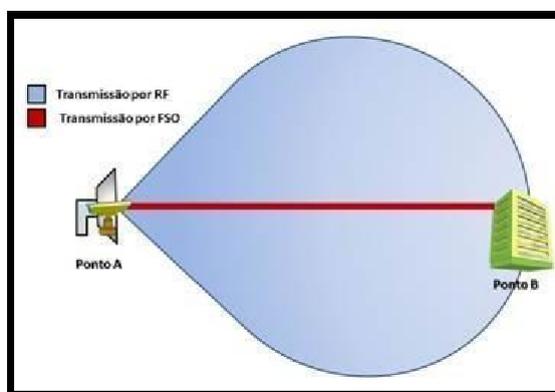


Figura 13: Comparação do raio da abertura (divergência) do sinal por RF e FSO[25]

Uma observação a destacar se refere ao fato de que um sinal óptico não pode atravessar uma parede, porém para determinadas aplicações se torna uma desvantagem essa limitação de mobilidade. Outra vulnerabilidade desse sistema seria a sensibilidade quanto aos fenômenos atmosféricos que podem causar atenuação e limitar o alcance e disponibilidade desse sistema, como mostrado na Figura 14.

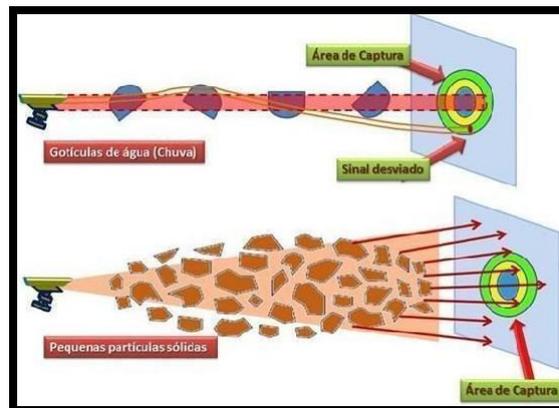


Figura 14: Efeitos atmosféricos em um enlace FSO [26]

Fazendo uma ligação com a Internet das Coisas e a Comunicação Óptica sem fio, temos o termo Light Fidelity ou Li-Fi em que há comunicação por luz visível. Esta última pode ser uma tecnologia que sirva de base à Internet das Coisas, tendo como pontos de acessos Diodos Emissores de Luz (LEDs), tema que será discutido nas próximas seções, sendo central para a presente Dissertação.

2.5 COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL (VLC, LIFI)

A razão do interesse crescente no VLC se concentra no fato de se utilizar a luz visível para transmitir dados. Isso significa aproveitar, por exemplo, luz ambiente de salas, semáforos e postes de luz para transmissão de dados através de uma portadora óptica cuja capacidade é potencialmente maior que portadoras no espectro de radiofrequência (RF). Em algumas aplicações específicas, como hospitais ou locais em que interferências de RF são um problema, o LiFi se apresenta como uma solução bastante interessante para comunicação de dados [27].

Como visto na seção anterior, o FSO tradicional consiste na transmissão óptica sem fio através da atmosfera ou ambiente submarino, utilizando transmissores ópticos a laser. Este trabalho se restringe aos enlaces ópticos livres de muito curta distância, empregando fontes LED nos transmissores ópticos. Em particular, as distâncias envolvidas ficam em torno de 1m. Em suma, em relação à segurança, o FSO é um sistema muito seguro, que não sofre interferência eletromagnética e nem polui o espectro de RF. Apresenta vantagens também em relação à capacidade, eficiência e disponibilidade, seu custo é baixo se comparado a outras tecnologias, como enlace de rádios e fibra óptica, visto que para esse sistema não se torna necessário o licenciamento ou reserva de espectros de frequência.

A principal desvantagem da comunicação óptica em espaço livre é o fato de perder metade da potência por km (3 dB/km em tempo bom). A perda de potência é maior e pode se tornar um problema em condições climáticas ruins, como chuva forte, névoa ou neve. Sendo assim, levando-se em conta as pesquisas em POFs que vêm sendo realizadas, é aqui julgado relevante desenvolver sistemas, dispositivos e processos que promovam conexões ópticas em espaço livre entre terminais de redes-POFs ou cabos metálicos e dispositivos móveis como tablets, smartphones ou notebooks.

As requisições em massa de conexões que eventualmente não poderão ser atendidas por enlaces de rádio devido à limitação na disponibilidade do espectro eletromagnético, problemas de interferência, banda requerida na faixa de Gb/s para cada dispositivo, etc, poderão ser atendidas em conjunto através de um sistema VLC. [28] O VLC (Visible Light Communication) é uma modalidade de comunicação sem fio onde se utiliza a porção de luz visível do espectro eletromagnético para modular os dados. A porção do espectro compreende tipicamente a faixa de comprimento de onda dos 380 nm a 780 nm. Fato que garante maior largura de banda de transmissão. Essa tecnologia se torna interessante, pois se pode agregar o uso das lâmpadas LED, que são energeticamente eficientes, para a alta taxa de envio de dados na faixa de dezenas até centenas de MHz. Esta última será inviável com o uso de lâmpadas incandescentes ou fluorescentes.

Um enlace VLC não é afetado pela turbulência atmosférica ou submarina, como os sistemas FSO (Free Space Optics) atmosféricos ou aquáticos, respectivamente [29]. Porém, a VLC é afetada pela mobilidade de pelo menos um dos dispositivos envolvidos. Adicionalmente, a VLC (*indoor*) mais do que o FSO tradicional (*outdoor*), é mais afetada pelos requisitos de segurança ocular, o que implica em princípio na utilização quase que obrigatória de LEDs, que serão tratados na próxima seção, ao invés de LDs (*Laser Diodes*) como fonte óptica. [30]

No VLC, as transmissões podem ocorrer em uma linha de visão (Line-of-Sight) ou através da utilização de reflexões do sinal para alcançar o receptor localizado fora da linha visão (Non-Line-of-Sight). Em relação à distância do link, podemos destacar os seguintes tipos: Alcance Ultra Pequeno (Ultra-Short Range), Pequeno Alcance (Short Range), Médio Alcance (Medium Range), Longo Alcance (Long Range), Alcance Ultra e o Longo (Ultra-Long Range). Sumariamente, a quantificação em metros ou centímetros e exemplo dessas classificações quanto ao alcance dos enlaces VLC podem ser vistos na Tabela 1 [31]:

Classificação Alcance VLC	Distância	Exemplo de aplicação
Alcance Ultra Pequeno (Ultra-Short Range)	Ordem de milímetros	Transferência de dados dentro de circuitos integrados e circuitos impressos. A nível de Chip.
Pequeno Alcance (Short Range)	Ordem de centímetros e em geral < 1m	Rede Wireless Personal Access Networks (WPAN) e Rede Wireless Body Access Networks (WBAN).
Médio Alcance (Medium Range)	Ordem de metros, e em geral < 10 m	Comunicação indoor , WLAN assim como o Wi-Fi.
Longo Alcance (Long Range)	Ordem dos quilômetros, porém não mais do que 10 Km	Redes Wireless Metropolitan Access Networks (WMAN) que estão sendo desenvolvidas usando FSO.
Alcance Ultra e o Longo (Ultra- Long Range)	Ordem das dezenas de milhares de quilômetros	Comunicação entre Satélites.

Nesse contexto, este trabalho supõe como cenário de aplicação real, um enlace VLC entre um transmissor óptico fixo a LED, posicionado em até cerca de 1m de distância de um receptor óptico móvel. Ou seja, um enlace classificado como de Pequeno Alcance (Short Range). Pode se pensar como um cenário de aplicação um usuário dotado de algum dispositivo móvel sentado em uma poltrona em um meio de transporte, ônibus, trem, barco ou avião e ela sendo iluminada por um ponto de LED fixo no teto ilustrado na figura 15 .



Figura 15 Exemplo de aplicação de VLC em um avião.[32]

2.6 INTERNET DAS COISAS (IOT), 5G E APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA VLC

A popularização e a consequente densificação de dispositivos móveis é um fenômeno mundial. Muitas das novas tecnologias de comunicação sem fio vêm sendo desenvolvidas atualmente para criar alternativas de comunicação para os dispositivos presentes na Internet das Coisas, “onde todo e qualquer dispositivo terá conectividade e processamento”. Dispositivos comuns (televisão, forno de microondas, geladeira, veículos, etc.) passam a representar nós na rede, exigindo ainda mais recursos, seja dos próprios dispositivos ou seja, da infraestrutura de rede de suporte”. [33]

Nesse cenário de IoT, as aplicações VLC entram em cena como uma vantagem alternativa de complementar o WiFi e devido à demanda de altas velocidades (taxas) que esses recursos exigem, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para que o VLC seja integrado ao 5G.

O 5G já opera em alguns países do mundo, no caso do Brasil existem muitas dificuldades de implementação e a ansiedade de usufruir de altas velocidades. A tecnologia promete um tráfego de dados 10 vezes mais rápido se comparado com o atual, uma latência bem menor e uma capacidade maior de conectar dispositivos, sendo extremamente atraente para futuras possibilidades de interação para a Internet das Coisas, a qual exige a necessidade de uma rede que suporte a interação de milhões-bilhões de dispositivos. Entraremos brevemente no tema Internet das Coisas, iniciando com um contexto histórico. A história da Internet pode ser dividida em três gerações:

1 Internet das máquinas

Foi por volta da década de 60, em que tivemos o início das conexões Máquina-Máquina (M2M, Machine-to-Machine), como mostrado na Figura 16 duas máquinas em diferentes localidades conectadas, otimizando e integrando processos, e estabelecendo novas configurações na relação homem-máquina.

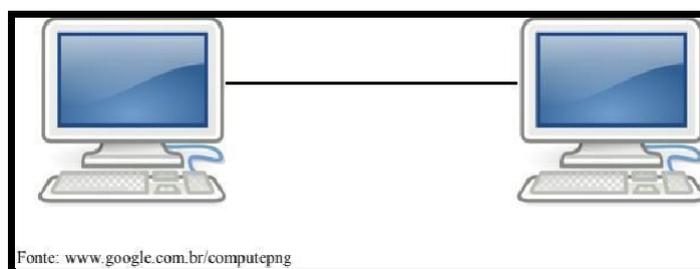


Figura 16: Conexão machine-machine em diferentes localidades [34]

Muitos estudos foram desenvolvidos para que essa rede, que inicialmente ligava poucos computadores, pudesse ter um âmbito global e perdesse a característica engessada em relação à mobilidade.

2 Internet das pessoas

No final da década de 90 veio o surgimento dos *smartphones* e ao longo dos anos uma rápida disseminação dos dispositivos móveis, conectados à Internet revolucionou a forma de comunicação entre indivíduos, rompendo fronteiras, promovendo mobilidade permitindo que o usuário pudesse ter acesso à informação de qualquer lugar, integrando-o à tecnologia digital, como ilustrado na Figura 17.



Figura 17: Conectividade e mobilidade [35]

3 Internet das coisas

O termo Internet das Coisas remonta aos anos 2000 e se refere à interconexão digital de objetos do cotidiano com a Internet, uma conexão dos objetos mais do que das pessoas, tratando-se de uma rede de objetos físicos veículos, prédios e outros dotados de tecnologia embarcada, sensores e conexão com a rede capaz de reunir e de transmitir dados [36]. O primeiro dispositivo desenvolvido utilizando esse conceito foi uma torradeira conectada a um computador com rede TCP/IP. Atualmente, existem dispositivos que vão desde computadores, smartphones, smartwatches, chegando nas assistentes virtuais, como a Alexa da Amazon em que através de comando de voz é possível controlar tomadas, luminárias ou qualquer outro objeto conectado na rede, tornando sua casa uma verdadeira casa conectada. Esse fenômeno em que conectamos objetos dá-se o nome de Internet das Coisas (Internet of Things -IoT).

Segundo Lemos; Marques (2019, p. 2): [37]

A Internet das Coisas (IoT) é uma rede de objetos relativamente autônomos cujas ações interferem diretamente nos espaços públicos, no lar ou no corpo, seja com os atuais projetos de cidades inteligentes (smart cities), casas inteligentes (smart home), ou objetos vestíveis (wearables). Desde a definição do tipo de dado captado pelos sensores, passando por suas formas de circulação e armazenamento, pelo compartilhamento com empresas parceiras, pela relação com outros dados em bancos de dados e pela interface de configuração de preferências pessoais.

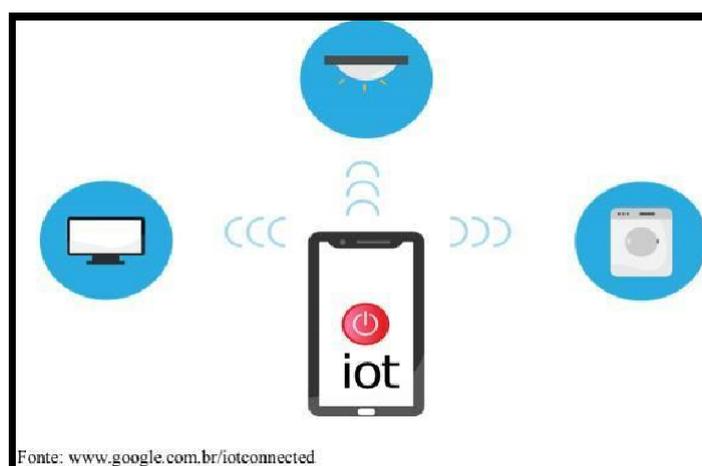


Figura 18 : Dispositivos interconectados [38]

Como consequência dessa crescente integração de dispositivos, ilustrado na figura 18, sensores e equipamentos conectados na rede causam um aumento de demanda por banda larga. Dessa forma, busca-se melhorar a capacidade de transmissão. Então a tecnologia 5G apresenta-se bastante interessante.

2.7 FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS (POFS)

2.7.1 POFs (Generalidades)

O bloco de recepção dos experimentos, será descrito nos Capítulos 3 e 4 (parte central do trabalho) é composto por um segmento de Fibra Óptica Plástica (POF), cujo núcleo é constituído pelo polimetilmetacrilato, o PMMA, permitindo uma maior resistência mecânica, uma maior flexibilidade, de mais fácil clivagem e manipulação. Seu custo de fabricação e manutenção se comparado, por exemplo, à GOF (Fibra Óptica de Sílica), é menos oneroso, porém em termos de transmissão a longas distâncias é menos eficiente. Sabe-se da teoria e da prática que o índice de refração em um polímero, dependendo do polímero, é mais alto que o da sílica, por exemplo. A atenuação do PMMA é maior que da sílica devido a maior absorção intrínseca, espalhamento e absorção por impurezas, principalmente. Comparando-se com cabeamentos de cobre, a qualidade é bem superior. E a tendência é um aumento em suas aplicações em enlaces curtos, como redes internas de pequenas empresas ou redes domésticas.

Algumas das características que tornam as POFs de certa forma atraentes e valem ser destacadas encontram-se abaixo:

- As POFs são leves e de fácil manuseio.
- São de fácil acoplamento devido ao seu grande núcleo.
- A densidade do plástico típico é a metade (1/2) do vidro e um terço (1/3) do cobre.
- POFs operam no visível (VIS) e infravermelho-próximo (NIR).
- São bastante flexíveis ao serem manipuladas, e não quebram com a mesma facilidade que as fibras de sílica.
- As POFs são bastante resistentes a danos mecânicos, mesmo em sua extremidade.
- Resistente ao cisalhamento.
- As POFs não apresentam riscos em sua manipulação embora haja restrições quanto à biocompatibilidade.
- As POFs são iguais ou menores em diâmetro do que um cabo metálico típico.
- As POFs mais comuns possuem 1 mm de diâmetro.
- As POFs são iguais ou menores em diâmetro do que um cabo metálico típico.
- Mantém uma grande flexibilidade mesmo em maiores diâmetros (1 mm), o que não acontece com as fibras de sílica que se tornam rígidas. Assim como os cabos de cobre que são razoavelmente rígidos.

- Cabos metálicos podem causar corte no operador. Assim como fragmentos de fibra de sílica podem espetar e penetrar na pele e unhas, podendo entrar na corrente sanguínea e atingir os olhos.

- O segundo tipo de Fibra utilizada foi a POF de poliestireno fluorescente que será apresentada a seguir.

2.7.2 Fluorescência e POFs fluorescentes

A fluorescência (“rápida”) juntamente com a fosforescência (“lenta”) formam dois casos especiais da chamada luminescência, fenômeno em que há emissão da luz, quando átomos absorvem parte da energia proveniente de alguma fonte externa, reemitindo-a na forma de luz visível ou infravermelho, por exemplo. A luz proveniente de um LED de alta faz com que uma POF dopada emita luz numa banda espectral. A fosforescência acontece quando uma substância é capaz de absorver a luz produzida por alguma fonte externa, reemitindo-a em forma de luz visível, mesmo após a interrupção da iluminação, tratando-se então de um mecanismo “lento”. As substâncias desse tipo continuam a emitir um brilho fraco por intervalos de tempo variados. As substâncias fluorescentes emitem luz somente enquanto estão recebendo energia de alguma fonte externa. Dessa forma, quando a fonte de energia cessa, o processo de fluorescência é interrompido “imediatamente”. Ao longo de sua transmissão a luz é absorvida e reabsorvida pela fibra. Esse processo de absorção e reabsorção provoca a conversão do comprimento de onda do feixe emitido.

As POF fluorescentes são feitas através da dopagem da fibra com um determinado tipo de corante, podem ser verdes, vermelhas e amarelas. Dependendo de sua dopagem, o feixe pode ser absorvido em maior ou menor quantidade e, além disso, dependendo de seu comprimento, o feixe pode ser reabsorvido mais de uma vez, ou seja, ao longo de sua transmissão a luz é absorvida e reabsorvida pela fibra. Esse processo de absorção e reabsorção provoca a conversão do comprimento de onda do feixe emitido. Atualmente são comercializadas fibras com diferentes tipos de corantes e diversas cores. As características dessa dopagem, como o dopante em si, co-dopantes e concentração de cada um, irão influenciar na propagação do feixe de luz dentro da fibra. Particularmente, as FPOFs utilizadas neste trabalho (fabricadas pela Saint-Gobain (France) e comercializadas pela Industrial Fiber Optics (USA) são dopadas com corante vermelho, cuja composição não foi divulgada por seu fabricante, mas em geral utilizam-se como corantes, tais como Rhodamina 6G, Peryleno, Pyrometheno. A FPOF utilizada possui abertura numérica de 0,58, 1 mm de diâmetro com núcleo de poliestireno com 1,6 de índice de refração e 0,9 mm de diâmetro e é envolta por um fino revestimento acrílico tendo pico de fluorescência centrado em 635 nm.[39]

2.7.3 Espalhamento Mie e Rayleigh em POFs

Em Fibras Ópticas, diversos são os mecanismos que contribuem para a atenuação do sinal óptico a medida que se propagam: absorção pelo material-matriz e impurezas, espalhamentos do sinal, atenuações em emendas e conexões, perdas por acoplamento no início e final da fibra, irradiação devido curvaturas na fibra, perdas por microcurvaturas e também por modos vazantes. O fenômeno de espalhamento é de interesse do presente trabalho, especificamente o espalhamento Mie e o de Rayleigh.

No cenário de perdas devido ao espalhamento, temos reduções na amplitude do campo guiado por mudanças na direção de propagação, causadas pelo próprio material e por imperfeições no núcleo da fibra. Em suma, as perdas por espalhamento ocorrem em função do desvio da luz em diferentes direções.

O espalhamento Mie se caracteriza como sendo um espalhamento linear, assim como o espalhamento Rayleigh. Um espalhamento linear caracteriza-se como a transferência de uma parcela da luz de um modo de propagação para outros modos, quando a quantidade de energia transferida for diretamente proporcional à potência da luz guiada.

Pode citar-se como algumas das principais causas do espalhamento Mie, as flutuações térmicas, pequenas bolhas e variações no perfil de índice de refração. O espalhamento Rayleigh é o mais importante e resulta de irregularidades sub-microscópicas na composição e densidade do material, resultando em uma flutuação no valor do índice de refração do material ao longo da fibra. Essas irregularidades são bem pequenas quando comparadas ao comprimento de onda de transmissão. Em comparação, o espalhamento Mie pode ser observado quando as irregularidades da fibra têm dimensões comparáveis (ou maior que) ao comprimento de onda da luz guiada, por exemplo, quando são superiores a 10/100 do comprimento de onda do feixe óptico. As irregularidades que causam espalhamento Mie em uma fibra são bolhas, excentricidades do núcleo, minúsculos defeitos na interface do núcleo com a casca, variações no diâmetro da fibra, e sinuosidades no eixo conhecidas como microcurvaturas.

2.8 “Antenas ópticas” para VLC

Tradicionalmente, o termo antena consiste em um dispositivo transdutor construído com materiais condutores com a função de converter corrente aplicada em ondas eletromagnéticas, quando no modo de transmissão ou quando no modo de recepção, captura ondas eletromagnéticas realizando o inverso, ou seja, gera corrente elétrica que é entregue à carga. Deve notar-se que uma antena pode operar nos modos de transmissão e recepção simultaneamente. As antenas têm sua operação na faixa das radiofrequências e comumente são aplicadas em radares, redes de comunicações sem fio em geral e serviços de rádio e televisão.

É bem sabido que uma antena dipolo exibe uma máxima eficiência de conversão quando o seu tamanho físico for igual a $\lambda/2$. Seguindo este raciocínio, uma verdadeira antena óptica deverá ter dimensões nanométricas, capaz de realizar conversões de forma direta das ondas luminosas. O desenvolvimento das chamadas nanoantenas, é um tema de pesquisas em andamento na atualidade (2021), mas deve-se deixar claro que nesta Dissertação, o termo “antena óptica” possui um significado diferente. Dentro desta linha diversos trabalhos foram desenvolvidos ao longo dos anos, destacando-se o trabalho de Detecção luminescente para comunicação óptica no espaço livre [40] e o trabalho Desenvolvimento de Antena fluorescente de amplo campo de visão para comunicações de luz visível além do limite *étendue* [41]. Onde ambos abordam a comunicação óptica em espaço livre. O primeiro mostra que materiais fluorescentes podem ser usados para aumentar a área ativa de um fotodiodo em ordens de magnitude, mantendo seu tempo de resposta curto e aumentando seu campo de visão e o segundo mostram a construção de uma nova categoria de antenas ópticas fluorescentes simples e baratas para VLC produzidas com corante Coumarin 6 (Cm6) capazes de ter um aumento de ganho aliado com um amplo campo de visão e mostrando que essas antenas baratas e finas, poderiam ser facilmente incorporadas em telefones celulares, tablets, computadores e até mesmo em roupas para permitir uma comunicação móvel rápida.

Qualquer sistema de comunicações ópticas deve utilizar na recepção algum tipo de fotodetector. No presente caso, fotodiodos do tipo PIN, fototransistor, fotoDarlington ou em avalanche (APD), são os mais utilizados. Quanto maior a banda requerida, maior terá de ser a banda do receptor, requerendo então que o fotodiodo possua uma área pequena. Daqui, pode-se perceber que primordialmente no presente contexto uma “antena óptica” deve possuir um maior poder de captura que a simples área de um fotodiodo. Isto é análogo ao prato de uma antena parabólica, capaz de coletar energia de RF e focalizando na antena (dipolo, por exemplo) que fica posicionada em seu foco. Então, faz-se aqui uma analogia do prato da antena parabólica com a “antena óptica” de POF.

Então, o presente trabalho tem como essência mostrar o desenvolvimento de uma “antena” óptica, que operará em curtas distâncias através de dois mecanismos: espalhamento e fluorescência. A ideia central, é utilizar um pequeno segmento de fibra óptica plástica (POF) de PMMA para aproveitar o espalhamento natural que pode ainda ser reforçado ou uma POF de poliestireno fluorescente para aproveitar o mecanismo de luminescência que também pode ser reforçado. Conforme será visto no Capítulo 4, o referido “reforço” foi conseguido através da realização de riscos (ranhuras) na superfície das POF-antenas.

2.9 FOTODIODOS: PIN, FOTOTRANSISTOR, FOTODARLINGTON E APD

Fotodetectores operam através do efeito fotoelétrico onde há a absorção da potência óptica de entrada em forma de fluxo de fótons e a transformação em uma fotocorrente em sua saída. O termo fotodetector é mais geral que fotodiodo em que este último designa especificamente o chip semiconductor que fundamentalmente absorve a luz e gera fotocorrente. Podemos classificar fotodetectores quanto ao fotodiodo que utiliza. Nesta dissertação foi utilizado fotodiodo PIN de silício (visível), tanto como parte integrante de um medidor de potência óptica, como também fazendo parte de um fotodetector rápido (150 MHz) dotado de amplificação por transimpedância de 10 k Ω . Entretanto, por uma questão de completeza, são também (brevemente) descritos os fotodiodos em avalanche, fototransistores e fotoDarlingtons.

2.9.1 Fotodiodo PIN e Fotodiodo Avalanche

O fotodiodo PIN é o mais utilizado em sistemas de comunicações ópticas, vindo a seguir os fotodiodos em avalanche (APD).

O funcionamento do fotodiodo PIN tem como base uma junção p-n polarizada inversamente onde as regiões p e n são separadas por uma região de depleção (i). No momento que um fóton incidente tem energia maior ou igual ao intervalo energético entre as bandas, o chamado *band-gap* do semiconductor utilizado, a energia promovida pelo fóton excita um elétron da banda de valência causando um deslocamento deste para a banda de condução. O resultado deste processo é a geração de pares de elétron/lacuna, os chamados fotoportadores. A figura 19 mostra a estrutura de um Fotodiodo PIN onde é possível ver as regiões P e N e entre elas a camada intrínseca I, região de depleção. Essa estrutura PIN confere uma maior sensibilidade quando se compara com uma junção PN comum por exemplo,

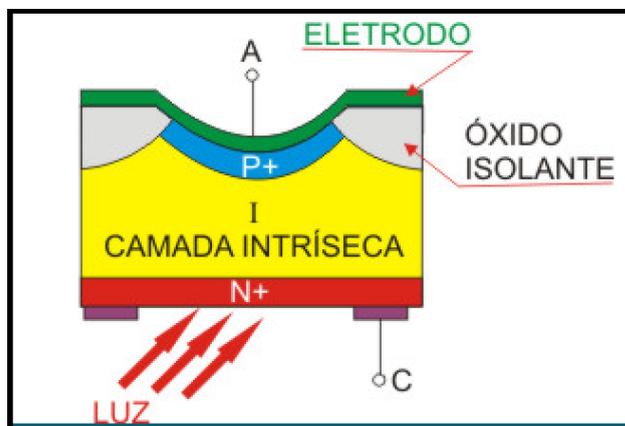


Figura 19 Fotodiodo PIN [42]

Nos fotodiodos do tipo avalanche, cuja estrutura pode ser vista na figura 20 , os fotoportadores de carga, gerados pela incidência luminosa, ao atravessarem o diodo e são expostos a um forte campo elétrico interno (*built-in electrostatic field*) que aciona um processo chamado *avalanche*. O mecanismo de avalanche, conforme o nome já diz, resulta em uma espécie de processo catastrófico-controlado onde portadores de carga fotogerados de forma primária, são acelerados pelo *built-in electric field* gerando por uma vez uma fotocorrente secundária mais intensa devido à processos de colisão.

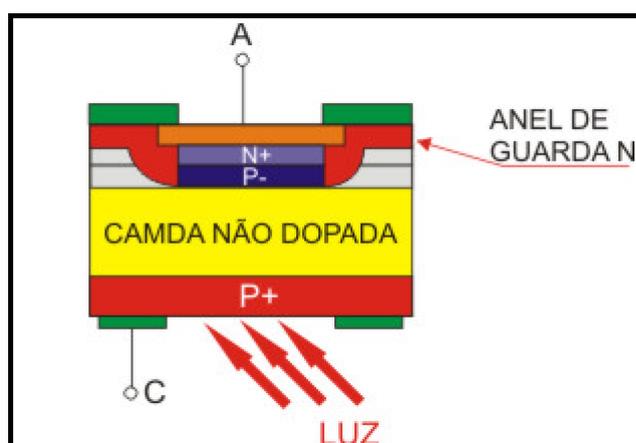


Figura 20 Estrutura Fotodiodo APD [43]

O processo continua de forma que a fotocorrente gerada fica multiplicada pelo fator M quando se compara com um fotodiodo PIN de estrutura similar. O aspecto fundamental dos APDs, crítico para aplicações VLC, é sua maior sensibilidade que os fotodiodos PIN, porém exibindo uma banda praticamente igual. Para o espectro visível utilizado no VLC, os fotodiodos PIN e APD são construídos com base no silício normalmente com pico de responsividade em torno de 850 nm, mas ainda muito eficientes no intervalo visível clássico. Os fotodiodos de silício operam tipicamente na faixa espectral 400-1100 nm ou na faixa estendida 220-1100 nm. Fotodiodos de germânio operam na faixa 800-1800 nm, enquanto que de InGaAs 800-1600 nm [44].

2.9.2 Fototransistor

Fototransistor é mais um dispositivo que funciona baseado no fenômeno da fotocondutividade. Estruturalmente é feito pela combinação de dois diodos de junção. Ao mesmo tempo que ele detecta a incidência de luz ele pode fornecer um ganho dentro de um único componente. Ele nada mais é que um transistor cujo encapsulamento permite a incidência de luz sobre a junção base-coletor. A corrente gerada pela luz na junção é amplificada pelo transistor, como se fosse uma corrente de base convencional e ela é proporcional à intensidade luminosa incidente sobre o componente.

Comparando os Fototransistor com Fotodiodos podemos destacar que os Fototransistores possuem uma intensidade de corrente maior devido a amplificação e a existência da base-coletora permite a escolha do ponto de operação desejado. Entretanto o tempo de resposta do fototransistor é maior.

Um modelo de Fototransistor e seu esquema de polarização podem ser vistos na figura 21 (a) e (b), o Fototransistor IF-D92 da Industrial Fiber Optics, compatível para utilização de POFs, de fácil acoplamento e com respostas entre 400 e 1100 nm, responsividade de 50 mA/mW @ 632 nm e banda analógica > 15 kHz.



Figura 21 -(a) Fototransistor IF-D92 (b)Esquema de circuito de polarização IF-D92 [45]

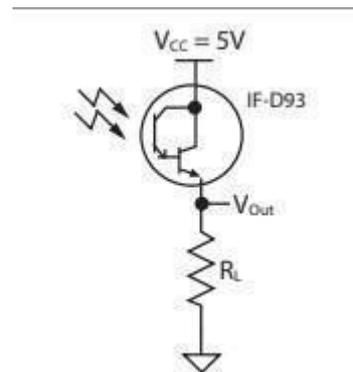
2.9.3 Fotodarlington

Um fotoDarlington, consiste de duas partes: um fototransistor onde o seu sinal elétrico de saída é aplicado em um transistor bipolar, ambas as partes encapsuladas em um único componente. Desta forma, pode-se inferir que um fotoDarlington é mais sensível que um fototransistor, porém apresenta uma banda menor (frequência de corte menor), em suma o IFD93 apresenta uma responsividade (sensibilidade) mais do que 100x maior que o IFD92[37]

Um modelo de FotoDarlington pode ser visto na figura 22 (a), IF-D93, juntamente com o Esquema de circuito de polarização IF-D93 (b). O IFD93 apresenta responsividade de 5300 mA/mW @650 nm e banda analógica em torno de 1 kHz.



(a)



(b)

Figura 22 (a) Fototransistor IF-D93 (b)Esquema de circuito de polarização IF-D93 [46]

CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

O esquema ilustrado na Figura 23 representa uma visão geral da estrutura deste trabalho. Desde a situação - problema, o desenvolvimento de uma “antena óptica” para ser utilizada em um enlace VLC em curta distância (~1m), indagação que deu origem a duas hipóteses (ou 2 sub-sistemas) e que daqui por diante será particionado dentro deste capítulo, começando pela Fonte de Luz e a seguir, a maior contribuição deste trabalho, ou seja, a antena óptica.

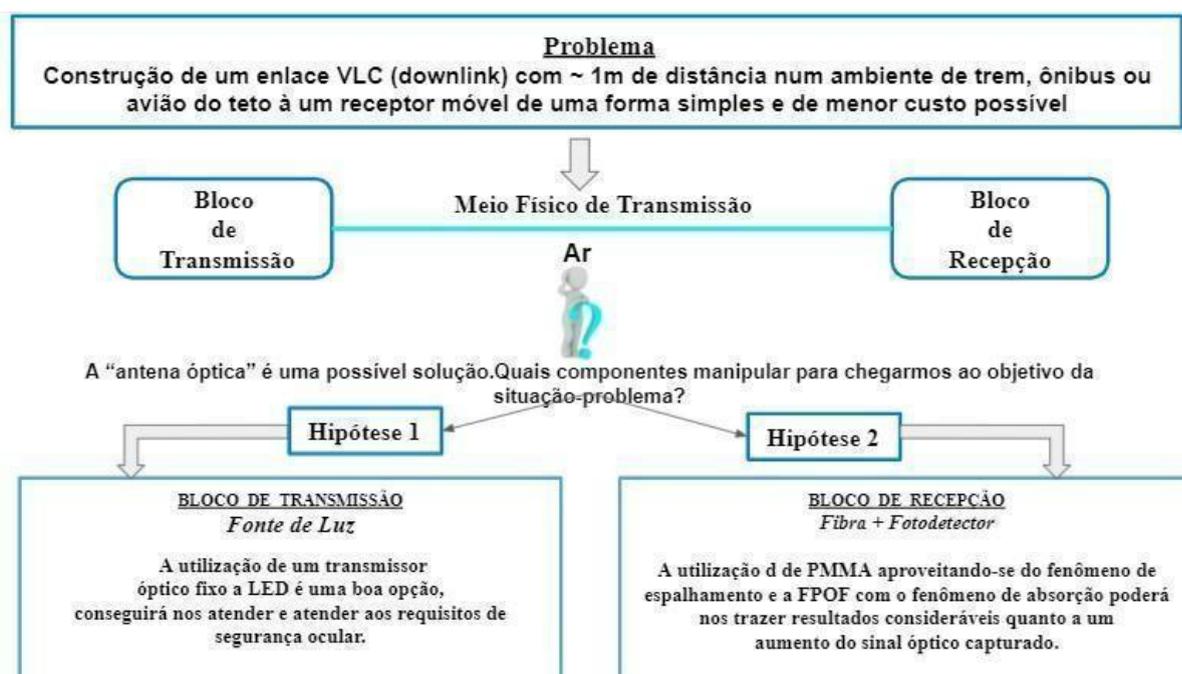


Figura 23 Metodologia de trabalho

A investigação está estruturada nos seguintes capítulos:

O presente Capítulo (3) abordará os dispositivos ópticos e optoeletrônicos passivos e ativos utilizados nos enlaces, em particular para a descrição e a caracterização estática (sensibilidade) das “antenas ópticas”, dispositivos estes que desempenham um papel central desta dissertação. As montagens experimentais realizadas também serão aqui descritas.

Na seção 3.1 foi apresentada na introdução a metodologia do trabalho. A seção 3.2 abordará fontes de luz LEDs (ultra-brilhantes). A seção 3.3 irá descrever um medidor de potência óptica e alguns tipos de fotodetectores de interesse direto. A seção 3.4, fará uma explanação completa e detalhada da concepção e construção da “antena óptica”, tópico central deste trabalho, assim como um breve relato do que existe na literatura com finalidade comparativa. Finalmente, na seção 3.5, serão mostradas esquematicamente algumas montagens experimentais de caracterização cujos resultados e discussões serão descritos no Capítulo 4.

3.2 FONTES DE LUZ (LEDS):

Inicialmente, o propósito desta etapa da pesquisa foi de estudo para a escolha da opção de Fonte de Luz (dispositivos optoeletrônicos de conversão Eletro/Óptica como LEDs e lasers (LDs) semicondutores), que seriam utilizadas nos experimentos.

O objetivo era encontrar uma fonte com grande eficiência luminosa, banda de modulação adequada e um baixo custo de fabricação. Como fora abordado anteriormente, o desenvolvimento de LEDs e o seu uso intensivo para iluminação justificam o interesse na integração entre os sistemas de iluminação e de telecomunicações através da tecnologia VLC, além de fatores como de segurança ocular (uma vantagem se comparado ao uso de Laser), de possuírem vida útil longa, pequenas dimensões, baixos requisitos de energia, bom grau de eficiência, banda “larga” e relativamente de baixo custo foram pontos pertinentes para a escolha de LEDs ultra-brilhantes, incluindo os LEDs brancos.

Como o enlace opera no visível, certos tipos de LEDs não se aplicariam, por exemplo, os que possuem em sua constituição arseneto de gálio puro o qual libera energia na porção infravermelha do espectro, ou LEDs GaAsP e GaP:N de baixo custo, porém com baixa eficiência também. Segundo Ziemann, 2008 [47] os LEDs feitos com GaN (Nitreto de Gálio) são ideais para transmissão de dados para comprimentos de onda menores que 600 nm. Os materiais de interesse são Nitreto de Índio e Gálio (InGaN) e Carboneto de Silício (SiC), semicondutores eficientes na emissão de luz.

Os componentes escolhidos para fazerem parte do Circuito de Transmissão, foram os LEDs de alto brilho azul e branco (baseado no LED azul + fósforo). LEDs brancos são comumente utilizados em iluminação e comunicação, sendo então compatíveis com o VLC. Tais LEDs ultra-brilhantes, são interessantes por poderem ser modulados na faixa de até poucas dezenas MHz, mais do que suficiente para transmissão em aplicações em redes de curtas distâncias. Em termos de propriedades elétricas, os LEDs de alto brilho, de alta potência, possuem corrente de alimentação de cerca de 20 mA a 6 A e potências ópticas de saída que podem chegar até 200 W (matriz de LEDs). Porém, os LEDs (componente único) ultra-brilhantes utilizados em comunicação de dados ou iluminação, exibem tipicamente até dezenas de mW de potência óptica.[48]

O LED azul é modulável entre 15 e 25 MHz, podendo chegar até ~80 MHz com o uso de técnicas especiais como o uso de filtros passa-alta combinados com amplificação

eletrônica. Entretanto, um tipo predominante de LED branco, é aquele constituído fundamentalmente de um LED azul coberto com uma camada de um composto químico contendo fósforo. A luz azul de modulação “rápida”, bombeia o fósforo que emite luminescência no amarelo/vermelho, porém de modulação um pouco mais lenta, em torno de < 3 MHz. Isto significa, que LEDs de luz branca se constituem na realidade de uma mistura de luz azul, amarela e vermelha que de acordo com a resposta fisiológica humana faz parecer de fato “branco”. Para propósitos de iluminação o esquema é aceitável, para propósito simultâneo de comunicações do tipo VLC, temos uma limitação de banda em ~ 3 MHz, pois é a luz branca que incide no fotodiodo do receptor.

Na realidade, é a banda amarela/vermelha de modulação lenta, que precisa então ser filtrada (ou seja, fortemente atenuada), deixando que apenas a banda azul atinja o fotodiodo, permitindo então que um enlace VLC fique com uma banda de 15-80 MHz. O LED azul foi o escolhido em boa parte da Dissertação para a excitação da “antena óptica”, e deveu-se aos seguintes critérios para as fibras de PMMA e POF fluorescente:

1. POF de PMMA (comprimento de onda azul 460nm)

Para as fibras ópticas, incluindo as POFs de PMMA, o espalhamento Rayleigh é mais intenso quanto menor o comprimento de onda, onde para o LED azul, o valor central é de 460nm. Mais especificamente, a intensidade da luz espalhada pelo mecanismo Rayleigh é proporcional a $1/\lambda^4$, como visto na fórmula 1 do coeficiente de espalhamento, onde A_R é uma constante e r indica o raio típico das partículas de espalhamento.

Espalhamento
Rayleigh
 $r \ll \lambda$

$$\sigma = A_R \lambda^{-4}$$

Fórmula 1 - Coeficiente de Espalhamento Rayleigh.

O espalhamento Rayleigh é causado por flutuações do índice de refração, com amplitude espacial bem menor que o comprimento de onda. Trata-se do mecanismo que explica o céu azul.

Conforme será visto adiante, tanto neste Capítulo quanto no próximo, o primeiro tipo de “antena óptica” a ser testada, é aquela baseada em POFs de PMMA. Neste tipo, o mecanismo

predominante de coleta luminosa é baseado no espalhamento Rayleigh (daí o uso de luz azul) e o espalhamento Mie que é bastante independente do comprimento de onda. O espalhamento Mie decorre de centros espalhadores com dimensões bem maiores que λ como por exemplo imperfeições do núcleo e ranhuras impressas na fibra. O segundo tipo de “antena óptica” testado, foi a de PMMA com ranhuras superficiais com o intuito de reforçar o espalhamento Mie, que também atua sobre a luz azul e praticamente com o mesmo peso no restante do espectro visível. O mecanismo de espalhamento Mie, pouco dependente de λ , explica as nuvens brancas.

2. POF fluorescente (comprimento de onda azul 460nm)

No caso da POF fluorescente, o fenômeno de absorção está presente., Quando moléculas do material são irradiadas com fótons de frequências ópticas apropriadas, podem absorver energia e passar do estado fundamental, aquele em que a maioria das moléculas encontram-se quando em temperatura ambiente, para vários estados vibracionais do estado eletrônico excitado. Ocorre posteriormente o retorno para o estado fundamental com a emissão de um fóton nesse processo, que carrega a energia fluorescente.

Tratando-se de FPOFs, obtém-se maior potência fluorescente via excitação com luz azul, quando se compara, por exemplo, com excitação usando a luz de um LED verde (520 nm) [49], ao menos usando POFs fluorescentes dopadas com corante vermelho no modelo 81 0087 - 1 mm Fluorescent Red Polystyrene fabricada pela Saint-Gobain (França) e comercializada pela Industrial Fiber Optics (EUA). Quando excitamos a FPOF vermelha com a luz azul observamos uma conversão do comprimento de onda. No momento em que a luz azul de comprimento de onda 460 nm é absorvida pela fibra, ocorre o fenômeno de fluorescência no vermelho cujo comprimento de onda central é de 635 nm e com uma energia de fóton menor, pois o fóton de emissão fluorescente carrega menos energia que o fóton de excitação devido às possíveis perdas de energia nas transições dos estados vibracionais do estado eletrônico excitado, o que permite que os espectros de absorção e emissão sejam distinguidos [50]. Observamos um aumento do comprimento de onda. Tal variação de comprimento de onda e conseqüentemente de energia refere-se ao deslocamento de Stokes, fundamental para a detecção da fluorescência, que é definido como a diferença de energia entre o máximo do espectro de absorção menos o máximo do espectro de emissão.

Na figura 24, está ilustrado o deslocamento de Stokes do espectro excitação e emissão em amostras fluorescentes.

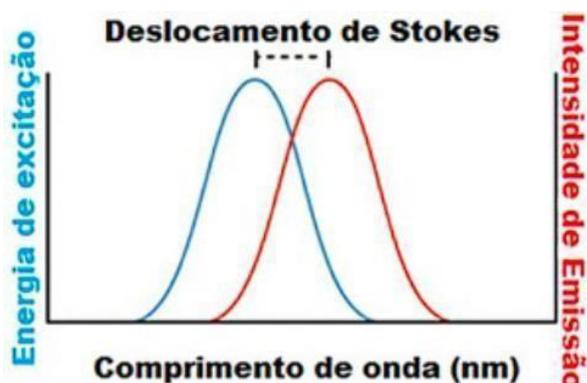


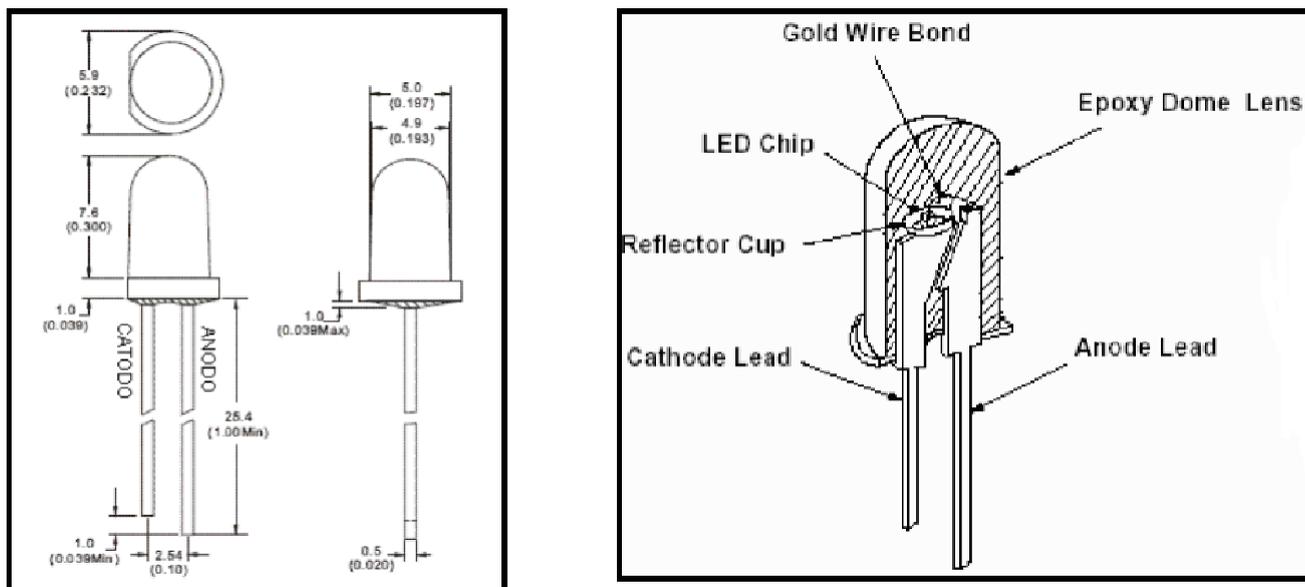
Figura 24 Deslocamento de Stokes [51]

Uma desvantagem, (luz azul espalhada pela POF PMMA), é a menor responsividade exibida pelos fotodiodos de silício no azul [52], sendo a responsividade uma das características mais importantes de um fotodetector

Os LEDs disponíveis no LaCOp que foram utilizados ao longo da pesquisa, conforme explicado antes, podem ser vistos nas fotos e esquemáticos na Figura 25. Na figura 25 (a), observa-se um LEDs alto brilho (5mm) com domo hemisférico transparente exercendo um papel de lente convergente com muito pequena distância focal. Na figura 25 (b), pode-se ver as medidas estruturais externa e interna em detalhes.



(a)



(b)

Figura 25 (a) LEDs alto-brilho branco azul e (b) Dimensões de um LED hemisférico [53]

Na figura 26, observa-se ainda com mais detalhe a estrutura do semiconductor, seu terminal positivo (catodo), terminal negativo (anodo), e internamente a junção P-N onde pode-se ver elétrons e lacunas, elétrons representando as cargas negativas e as lacunas representando as cargas positivas. Este LED é de emissão superficial (SLED), como os mais tipicamente usados em iluminação e VLC. Os LEDs de emissão de borda (EELEDs ou *Edge Emitting LEDs*) são tipicamente utilizados em enlaces de comunicações por fibra óptica. Os EELEDs geram potências ópticas mais baixas que os SLEDs, porém são moduláveis em taxas mais altas.

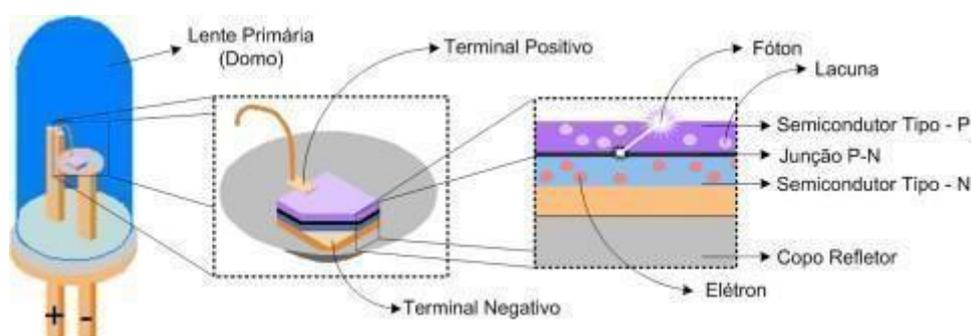


Figura 26 Arquitetura e design de um LED de encapsulamento hemisférico. [54]

O fóton, “partícula” elementar que compõe a luz, também representado na figura 26 é resultado da recombinação dos elétrons e das lacunas quando o pólo positivo da fonte de tensão está conectado ao lado P do diodo (terminal catodo) e o pólo negativo da fonte de tensão está conectado no lado negativo do diodo (terminal anodo) o que chama-se polarização direta, em suma são emissores de luz espontânea, quando percorridos por corrente elétrica no sentido direto. O processo de emissão espontânea pode ser visto esquematicamente na figura 27.

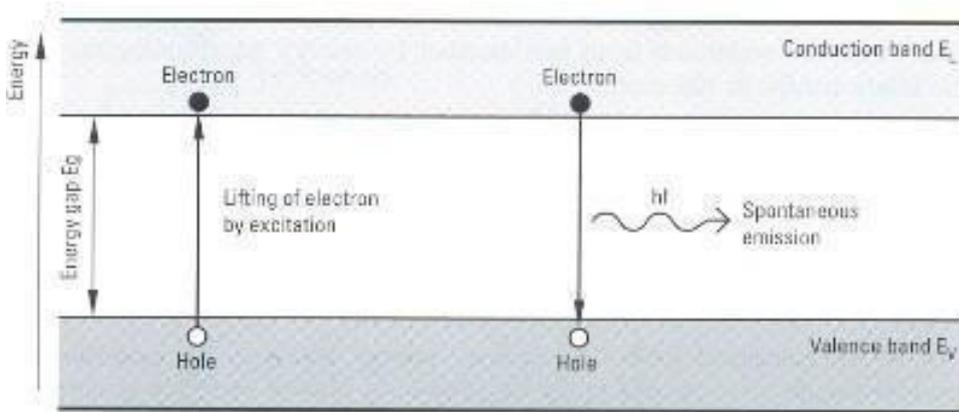


Figura 27 Ilustra o processo de emissão espontânea em um semicondutor.[55]

A figura 28 consiste em uma foto tirada em laboratório do LED azul utilizado na pesquisa.



Figura 28 - Foto tirada em laboratório do LED azul utilizado

Vale a pena destacar brevemente algumas propriedades elétricas e ópticas gerais dos LEDs, são elas:

- A resistência elétrica é uma propriedade importante dos materiais, ela representa a variação da corrente elétrica em função da tensão aplicada. Os LEDs são um caso especial onde a condução de corrente ocorre quando há um determinado nível de tensão aplicado, dependente do gap proibido entre as camadas de valência e condução, ou seja, emitem fótons com comprimento de onda característicos determinados pelo gap de energia (E_g), através da relação $\lambda = hc/E_g$ [56], onde h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz. Distintos gaps provocam emissões

de fótons com diferentes energias, o que provoca a ocorrência de distintas cores. Como o nome já diz, o LED é um diodo, porém um diodo emissor de luz!

- A propriedade de ganho de um LED é a medida do quanto de potência óptica é possível extrair com a aplicação de uma dada corrente elétrica I . Em termos de características espectrais, os LEDs possuem espectro largo na faixa típica de 20-100 nm, por exemplo.
- Luz muito pouco coerente no espaço e no tempo, promovendo dificuldade na colimação da luz ou na geração de franjas de interferência.[57]
- A resposta em modulação dos LEDs depende da dinâmica dos portadores e é limitada pelo tempo de recombinação dos mesmos, geralmente longo. Normalmente, os LEDs comerciais incluindo os SLEDs e os EELEDs (emissão pela lateral) ficam limitados em banda cerca de 100 MHz.

Encerrando esta seção, uma rápida comparação é válida de ser feita sobre outra fonte de luz muito utilizada, os lasers de diodo (LDs), estrutura semicondutora de maior complexidade que o LED. Comparativamente ao LED de emissão espontânea, o laser de diodo tem como princípio de funcionamento a emissão estimulada.

3.3 FOTODETECTORES UTILIZADOS

Nesta seção serão apresentados os fotodetectores utilizados durante a pesquisa: Medidor de Potência Óptica (MPO - Modelo PM20 - Thorlabs) e o Fotodetector- amplificado (PDA 10A), da Thorlabs , figura 29 (a) e (b), respectivamente.

Figura 29 - (a) MPO (b) PDA



Figura 29 - (a) MPO[57] (b) PDA[58]

Revisitando a definição destes dispositivos optoeletrônicos, temos que suas estruturas semicondutoras são baseadas no efeito fotoelétrico via absorção óptica que convertem um sinal óptico num sinal elétrico, ou seja conversão Óptica/Elétrica, onde devem reconverter um sinal óptico para um sinal elétrico, de forma que posteriormente o receptor possa recuperar a informação original.

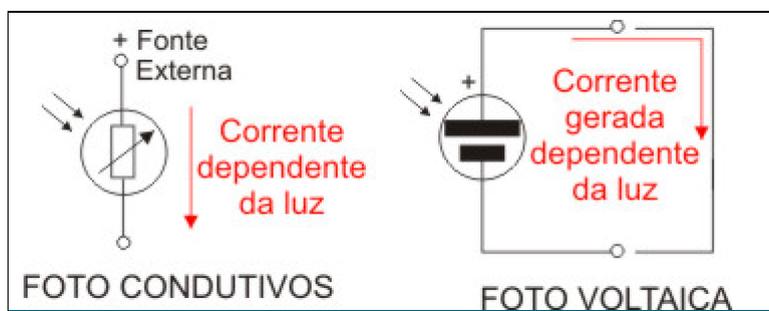
O MPO pode melhor ser classificado como um *equipamento* mesmo quando for do tipo *handheld* como o modelo utilizado nesta Dissertação. Conforme pode ser visto na Figura 29 (a), na parte de cima há um receptáculo de conector do tipo FC de forma que a extremidade do ferrolho fica posicionado bem próximo ao chip semicondutor do sensor de

luz. O sinal elétrico aí gerado, é amplificado e processado pelo instrumento com a finalidade de exibir a potência óptica absoluta para qualquer comprimento de onda dentro da faixa visível, o que significa que o MPO foi previamente calibrado na fábrica. Apesar do MPO poder exibir leituras de potências ópticas absolutas, tal valor nem sempre é fácil de ser atribuído como o valor totalmente gerado por uma fonte.

Conforme será visto adiante, o interesse nesta Dissertação não é por medidas absolutas de potência óptica gerada pela resposta das “antenas-ópticas”, mas sim de medidas relativas, para finalidades comparativas entre as várias “antenas” apresentadas.

Uma propriedade importante é a *largura de banda* de um fotodetector que é determinada pela rapidez com que ele responde a variação de uma potência óptica incidente. Uma resposta rápida, ou seja, grande largura de banda é algo em geral desejável. Em suma, são propriedades desejáveis para os Fotodetectores: grande responsividade, banda-larga, baixo ruído, baixo custo, pequeno volume, o que torna compatível para o acoplamento com fibras ópticas, alta eficiência de captura luminosa, grande linearidade (comunicações analógicas e digitais multinível), grande confiabilidade (robustez) e de preferência que requeira alimentação elétrica com baixa tensão elétrica, i.e. até poucas dezenas de V. Isto não é o caso dos APDs de silício que podem requerer até 250 V de alimentação. O fotodiodo que faz parte do Medidor de Potência Óptica possui -60 dBm de sensibilidade e de banda muito baixa < 10 Hz. Tal sensibilidade se deve ao fato do mesmo utilizar fotodiodo na modalidade fotovoltaica, o qual não se aplica polarização elétrica (bias), diferente do fotocondutivo onde é necessária a aplicação de um polarização elétrica reversa (bias DC), a figura 30 ilustra esse princípio de funcionamento, onde no Fotocondutivo uma tensão reversa é aplicada e no escuro não há fotocorrente (exceto a corrente de escuro, de origem térmica). Ou seja, quando o fotodiodo é iluminado, uma fotocorrente é estabelecida em dependência linear com a potência óptica incidente. E no Fotovoltaico não há tensão elétrica aplicada e quando o dispositivo é iluminado ele gera uma tensão em circuito aberto (V_{OC}). Se o circuito for fechado, teremos uma fotocorrente, porém com dependência não-linear com a potência óptica incidente. Estas são as duas das modalidades que os fotodiodos de silício podem operar. Essa escolha do modo de operação depende dos requerimentos de “velocidade” da aplicação e da quantidade de corrente escura (*dark current*) tolerável.

Corrente de escuro é a fotocorrente produzida por um fotodiodo quando não está iluminado. No modo fotovoltaico a corrente escura é mínima. Fotodiodos apresentam maiores velocidades de chaveamento quando operados no modo fotocondutivo.[59].



(a)

(b)

Figura 30 Fotodiodos modalidade fotovoltaica (a) e modalidade fotocondutiva (b) [60]

Na seção 3.5 serão mostradas as montagens experimentais onde o PMO e ou o PDA é utilizado.

3.4 “ANTENA ÓPTICA” BASEADA EM FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA

Nas seções 3.2 e 3.3 foram descritos os dispositivos E/O e O/E, respectivamente, essenciais em qualquer enlace VLC, seja para a sua operação prática ou para a caracterização de um ou mais de seus componentes ou do enlace como um todo. Na seção 3.2 foi feita uma breve digressão sobre LEDs ultra-brilhantes de interesse direto, lembrando que não houve tentativa de desenvolver um “transmissor óptico”, mas apenas polarizar um LED com corrente contínua e por último com polarização + corrente de modulação na faixa de MHz. Na seção 3.3 foi feita uma breve digressão sobre medidores de potência ópticos, que como será visto são úteis na caracterização de um componente óptico. Também foi explicado os fotodiodos PIN sem e com amplificador de transimpedância integrado em um mesmo *chip*. Deve-se notar que ao final desta Dissertação, foi utilizado um LED devidamente modulado com linha de visada para um fotodetector suficientemente rápido desta forma estabelecendo um enlace VLC apenas com um tom senoidal.

Conforme já explicado no Capítulo 1, pode-se utilizar uma “antena óptica” acoplada ao chip do fotodetector. Pelo cenário aqui suposto, temos um “transmissor óptico” (LED) fixo e um fotodiodo que pode fazer parte de um dispositivo móvel como um *smartphone*, *tablet* ou *notebook*, completando então um enlace VLC.

A “antena óptica” descrita nesta seção consiste no componente óptico passivo central tratado nesta Dissertação.

A proposta do desenvolvimento de uma “antena óptica” de fibra óptica de plástico não está restrita apenas a esta seção, mas permeia toda a Dissertação. As razões de tal escolha, se confundem com as próprias características físicas e geométricas das POFs. Conforme descrito em 3.2 e 3.3, o MPO e o fotodetector-amplificado PDA10 com banda de 150MHz, apresentam diâmetros dos chips do fotodiodo em torno de 1 mm. Isto significa a compatibilidade do diâmetro de 1 mm de uma POF *standard* e o diâmetro dos fotodetectores utilizados.

“Antenas ópticas” foram confeccionadas com base na Fibra Óptica Plástica de PMMA da Toray Industries (Japão) modelo PFU-CD1001-22E e POF de poliestireno fluorescente, FPOF modelo IF-810087 da Industrial Fiber Optics (USA). Esta última, embora vendida nos EUA como fibra fluorescente, é fabricada pela Saint-Gobain (França). A empresa fabricante não revela o(s) dopante(s) utilizado(s) nem sua(s) concentração(ões).

Suponha que chegue no *chip* do fotodetector um padrão luminoso com um formato geométrico transversal qualquer, porém com uma potência luminosa distribuída uniformemente, ou seja, com módulo do vetor de Poynting uniforme. Assumindo que a incidência ocorre numa direção normal à área do *chip* (área de $0,8 \text{ mm}^2$) e que não haja qualquer sombreamento, teremos aí uma situação ideal onde é assumido que uma certa potência óptica P_0 incide no fotodiodo, como ilustrado no esquema abaixo (figura 31) onde

$L1$ é a distância da fonte óptica até “antena” de $L1 = 10$ cm e $L2$ representa o tamanho (comprimento) da “antena” no valor de $L2 = 5$ cm. Deve-se notar, que propositalmente o feixe (divergente) de luz produzido pelo LED azul, está direcionado a 90° da direção da POF-antena. Temos a distância $L1 = 10$ cm da saída da POF acoplada ao LED até a “antena” de comprimento físico $L2$. A razão da escolha das direções ortogonais entre si é a de operar o enlace com uma “antena óptica”, no que seria o pior caso na ausência da POF-antena, ou seja, o enlace ficaria inoperante. O segmento de linha preta do extremo da POF-antena até o fotodiodo do MPO, se trata apenas de um pequeno segmento de POF de PMMA para realizar a conexão física da luz.

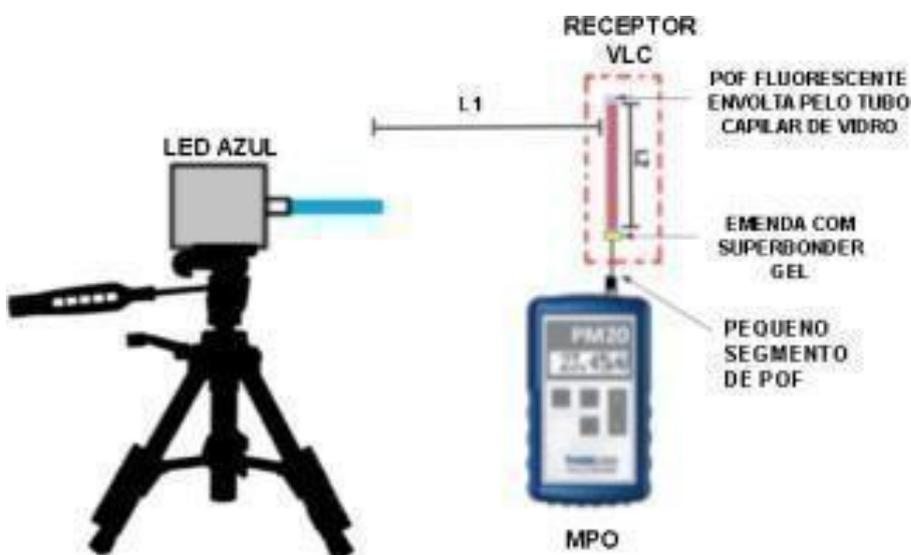


Figura 31 - Diagrama esquemático da montagem experimental para caracterizar comparativamente alguns tipos de “antenas ópticas” plásticas no pior caso quanto a linha-de-visada, ou seja, em 90° com relação a reta normal à superfície do fotodiodo. O retângulo pontilhado destaca a POF-antena.

Imagine que agora o mesmo padrão luminoso uniforme incida com um certo ângulo θ em relação à reta normal da área do *chip* semiconductor. Então a responsividade do detector irá diminuir de forma proporcional a $\cos\theta$. Para $\theta = 0$ teremos um máximo sinal enquanto que para $\theta = \pi/2$ (90°) o sinal será nulo. Em geral, um fotodiodo não fica no plano de um dispositivo móvel, fica “afundado” (*buried*). Isto significa que para $\theta > 0$ haverá sombreamento do fotodiodo, ou seja, a sua responsividade efetiva irá diminuir para além do efeito angular do $\cos\theta$, como mostra a figura 32

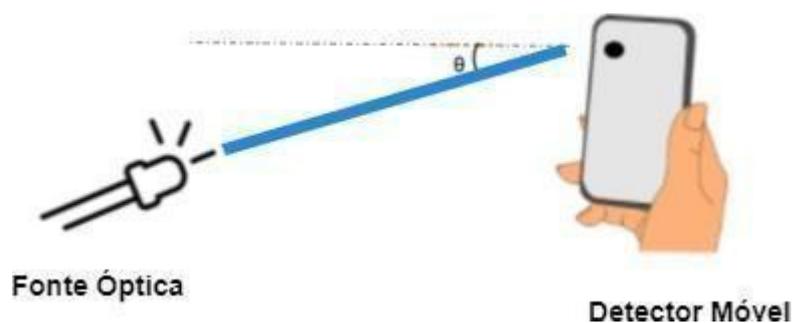


Figura 32 Incidência de luz num ângulo menor que $\pi/2$ [61]

Neste ponto é que pode ser interessante introduzir o uso de uma “antena óptica”, em particular baseada em uma POF. Supondo esta última com comprimento físico de 2 cm, irá apresentar uma área de coleta luminosa de $20 \text{ mm} \times 0,98 \text{ mm} = 19,6 \text{ mm}^2$ para uma incidência perpendicular à antena (ou 0° com relação ao *chip* do fotodiodo). Assumindo a situação ideal onde toda a luz recolhida pela antena seja dirigida ao fotodiodo, como na figura 3.13, obteremos um ganho de $10 \log(19,6/0,8) \sim 13,9 \text{ dB}$ onde $0,8 \text{ mm}^2$ é a área do fotodiodo. Este valor de ganho deve ser olhado com cuidado pois valerá estritamente para os casos idealizados de fotodiodo a descoberto com fotodiodo acoplado à uma “antena óptica”. Na realidade, não é possível recolher toda a luz incidente na “antena óptica”, em compensação teremos em geral $\theta > 0^\circ$ e sombreamento no *chip* do fotodiodo “enterrado”. Então, é neste sentido que uma “antena óptica” aqui proposta como compacta, pode ser útil com o intuito de aumentar o ganho de um receptor VLC mesmo fora da linha-de-visada.

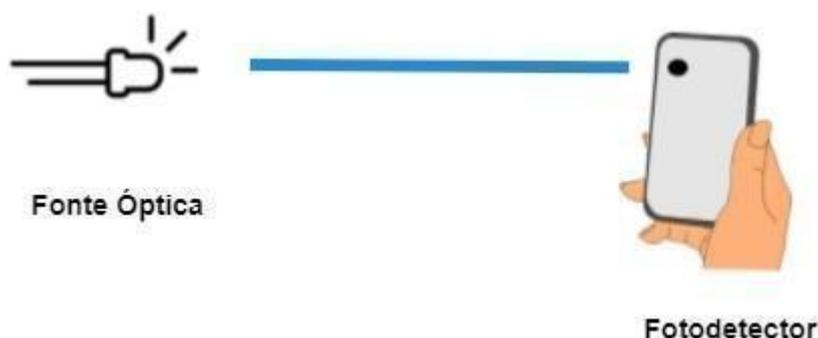


Figura 33- Fonte de luz dirigida ao fotodetector. Fonte:Foto adaptada pela autora [62]

Então, é de interesse aqui desenvolver uma “antena óptica” com a finalidade já explicada que exiba as seguintes características:

- 1 Seja compacta. Por exemplo, com comprimento físico de 5cm ou menos. O ganho teórico obtido com 5cm em relação ao fotodiodo do PDA10 fica sendo de $10 \log(50 \times 0,98 / 0,8) \sim 17,9$ dB.
- 2 Tenha a maior sensibilidade possível. Isso significa que apresente a maior eficiência possível em guiar a luz incidente e recolhida para incidir no fotodiodo sob a forma e luz espalhada ou fluorescência, dependendo da natureza da “POF-antena”.
- 3 Seja “rápida” em resposta. Isso significa que o sinal luminoso produzido pela “antena” deve ser capaz de acompanhar em tempo real o sinal modulado VLC incidente, ou seja, ter banda-larga.
- 4 Seja fácil de fabricar.
- 5 Seja de baixo custo.
- 6 Seja portátil, fácil de usar. A ideia é que a “antena” possa ser facilmente atarrachada e desatarrachada de forma a ficar acoplada e ser desacoplada no fotodiodo do dispositivo móvel.

Conforme foi visto ao longo do texto, será possível perceber que a “antena óptica” a ser apresentada cumpre razoavelmente bem as 6 características anteriores. Nas Conclusões serão feitos os comentários complementares.

Os tipos de “antenas-ópticas” produzidas foram:

1) Antenas de POF PMMA *in natura* e POF PMMA com ranhuras superficiais à quente e à frio. A idéia dessas ranhuras foi a de aumentar o poder espalhador da POF através do mecanismo de espalhamento Mie, e então aumentando o poder de acoplamento luminoso efetivo. Os tipos produzidos foram:

- POF PMMA *in natura*
- POF PMMA *in natura* com ranhuras à frio
- POF PMMA *in natura* com ranhuras à quente

2) Antenas POF fluorescente com dopagem de corante vermelho, onde os fenômenos de absorção e fluorescência são os mecanismos utilizados. Os tipos produzidos foram:

- POF fluorescente *in natura*
- POF fluorescente com ranhuras a frio
- POF fluorescente com ranhuras a quente

Nas figuras 34, 35 (a) e (b) são mostradas as fotos das “antenas ópticas” montadas com base nas POFs PMMA e FPOF *in natura*, com ranhuras a quente e à frio. Pode-se notar que um capilar de vidro encapsula cada POF-antena.



Figura 34 - “Antenas” ópticas fluorescentes encapsuladas no capilar de vidro, de vários tamanhos.



(a)



(b)

Figura 35 (a) “Antenas” de PMMA e de POF Fluorescente e PMMA (b)

O primeiro passo da confecção de uma “antena óptica” de POF PMMA é a retirada cuidadosa da cobertura (opaca) protetora ou jaqueta de polietileno das fibras e a clivagem de suas extremidades. A POF PMMA (com jaqueta) e a POF fluorescente (vendidas sem

jaqueta) *in natura* de comprimento físico de 5 cm estão mostradas através de fotos nas Figuras 36 (a) e (b), respectivamente. O termo *in natura*, significa que nenhuma modificação foi feita na fibra, no presente contexto significa que nenhum arranhão foi impresso na superfície da POF.



(a)



(b)

Figura 36 (a) A POF PMMA *standard* e a (b) POF fluorescente *in natura* modelo IF-810087 que emite luminescência no vermelho (centrado em 635 nm). Ambas sem qualquer cobertura. Deve-se notar que naturalmente as fibras se encurvam.

Fonte:Acervo Pessoal

Pode-se notar nas fotografias mostradas nas Figs. 36 (a) e (b) que ambas as POFs não ficam naturalmente esticadas, mesmo para comprimentos da ordem de poucos centímetros. Daí surge uma primeira razão para encapsular cada POF-antena em um capilar rígido.

A impressão de ranhuras à quente e à frio nas POF-antenas foi realizada com o intuito de obter um aumento significativo do sinal óptico capturado por elas e guiado para o fotodiodo através do espalhamento óptico. Então, a partir de pequenas modificações em sua estrutura superficial das POFs, ou seja, a impressão de riscos, arranhões ou ranhuras, espera-se aumentar o seu poder através do mecanismo de espalhamento Mie.

Para as impressões de ranhuras, foi utilizado como instrumento, um ferro de soldar com ponta chanfrada, conforme mostrado na foto da figura 36(a). A função original dessa ferramenta é a de clivar “a quente” extremidades de POFs, em especial as de núcleo grande (~ 1mm).

A eficiência de tal técnica de clivagem tem sido debatida na literatura e não parece ser a melhor. Desta forma, a presente escolha foi o uso do “ferro de soldar” para a impressão de ranhuras, enquanto que a clivagem das POFs foi realizada “a frio”, utilizando lâminas novas em clivadores tipicamente empregados para a finalidade de promover uma transferência eficiente da luz entre os componentes [63], conforme mostrado em fotos nas Figs 37. Na figura 38 um exemplo de POF *in natura* com ranhuras a frio.



Figura 37 - Ferro de soldar com lâmina na extremidade utilizado para imprimir ranhuras superficiais “a frio” ou a “quente” na “POF-antena”



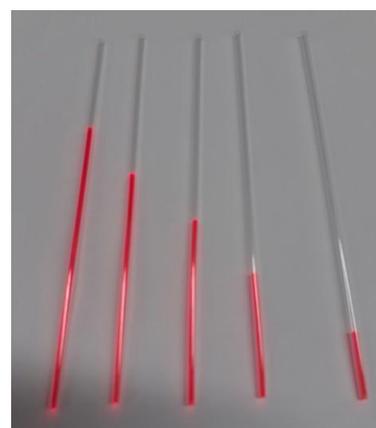
Figura 38 Foto de uma POF PMMA com ranhuras superficiais impressas à frio.

As ranhuras foram feitas tangencialmente e de forma superficial com periodicidade de ~ 1 mm ao longo do comprimento da “antena”. A “frio”, estimam-se ranhuras gravadas com profundidade de 0,1 mm enquanto que a “quente”, pouco mais, de ~ 0,2 mm .

Além dos processos de imprimir ranhuras nas POFs com a finalidade de se obter um aumento do sinal óptico incidente no fotodiodo, outras melhorias foram implementadas ao longo das medições. A primeira delas, foi de utilizar um tubo capilar de vidro envolvendo a fibra afim de mantê-la reta, com o máximo de sustentação. O tubo capilar selecionado foi um modelo encontrado no mercado como Tubo Capilar para Micro-hematócrito Sem Heparina nas seguintes dimensões: comprimento de 75mm, diâmetro interno de 1,10mm e diâmetro externo de 1,50mm, como pode ser visto na figura 39 (a),(b) e (c) temos a “Antena-fluorescente” envolta pelo capilar.



(a)



(b)



(c)

Figura 39 (a) Tubo capilar (b) “Antenas” FPOF *in natura* envoltas pelo capilar e (c) “Antenas” FPOF com ranhuras envoltas pelo capilar.

Os capilares de vidro são muito sensíveis e quebram com facilidade, para

experimentações futuras poderia uma boa opção seria a utilização de capilares feitos de polímeros transparentes. Pensando em formas de reduzir a perda por inserção, um segundo processo de melhoria foi implementado. Foi realizada a emenda com SuperBonder Gel, representado na figura 40 (a) e destacada em amarelo na figura 40(b). A ideia foi a de emendar a “POF antena” envolta pelo tubo capilar de vidro com um pequeno segmento de POF-PMMA utilizando SuperBonder em gel, proporcionando uma perda por inserção de $\sim 0,4$ dB [64]. A emenda da FPOF com a POF PMMA presente no cabo de conexão FC que se encaixa no MPO é de extrema importância para que a POF PMMA reabsorva a luz fluorescente das FPOF. Lembrando que a reabsorção ocorre no comprimento de onda de 635nm e o de absorção em 460 nm, ou seja, os processos de absorção e reabsorção que ocorrem durante a transmissão provocam a conversão do comprimento de onda do feixe emitido. A quantidade e intensidade de absorção e reabsorção depende respectivamente do tipo de dopagem e do comprimento do feixe.



Figura 40 (a) Fotos do Superbonder Gel, capilar de vidro e "antena" de POF fluorescente, (b) Esquema da segunda melhoria quanto a interface com a antena óptica visando reduzir perda de inserção.

Na figura 41 está representada essa montagem experimental, ou seja, da antena óptica fluorescente conectada ao fotodiodo.



Figura 41 - Montagem Experimental que conecta a antena óptica encapsulada no capilar com um conector FC que deve ser enroscado no MPO ou no PDA10. Deve-se notar a emenda utilizando SuperBonder Gel entre a FPOF e a POF PMMA que conduz a luz até o fotodiodo.

3.5 MONTAGENS EXPERIMENTAIS DE CARACTERIZAÇÃO

3.5.1 Introdução

A idéia desta seção é a de mostrar e explicar algumas montagens experimentais de caracterização ou de demonstração de operação das “antenas ópticas” compondo um enlace VLC curto (< 1 m) sem e depois com modulação (tom senoidal). Os LEDs, fotodiodos e “antenas ópticas”, serão aqui usados livremente pois as explicações básicas já foram feitas nas secções anteriores deste **Capítulo 3**.

Na seção **3.5.2**, referente a maior parte desta Dissertação, são descritas montagens experimentais destinadas a caracterizar comparativamente a sensibilidade ou eficiência de conversão da potência de luz incidente para luz guiada até o fotodiodo. Conforme ficará mais claro adiante, é muito difícil realizar uma medida *absoluta* da referida eficiência de conversão, por isto as medidas são feitas de forma comparativa (ou *relativa*). No presente contexto do desenvolvimento de um detector para um enlace VLC, deve-se perceber que medidas *absolutas* não são essenciais, o que seria o caso se o desenvolvimento proposto fosse de um *sensor* de grandezas físicas (potência óptica incidente), mas não é. A idéia é desenvolver um detector de luz visível incidente e conseguir acompanhar a sua modulação com uma redução do desvanecimento angular.

A secção **3.5.3**, referente ao final desta Dissertação, descreve uma montagem experimental destinada a mostrar que as “antenas ópticas”, respondem rápido, na faixa de MHz, habilitando o seu uso em enlaces de comunicações VLC com LEDs ultrabrilhantes, inclusive os LEDs brancos e com potencial para responder aos LDs visíveis modulados.

3.5.2 Montagens experimentais de caracterização estática

Com o objetivo de fazer preliminarmente um estudo comparativo de desempenho de sensibilidade de alguns tipos “antenas ópticas”, foi feita uma montagem experimental simples composta por uma Fonte de Tensão DC de alimentação do circuito do LED, amperímetro para medição da corrente que atravessa o circuito do LED e um medidor de potência óptica (MPO), modelo PM20A da Thorlabs com -60 dBm de sensibilidade. Deve-se notar que se trata de uma montagem sem modulação, utilizando apenas a portadora óptica, conforme é esquematizado pelo desenho na Fig 42.

Os 6 tipos de antenas (POF PMMA *in natura*, POF PMMA com ranhuras a quente e a frio, FPOF *in natura*, FPOF com ranhuras a quente e a frio) em diferentes comprimentos (8CM, 5cm, 4cm, 3cm, 2cm e 1cm) foram caracterizados nesta configuração.

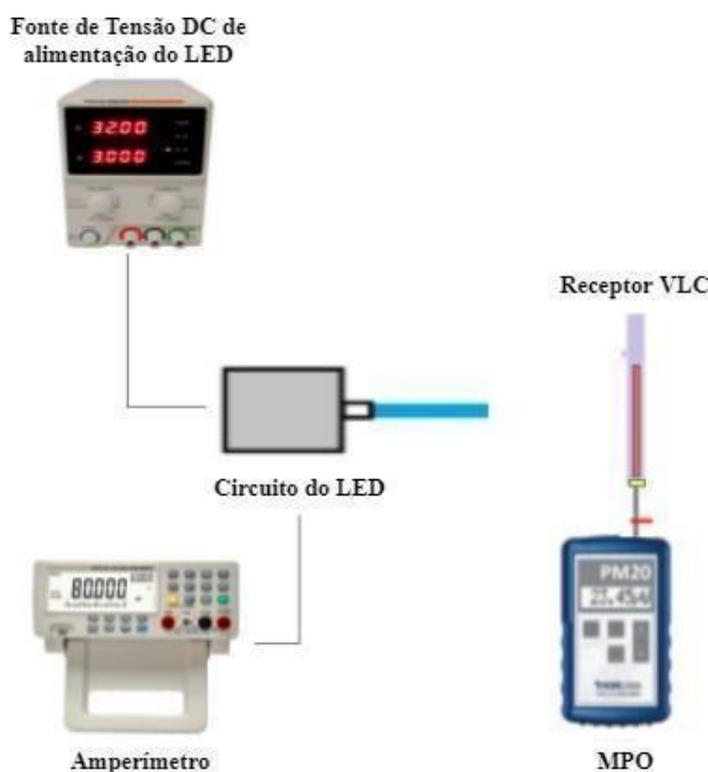


Figura 42 Esquema simplificado da montagem experimental de caracterização óptica estática (sem modulação) das antenas ópticas.

Nesta montagem experimental simples foram realizados 2 ciclos de medições. O 1º ciclo, a nível comparativo, serviu para avaliar qual tipo de POF mostraria maior poder de captura de luz. As “antenas” eram simplesmente inseridas no conector de entrada do MPO, sem ainda

utilizar o encapsulamento do capilar de vidro envolvendo a “antena” como mostrado na figura 43.



Figura 43 Um *zoom* na foto montagem experimental momentaneamente configurada para enlaces muito curtos . focando na “antena óptica” sem encapsulamento conectada diretamente no MPO e a fonte de luz.

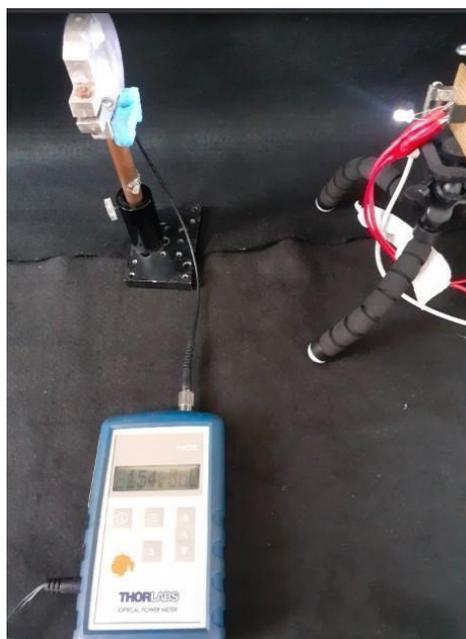
Pode-se ver a montagem experimental como um todo para a análise inicial dos níveis de potência luminosa captadas pelas “antenas” localizadas a 90° do feixe luminoso na figura 44. Foram utilizados inicialmente LEDs Diemount emitindo no azul como sendo a fonte da portadora óptica (sem modulação). Posteriormente foram usados LEDs ultra-brilhantes convencionais, de domo hemisférico transparente.

A potência óptica de saída do LED Diemount GmbH emitindo no azul (~ 460 nm), é nominalmente de $4 \text{ mW}@ 20 \text{ mA}$. A extremidade livre da POF acoplada ao LED ($\text{NA} = 0,5$), foi simplesmente clivada, resultando em um ângulo de divergência de saída de luz em $\sim 60^\circ$ (ou $\pm 30^\circ$). Dependendo da aplicação, este ângulo de divergência pode ser excessivo ou insuficiente. No presente caso, nenhum esforço foi feito para alterar o referido ângulo. Então, todos os experimentos feitos com o LED Diemount utilizou 60° de divergência do feixe óptico.

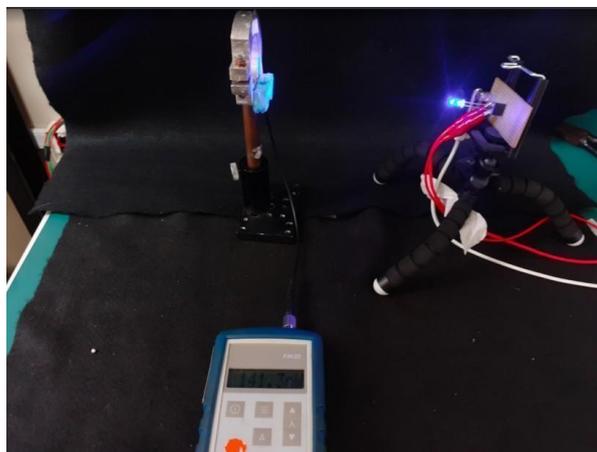
Em suma, a principal finalidade da montagem mostrada na Fig. 45, é a de “calibrar” a potência óptica que emerge do LED ultrabrilhante com a corrente elétrica DC que o alimenta.

No 2º ciclo, foram feitas as mesmas medições, com a diferença que as melhorias (na antena-óptica) relatadas na seção 3.4 foram implementadas.

A seguir estão alguns registros feitos das medições e explicações pertinentes:



(a)



(b)

Figura 44 - Medições utilizando LED branco (a) e azul (b) como fontes de transmissão óptica.

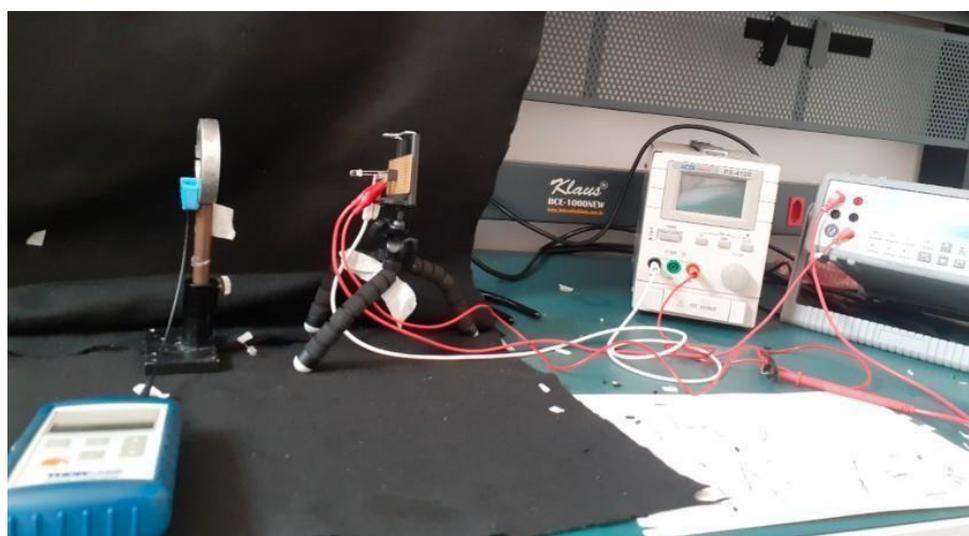


Figura 45 - Enlace de medições

3.5.3 Montagem experimental com tom senoidal acionando a fonte óptica

O intuito agora, é o de verificar se as “antenas ópticas apresentariam algum tipo de resposta sob incidência de um tom senoidal impresso na portadora óptica. O sinal elétrico é oriundo de um gerador de funções e na ponta de recepção foi agora utilizado o fotodetector PDA10, dotado de pré-amplificação integrada do sinal. Foi feita ao final uma montagem

experimental, conforme mostrado na figura 46. A montagem é então destinada a mostrar que as “antenas ópticas”, respondem rápido, na faixa de MHz, o que comprova e habilita o seu uso em enlaces de comunicações VLC com LEDs ultra-brilhantes, inclusive os LEDs brancos.

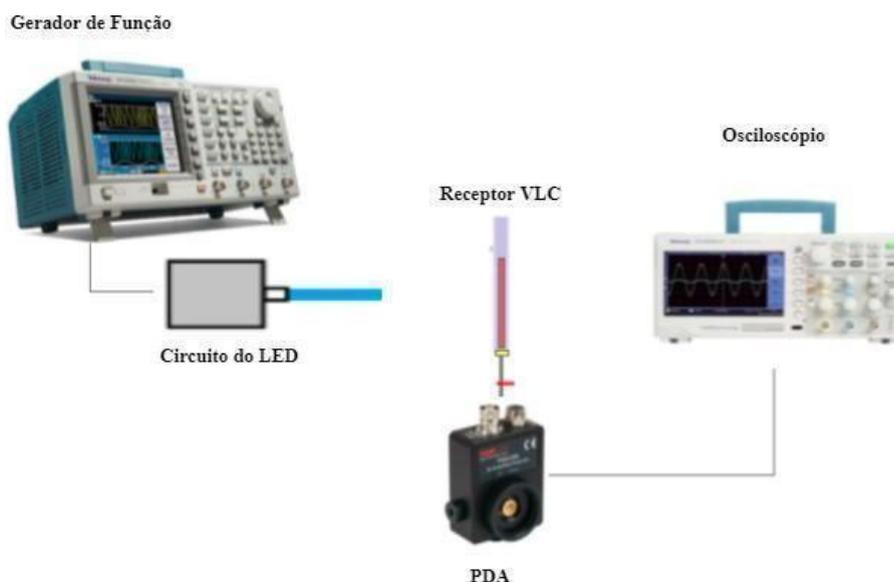


Figura 46- Esquema da montagem experimental que mostra resposta da antena-óptica ao tom senoidal em 10 MHz impresso na portadora óptica no azul de um LED Diemount.

Na figura 47 temos uma foto da montagem experimental feita em laboratório com base no esquematizado pela Figura 46. Onde um sinal senoidal foi gerado através do Gerador de funções aplicando um sinal à fonte óptica, o LED. Na recepção a FPOF, a “Antena” óptica, foi acoplada ao PDA que conectado ao osciloscópio permitiu a análise do sinal recebido.



Figura 47 - Montagem em laboratório mostrando gerador de funções, osciloscópio, PDA10 e “antena-óptica”.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo, apresentamos os resultados experimentais e discussões pertinentes da sensibilidade e resposta temporal das Antenas Ópticas. Nesta Dissertação, a maior parte dos resultados refere-se ao comportamento estático das “antenas ópticas” sob a incidência de luz não-modulada. Portanto, boa parte do objetivo foi o de verificar de forma *relativa*, a *sensibilidade* das “antenas ópticas”. Entende-se aqui *sensibilidade* como sendo a potência óptica que a POF-antena é capaz de direcionar e que incide no fotodetector. A *sensibilidade* é então medida como função da potência óptica do transmissor (LED) sob aproximadamente as mesmas condições como distância transmissor-receptor, mesma lente no transmissor, mesmo comprimento de onda, etc. Deve-se aqui esclarecer que é bastante difícil realizar medidas *absolutas* de potência óptica, por isto a escolha na realização de experimentos comparativos mostrando qual a “melhor” POF-antena.

Conforme explicado no Capítulo 3, dois tipos básicos de POF-antenas foram caracterizados: de PMMA e POF fluorescente (vermelhas) em comprimento padrão de 5 cm. As POFs fluorescentes, foram também caracterizadas em função de seu comprimento visando uma otimização de eficiência/compactação.

Então, os Ciclos 1 e 2 abrangem POF-antenas no comprimento “padrão” de 5 cm, enquanto que o Ciclo 3 refere-se as POF-antenas fluorescentes (vermelhas) com comprimentos variados todos da ordem de poucos centímetros.

Como uma demonstração (ou prova-de-princípio), de que a POF-antena pode responder a sinais ópticos modulados (VLC), o Ciclo 4 refere-se então a verificar semi-qualitativamente a resposta temporal do dispositivo sob luz modulada em um tom senoidal.

Deve-se aqui mais uma vez ressaltar, que a POF-antena aqui descrita se destina futuramente à um enlace VLC de $\sim 1\text{m}$ de distância transmissor-receptor e que possa ser conectada à algum aparelho móvel de comunicação. Portanto, a POF-antena deve ter a menor dimensão possível, além de ter que exibir uma certa robustez e facilidade de conexão com o fotodiodo integrado no dispositivo móvel.

4.2 Resultados experimentais

4.2.1 Resultados Ciclo 1 de medidas

Os primeiros resultados experimentais, apresentados na Tabela 2, são do Ciclo 1, que a nível comparativo, serviu para avaliar qual tipo de POF mostra maior poder de captura de luz. As “antenas” foram simplesmente inseridas no conector de entrada do MPO, ainda sem o invólucro de vidro. Embora o presente Ciclo de medidas tenha tido um carácter preliminar, se mostrou, no entanto, bastante eficaz em fornecer um direcionamento em qual tipo de “antena óptica” deve ser o mais viável para o cenário de VLC aqui suposto.

Tabela 2 - Resultados comparativos do nível de sinal óptico Pout gerado pelas “antenas ópticas” a 10 cm de distância ortogonal do LED azul emissor no Ciclo 1. Cada POF-antena possuía 5 cm de comprimento.

“Antena óptica”	Pout (dBm)	λ (nm)
PMMA <i>in natura</i>	<i>Low signal</i>	460
PMMA c/ ranhuras a quente	- 36,9	460
PMMA c/ ranhuras a frio	- 36,9	460
FPOF-vermelha <i>in natura</i>	- 31,0	635

A Tabela 2, mostra os quatro primeiros resultados experimentais obtidos onde, conforme explicado no Capítulo 3, uma mesma montagem experimental foi utilizada, com a exceção apenas da “antena óptica” que era trocada. Todas as POF-antenas caracterizadas possuíam 5 cm de comprimento tendo todas também um mesmo diâmetro de 1 mm.

Deve-se notar que as 3 primeiras “antenas ópticas” foram POFs de PMMA. Portanto, o mecanismo de funcionamento é o espalhamento de Rayleigh e Mie, o que significa que a luz azul (460 nm) incidente na fibra era espalhada e uma fração direcionada ao fotodiodo. A última, era uma POF de poliestireno dopada com corante capaz de gerar fluorescência com banda espectral centrada em 635 nm (vermelho), quando excitada pela luz azul centrada por sua vez em 460 nm.

Os resultados de medidas da Tabela 2 foram delicadas de serem feitas devido a um certo grau de desalinhamento óptico que ocorria quando a POF-antena tinha de ser trocada.

Entretanto, as medidas foram várias vezes repetidas e pode-se extrair valores promediados de um certo número de amostras conforme os valores médios mostrados na Tabela 2. O desvio-padrão de cada medida não foi calculado pois os valores absolutos de Pout não são importantes e podem variar conforme o alinhamento óptico detalhado da situação física. O conjunto mais importante, é formado pelos valores *relativos* de Pout onde foi tomado o cuidado para expressá-los em dBm, ou seja, pequenas diferenças são irrelevantes e uma

escala logarítmica permite inferir as conclusões para este Ciclo 1 conforme discutido a seguir.

1º) Análise das “POF-antenas” de PMMA

Analisando o primeiro resultado na Tabela 2, pôde-se notar a baixa eficiência de captura da POF PMMA *in natura* que ficou no nível $P_{out} = low\ signal$, ou seja, abaixo da sensibilidade de -60 dBm (potência óptica) que exhibe o MPO aqui utilizado. Isto significa que apesar da POF espalhar luz (como qualquer fibra óptica), o nível de potência capturada pela a sua abertura numérica não foi suficiente para resultar em um valor $P_{out} > -60\text{ dBm}$.

Então, com o intuito de aproveitar as POFs de PMMA, foram impressas ranhuras superficiais nestas fibras de forma a tentar aumentar algumas ordens de grandeza o espalhamento Mie. Desta forma, sucessivos testes foram realizados com as POFs com ranhuras. Como o MPO possui sensibilidade de -60 dBm , é estimado um aumento na eficiência de captura de pelo menos $-36,9 - (-60) = +23,1\text{ dB}$ gerada pelas antenas com ranhuras superficiais. Deve-se notar que este último valor medido de $+23,1\text{ dB}$ está referenciado ao *low signal* do MPO. Portanto, o procedimento de gravar ranhuras superficiais na POF-PMMA habilitou a fibra de começar a funcionar como uma “antena óptica” e a melhora obtida na eficiência foi de pelo menos $23,1\text{ dB}$ quando se compara com a fibra *in natura*. Pôde-se também notar que não fez diferença significativa realizar ranhuras “a frio” ou “a quente” (ver Capítulo 3) onde obteve-se $P_{out} = -36,9\text{ dBm}$ em ambos os casos.

2º) Análise das “POF-antenas” de poliestireno dopado com corante (FPOFs)

O último resultado mostrado na Tabela 2, refere-se ao uso de uma POF-antena do tipo fluorescente *in natura* com o espectro de fluorescência centrado no vermelho (635 nm) quando excitada com luz azul (460 nm). Então, deve-se notar que com a FPOF-vermelha ocorre de fato uma conversão de comprimento de onda de 460 nm para 635 nm , sendo a luz vermelha a que incide no fotodiodo.

• A Tabela 2 mostra que, a FPOF-vermelha *in natura* apresentou um poder de captura luminosa de $-31,0 - (-36,9) = 5,9\text{ dB}$ maior quando se compara com qualquer das POFs-PMMA com ranhuras.

Com base nos resultados até aqui obtidos, o mecanismo de fluorescência se mostrou mais eficiente, porém tudo com base em POFs disponíveis comercialmente e com realização (ou não) de procedimentos bem simples como a gravação de ranhuras. Um fotodiodo de Si possui maior responsividade em 635 nm de aproximadamente $1,6\text{ dB}$ quando se compara com 460 nm , o que contribui em parte para a melhora de $5,9\text{ dB}$.

4.2.2 Resultados do Ciclo 2 de medidas

Devido ao bom resultado obtido com a FPOF no Ciclo 1, foi então dado início no Ciclo 2 aos testes que mostram *comparativamente* os níveis de potência luminosa de saída Pout das FPOFs *in natura* e com ranhuras à quente e à frio. O aumento obtido no Pout inclui melhorias nas emendas e o encapsulamento das FPOFs por dentro dos invólucros de vidro, ou seja, dentro dos capilares de vidro conforme descrito no Capítulo 3. Na Tabela 3, estão os resultados experimentais promediados Pout (em dBm) correspondentes ao Ciclo 2 de medidas com 5 cm de comprimento para as FPOF.

Tabela 3 - Resultados *comparativos* do nível de sinal óptico Pout gerado pelas “antenas ópticas” FPOF-vermelhas a 10 cm de distância do LED azul emissor no Ciclo 2. As FPOFs-antenas possuem todas 5 cm de comprimento.

“Antena óptica”: FPOF- vermelha	Pout (dBm)	λ (nm)
<i>FPOF in natura</i>	-15,8	635
<i>FPOF c/ ranhuras a quente</i>	- 14,9	635
<i>FPOF c/ ranhuras a frio</i>	- 14,6	635

Deve-se notar uma melhora em torno de 1 dB quando ranhuras superficiais são gravadas na superfície da FPOF, ou seja, em comparação com a FPOF *in natura*. A melhora aqui obtida no Pout (~ 1 dB) foi significativamente menos dramática que o aumento obtido na POF-PMMA *in natura* (~ 23 dB) após ser riscada a frio (ou a quente). Dos resultados da Tabela 3, pode-se verificar que não houve vantagem em realizar “ranhuras a quente”. Deste ponto em diante, quaisquer ranhuras impressas na superfície das FPOFs (também) foram realizadas a “frio”, um procedimento mais simples.

4.2.3 Ciclo 3 : Resultados das FPOFs de tamanhos variados nas mesmas condições do Ciclo 2

Até o momento foram apresentados resultados de todas as medidas que foram realizadas com “antenas” ópticas de tamanho (comprimento) de 5cm. Nesta seção, serão apresentados os resultados experimentais de Pout porém para FPOFs-antenas com tamanhos distintos. A idéia deste Ciclo, é a de otimizar (reduzir ao máximo) o comprimento da “antena-óptica”, ao mesmo tempo que se procura maximizar o nível de potência óptica direcionada que incide no fotodiodo. Os resultados deste Ciclo 3 estão da Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados Ciclo 3 - Diferentes tamanhos de FPOFs (para $\lambda = 635$ nm)

“Antena óptica”: FPOF- vermelha	Pout (dBm)
<i>FPOF in natura 8 cm</i>	-25,3
<i>FPOF in natura 4cm</i>	-15,7
<i>FPOF in natura 3cm</i>	-15,6
<i>FPOF in natura 2cm</i>	-15,4
<i>FPOF in natura 1cm</i>	-15,4
<i>FPOF c/ ranhuras a quente 8 cm</i>	-24,4
<i>FPOF c/ ranhuras a quente 4cm</i>	- 14,8
<i>FPOF c/ ranhuras a quente 3cm</i>	- 14,7
<i>FPOF c/ ranhuras a quente 2cm</i>	- 14,6
<i>FPOF c/ ranhuras a quente 1cm</i>	- 14,4
<i>FPOF c/ ranhuras a frio 8 cm</i>	-24,1
<i>FPOF c/ ranhuras a frio 4cm</i>	- 14,4

FPOF c/ ranhuras a frio 3cm	- 14,5
FPOF c/ ranhuras a frio 2cm	- 14,4
FPOF c/ ranhuras a frio 1cm	- 14,3

Com a redução dos tamanhos das antenas podemos ver que os resultados são essencialmente iguais para cada tipo de FPOF. No entanto, há uma diferença quando $L > 5$ cm, na tabela 4 temos o exemplo quando $L = 8$ cm .

Na Figura 48 temos o gráfico onde pode-se ver as 3 curvas referentes a FPOFs *in natura*, com ranhuras a quente e a frio, em que são representadas as medições da sensibilidade das FPOFs de tamanhos variados nas mesmas condições do Ciclo 2 e descritas na Tabela 4.

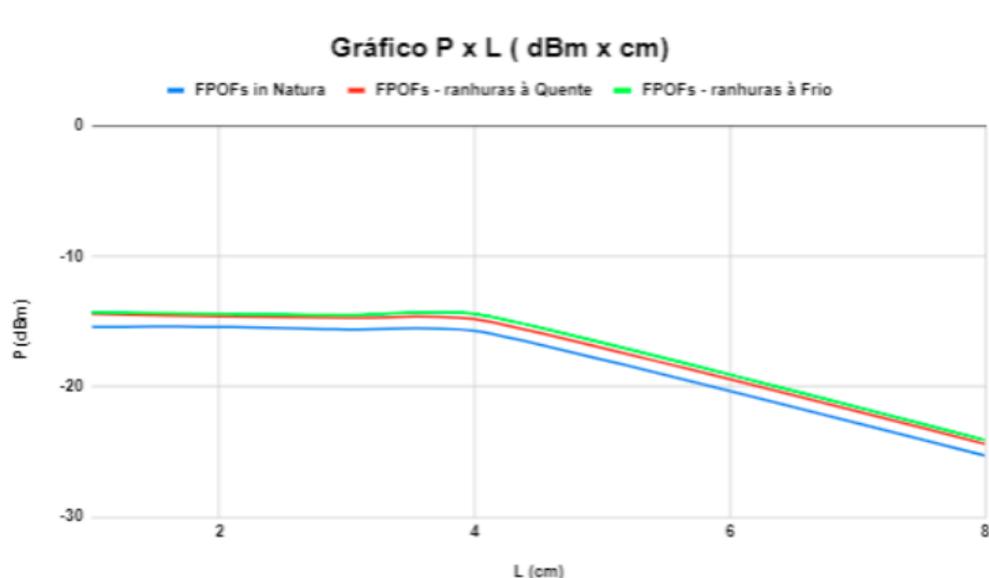


Figura 48 - Curva P x L para tamanhos variados de FPOFs.

Pode-se notar do gráfico mostrado na Figura 48 que as FPOFs com ranhuras a frio apresentaram eficiência de coleta luminosa em média ~ 1 dB melhor que da versão *in natura*. Além disso, as FPOFs com comprimento no intervalo 1 – 4 cm apresentaram sensibilidade melhor que amostras com $L = 8$ cm. A razão de se obter melhores resultados com menores comprimentos de “POF-antenas”, é o fenômeno da reabsorção. O sinal vermelho gerado em pontos mais distantes do fotodiodo irão se propagar ao longo da FPOF e serão em parte reabsorvidos. Isto faz com que pequenas comprimentos de FPOFs produzam maiores potências ópticas de luz fluorescente incidindo no fotodiodo.

4.2.4 Resultados de experimentos com sinal óptico variando no tempo.

Com a finalidade de entender o desempenho das “antenas ópticas” e ao mesmo tempo mostrar a sua viabilidade como o *front end* de um receptor VLC, a última etapa dos experimentos foi a de detectar sinais variantes no tempo.

No presente caso, foi utilizado como fonte óptica um único LED branco do tipo LED azul bombeando uma camada de fósforo. O LED foi eletricamente modulado com um tom senoidal de 10 MHz de frequência e amplitude = 4 V, superposto a uma tensão de *bias* $V_{bias} = 4,9$ V fazendo uso de um gerador de funções arbitrárias. Duas FPOFs foram experimentadas, umas delas com 5 cm e a outra com 10 cm de comprimento.

Nenhuma técnica para a aumentar a banda de modulação (e.g. filtragem/amplificação passa-alta) foi aplicada ao LED branco, de forma que a limitação ficou em 15 MHz (porém foi testado em 10 MHz). Todas as etapas do presente experimento foram descritas no Capítulo 3 e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 Resultados de experimentos com sinal óptico variando no tempo.

FPOF	Frequência (MHz)	$V_{Osciloscópio}$ (mV)
Medidas Osciloscópio +PDA - FPOF 5cm	10 MHz	32,9
Medidas Osciloscópio +PDA - FPOF 10cm	10 MHz	19,0

Pode-se primeiramente notar que a amplitude de sinal recebido foi maior com 5 cm de comprimento de antena-óptica do que a mesma com 10 cm, resultado este compatível com o Ciclo 3 descrito anteriormente.

A POF fluorescente utilizada é um modelo comercial que uma vez excitada com luz verde-azul, emite fluorescência com espectro largo, porém centrado em 635 nm (vermelho). Entretanto, embora se saiba que a FPOF é de matriz de poliestireno, não é revelado a natureza do dopante ou dopantes utilizados e nem a concentração de cada um. A natureza dos dopantes parece ser inorgânica devido a estabilidade que se vem observando.

Uma questão fundamental das antenas-ópticas, é a sua banda de resposta que deve no mínimo acompanhar a modulação temporal do sinal VLC ou qualquer que seja o sinal de teste. Em “Fast wavelength conversion to generate 560 nm fluorescence for data transmission in polymer optical fibres”, Electronics Letters 2015 e ICPOF 2015 [65] foi utilizado um outro modelo de FPOF (modelo 810083 de poliestireno âmbar fluorescente) , porém do mesmo fabricante, mas com fluorescência centrada no verde/amarelo (560-570 nm) com o

objetivo de realizar conversão *rápida* de sinais modulados em verde (520 nm) para o laranja-lima (560-570 nm). Isto foi conseguido porque a FPOF contribuiu em sua “velocidade” de resposta e apresentou no mínimo 52,5 MHz de banda. O modelo de FPOF utilizada foi a que apresentou o melhor desempenho sob luz azul, porém o seu tempo de resposta não foi diretamente medido com em. Entretanto, obtivemos aqui resultados considerados promissores a partir de portadora óptica de luz branca com modulação em tom senoidal em 10 MH.

4.2.5 Discussão Geral

A partir de todo o trabalho experimental realizado, resultados obtidos, conhecimentos prévios a partir de registros na literatura, pôde-se nesta secção discorrer sobre as possíveis melhoras que podem ser feitas no sentido de otimizar um enlace VLC de curta-distância (~1 m). A otimização pode ser feita à nível do transmissor, do receptor ou de ambos.

1º) Otimização da POF-antena ou receptor

Deve-se notar que o último Ciclo de medidas conforme descrito em 4.2.4 poderia produzir resultados ainda melhores, ou seja POF-antenas mais sensíveis mantendo a banda necessária, caso um ou mais procedimentos fossem implementados como descrito a seguir:

(a) Otimização da FPOF do ponto de vista material, através do tipo de dopante ou dopantes utilizados na fibra de poliestireno com diâmetro de 1 mm, assim como as respectivas concentrações. Em um primeiro momento, basta que as FPOF-antenas respondam bem na faixa de 10-25 MHz, valores típicos para os LEDs brancos comumente utilizados simultaneamente para iluminação e comunicação. Uma escolha adequada de dopante ou dopantes poderá implicar em um espectro fluorescente com $\lambda > 635$ nm, idealmente centrado em ~900 nm, que corresponde ao pico de responsividade dos fotodiodos de Si. Com isto, pode-se teoricamente obter uma melhora de 0,55/0,32 ~ 2,4 dB assumindo que todos os outros parâmetros se mantenham inalterados.

(b) Otimização da FPOF do ponto de vista geométrico: diâmetro e comprimento, levando em conta o item (a). A facilidade de instalação da POF-antena, assim como a sua compactação também devem ser levados em conta.

(c) Uma das extremidades da POF-antena fica em contato direto com o fotodiodo onde incide a potência óptica P_{out} . Porém, a outra extremidade fica livre e em princípio uma mesma potência espalhada ou fluorescente P_{out} irá emergir por esta, caracterizando uma espécie de antena bicônica. Uma idéia, é a de tentar reciclar a luz que emerge da extremidade livre, talvez depositando uma fina camada refletora. Naturalmente que tal implementação irá implicar em uma POF-antena mais complexa, com um aumento máximo de sensibilidade de 3 dB. Considerando uma POF-antena de $L = 2$ cm onde $n = 1,6$ seja o índice de refração do poliestireno, teremos um tempo de atraso máximo de $\Delta t = L/v = Ln/c = (2 \times 10^{-2} \times 1,6)/(3 \times 10^8)$

$\sim 1,07 \times 10^{-10} \text{ s} \sim 0,1 \text{ ns}$. Invertendo Δt , teremos $f = 1 / \Delta t = 1 / (1,07 \times 10^{-10}) \sim 9,4 \text{ GHz}$, de forma que a implementação de reciclagem de luz em nada irá afetar um enlace VLC funcionando em $\sim 10 \text{ MHz}$, ou até mais do que isto.

(d) Pode-se utilizar um fotodiodo com pré-amplificação por transimpedância (TIA) de maior ganho, porém com menor banda que o utilizado nesta Dissertação (PDA com $G_{\text{TIA}} = 10 \text{ k}\Omega$ e 150 MHz de banda). Em princípio, é também possível o uso dos fotodiodos em avalanche (APDs) seguidos ou não de pré-amplificação TIA, o que deverá aumentar o ganho por 1 ou 2 ordens de grandeza, sem comprometer a banda. Entretanto, para o uso de APDs, deve-se levar em conta o seu custo mais alto, necessidade de alimentação com alta voltagem em até 250 V e que geram sinais mais ruidosos quando se compara com um fotodiodo de Si PIN. FotoDarlingtons e fototransistores são capazes de prover pré-amplificação mesmo sem o uso de um TIA, resultando em um grande ganho. Porém a banda fica tipicamente limitada a centenas de kHz, valor em geral inadequado para o VLC.

(e) Nesta Dissertação, a escolha foi a de uma POF-antena filamentar tão curta quanto possível por razões já anteriormente explicadas. Uma forma de aumentar a sensibilidade da antena é aumentar a sua área de abertura, o que poderá significar uma estrutura não-filamentar de proporções maiores. Tal implementação deverá resultar em uma POF-antena em uma versão não compacta, de menor portabilidade e praticidade.

2º) Otimização da fonte de luz ou transmissor

(f) Do ponto de vista do enlace transmissor-receptor ($\sim 1 \text{ m}$), o uso de um LED ou matriz de LEDs com encapsulamento do tipo domo transparente talvez não seja o mais adequado. Isto deve-se ao fato de que o domo age como uma lente com distância focal muito curta, o que significa que o “*spot-size*” de luz abre muito rápido depois deste ponto focal, diluindo bastante a iluminação e gerando um módulo de vetor de Poynting muito baixo quando incide na POF-antena. Pode então ser interessante diminuir o ângulo de divergência efetivo da fonte óptica. Isto pode ser conseguido utilizando uma lente ou sistema de lentes logo após o LED ou LEDs que não necessariamente tenham domos. A luz do LED pode sair de uma fibra óptica, pode sair de um ou mais LEDs com o domo polido, etc. Deve-se notar que para o cenário imaginado desta Dissertação, a diminuição do diâmetro do *spot-size* luminoso não irá acarretar qualquer problema de iluminação já que a finalidade é a de iluminar um dispositivo móvel nas mãos de um usuário sentado em uma poltrona. Porém, teremos uma maior relação sinal/ruído no enlace VLC já que o módulo do vetor de Poynting fica aumentado.

(g) Nesta Dissertação, foi escolhido um transmissor óptico formado por apenas 1 LED (azul ou branco). A idéia não foi ainda a de otimizar um enlace VLC, mas sim caracterizar a sensibilidade das POF-antenas de forma *comparativa*, ou seja, sempre utilizando um único LED como fonte luminosa. É comum utilizar uma matriz de LEDs brancos para propósitos de iluminação, o que naturalmente deverá aumentar a densidade de potência óptica que chega na POF-antena, desde que cada LED branco da matriz emita uma potência similar ao LED único. Quanto ao número de LEDs brancos da matriz, deverá implicar em uma maior potência recepcionada, porém poderá ser mais difícil de diminuir a divergência angular do feixe óptico.

(h) Ao invés do uso de LED branco, pode-se utilizar um LD branco como por exemplo o *Albalux FM da Laser Components* [66]. Alternativamente, usar um LD azul (ou talvez verde) ao invés de LEDs brancos. Em ambos os casos, a questão da segurança ocular deverá ser levada em conta, assim como o circuito de polarização do LD deverá levar em conta as variações de temperatura quanto a estabilidade da potência óptica emitida. Os LDs brancos teriam de ser caracterizados para mostrar se apresentam maior potência emitida, banda maior que os LEDs brancos, maior facilidade de colimação do feixe, iluminação mais eficaz, etc.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de receptores VLC baratos, sensíveis, rápidos, compactos e que tenham um amplo campo de visão (FoV) [67] é um desafio importante para enlaces VLC.

Pode-se concluir sobre a possibilidade de usar uma POF-PMMA comum como antena-óptica, porém com ranhuras superficiais como forma de aumentar o seu poder de espalhamento óptico e então a sua eficiência de captura luminosa. Porém, foi a FPOF-vermelha foi a que exibiu o melhor resultado, ou seja, um poder de captura luminosa significativamente maior. Além disso, pode-se observar que POFs fluorescentes riscadas superficialmente exibiram uma eficiência melhorada de 1,2 dB com relação a mesma fibra *in natura*. Numericamente falando, este trabalho mostrou ser possível obter respostas da “antena óptica” do *low signal* (< -60 dBm) para a PMMA *in natura* até $-14,6$ dBm com a FPOF-vermelha riscada a frio. Então, obteve-se uma melhora na captura de luz de pelo menos $-14,6$ dBm $- (-60$ dBm) = $+45,4$ dB em condições experimentais bastante similares.

Finalmente, foi aqui mostrado, que a “antena óptica” receptora com FPOF respondeu temporalmente à incidência de um tom senoidal em pelo menos 10 MHz.

Técnicas para aumentar a captura de luz via espalhamento e/ou fluorescência devem ser mais a fundo investigadas. Ficando como possíveis implementações futuras estas investigações de Técnicas para aumentar a captura de luz. Investigações das POFs fluorescentes riscadas superficialmente que teve o potencial de exibir uma eficiência ainda maior e aprofundamento de estudos sobre respostas temporais à incidência de tons senoidais modulados.

Referências

- [1] <https://g1.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2019/04/04/coreia-do-sul-antecipa-lancamento-da-rede-5g-e-e-1-o-pais-a-oferecer-a-tecnologia.ghtml>
- [2] <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-07/operadoras-comecam-testes-no-brasil-da-tecnologia-5g>
- [3] Reducing grayscale value fluctuation for mobile-phone camera-based VLC system.
- [4] Optical Camera Communication
- [5] <https://www.infoledbh.com.br/blog/o-que-e-o-led#:~:text=chama do%20de%20e letro luminesc%C3%Aancia.-,LED%20significa%20diodo%20emissor%20de%20luz.,emitir%20apenas%20a%20cor%20vermelha>
- [6] <https://www.elprocus.com/bipolar-led-driver-circuit-working-application/>
- [7] <https://www.elprocus.com/bipolar-led-driver-circuit-working-application/> [8]<http://www.ft.unicamp.br>
- [9] Tese Proposta e Avaliação de um Sistema Complementar de Posicionamento baseado em Comunicação por Luz Visível aplicado em Sistemas Inteligentes de Transportes, 2018, SP-
- Renata Maria Marè
- [10] Dissertação Iluminação Pública no contexto das Cidades Inteligentes, 2019, RJ- Larissa Paredes Muse.
- [11] Iluminação de LEDe sustentabilidade combinam com a indústria?

- <https://grupomb.ind.br/iluminacao-de-led/>
- [12] Iluminação Pública Inteligente - <https://intelilight.eu/iluminacao-publica-inteligente/>
- [13] Benefícios Iluminação Pública Inteligente
- [14] Datasheet LED DieMount [15]Fonte: <http://researchgate.com>
- [16] <https://melhorcompra.001shop.com.br/>
- [17]https://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2003_1/stein/radio.html
- [18] https://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2003_1/stein/radio.html
- [19] <https://slideplayer.com.br/slide/374628/>
- [20] https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifi1/pagina_5.asp
- [21] <https://teleco.com.br/EnlaceOptico>
- [22] <https://teleco.com.br/EnlaceOptico>
- [23] <http://www.fsona.com/technology>
- [24] https://www.maxwel.vrac.puc-rio.br/7690/7690_2.PDF
- [25] <https://www.teleco.com.br/FSO>
- [26] <https://www.teleco.com.br//EnlaceFSO>
- [27] Artigo LI-FI (LIGHT-FIDELITY): UMA LUZ NA EVOLUÇÃO DAS COMUNICAÇÕES√ 2015, Pablo Amaral de Carvalho - Juiz de Fora
- [28] TECNOLOGIAS LED EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO VLC.Eduardo M. Viera - 2017
- [29] A. Sarkar, S. Agarwal and A. Nath, “LiFi Technology: Data Transmission through Visible Light,” Int. J. of Advance Research in Computer Science and Management Studies, vol. 3, issue 6, pp. 1-12, June 2015
- [30] Comunicação por Luz Visível: Conceitos, Aplicações e Desafios - Luiz Eduardo Mendes Matheus
- [31] Monografia Título: VLC - Comunicação Óptica por Luz Visível -Vilmey Francisco Romano Filho Brasília, DF 2015
- [32] Fonte:Adaptada pela

autora

<https://www.canstockphoto.com.br/passageiros-v%C3%A1rio-assentos-avi%C3%A3o-43469473.html>

[33] <http://netlab.ice.ufjf.br/publications/2017/sbrcl Luiz2017.pdf>

[34] <https://www.google.com.br/computerpng>

[35] <https://www.google.com.br/peopleconnected>

[36] Dissertação : INTERNET DAS COISAS: CONTROVÉRSIAS NAS NOTÍCIAS E REDES TEMÁTICAS - TALYTA SINGER - Salvador - 2014

[37] Lemos; Marques (2019, p. 2):

[38] <https://www.google.com.br/iotconnected>

[39] Artigo : Fast wavelength conversion to generate 560 nm fluorescence for data transmission in polymer optical fibres - Ricardo Marques Ribeiro - 2015

[40] Luminescent detector for free-space optical communication-T. PEYRONEL,- 2016

[41] Wide field-of-view fluorescent antenna for visible light communications beyond the étendue limit PAVLOS P. MANOUSIADIS-2016

[42] <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica-paranormal/como-funciona/4715-art1181.html>

[43] <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica-paranormal/como-funciona/4715-art1181.html>

[44].Mark G. Kuzyk, “Polymer Fiber Optics: Materials, Physics and Applications (Optical Science Engineering)”, Taylor & Francis (2006).

[45] Datasheet IFD92

[46] Datasheet IFD93

[47] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, POF Handbook

[48] TCC Transmissão de sinais de áudio analógico via fibras ópticas plásticas de PMMA - Juliana Oliveira de Paula - 2018

- [49] Artigo Antena de Fibra Ótica Plástica como receptora em um enlace VLC, SBrT 2021 [50]An experimental setup for fluorescence measurement, J.F. Pavoni
- [51]<https://www.scielo.br/j/rbef/a/FTGc3r8wXmJjCm6KzkyqbLp/?lang=pt>
- [52] Artigo Antena de Fibra Ótica Plástica como receptora em um enlace VLC, SBrT 2021 [53]<https://repositorio.bc.ufg.br>
- [54]https://www.researchgate.net/figure/Figura-11-Arquitetura-e-design-de-um-LED-de-en-capsulamento-hemisferico_fig1_263124795
- [55]<https://www.ft.unicamp.br/~lfavila/FT067/Aula%201%20-%20Introdu%e7%e3o,%20La>
sers.pdf
- [56] <https://www.ft.unicamp.br/~lfavila/FT067/Aula%201%20-%20Introdu%e7%e3o,%20La> sers.pdf
- [57] D
Atashee
t MPO
- [58]Dat
asheet
PDA
- [59] https://repositorio.fei.edu.br/bitstream/FEI/447/1/ful_text.pdf -
Estudo Comparativo de Tecnologias Cmos e Soi-cmos aplicadas a
fotodiodos laterais pin , Carla Dick De Castro Pinho Novo- 2013
- [60] <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4715-art1181>
- [61] Foto adaptada pela
autora <https://www.depositphotos.com%2Fvector-images%2Fcelular>
- [62] Foto adaptada pela
autora <https://www.depositphotos.com%2Fvector-images%2Fcelular>
- [63]M. Poppendieck and D. Brown,“Control of Light Output from Plastic Optical Fiber with Optical Elements,” pp. 580-584, 1996

[64] Zanon, M -Demultiplexadores para WDM sobre fibras ópticas plásticas com base em filtros gel

[65] “ Fast wavelength conversion to generate 560 nm fluorescence for data transmission in polymer optical fibres” Electronics Letters 2015 e ICPOF 2015- R.M. Ribeiro, V.N.H. Silva,A.P.L. Barbero,C.M. Alves,C.R.L.

Rodrigues

[66][https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_](https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home)
[upload/home](https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home)

[e/Datasheets/laser-modules/albalux-fm-white-light-fiber-coupled-module.pdf](https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home)

&no_cache=1 [67]Visible light communication (VLC) is a green technology, which uses light emitting diodes (LED) for both illumination and data communication.

Apêndices

Artigo Publicado no Artigo Aceito no SBtT (Simpósio Brasileiro de Telecomunicações) 2021.

Antena de Fibra Ótica Plástica como receptora em um enlace VLC

Juliana Oliveira de Paula, Departamento de Engenharia de Telecomunicações Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ – Brasil, e-mail: juliana.oliveira@id.uff.br; Ricardo Marques Ribeiro Departamento de Engenharia de Telecomunicações Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ – Brasil, e-mail: rmr@telecom.uff.br

Juliana Oliveira de Paula e Ricardo Marques Ribeiro

Resumo: O presente artigo apresenta os primeiros passos do desenvolvimento de um dispositivo que funciona como um receptor de luz na faixa visível, uma antena ótica. A ideia central é utilizar um pequeno segmento de fibra ótica plástica (POF) de PMMA ou de poliestireno fluorescente em sistemas VLC (Visible Light Communications).

Palavras-chave: *visible light communications; plastic optical fiber; scattering; fluorescence;*

Abstract: This article presents the first steps of the development of a device that works as a light receiver in the visible range, an optical antenna. The central idea is to use a small segment of plastic optical fiber (POF) from PMMA or fluorescent polystyrene in VLC (Visible Light Communication) systems.

Keywords: *Paper template, MS Word, SBtT 2021.*

I. INTRODUÇÃO

Vivemos um fenômeno de constante mudança e evolução tecnológica, em que dispositivos em rede estão sendo incorporados em diversos segmentos de nossa rotina. São transformações que acontecem em grande velocidade e que provocam profundas modificações nas nossas formas de viver, pensar, ser e agir. Essa multiplicidade de dispositivos, sensores e equipamentos conectados em rede, no que se conhece por Internet das Coisas (IoT) [1] causa um aumento na demanda por banda larga. Dessa forma, com a densificação que essa alta demanda causa no espectro de rádio que já se encontra limitado, além de problemas de interferência, banda requerida na faixa de Gb/s para cada dispositivo a tecnologia de Comunicações por Luz Visível (VLC – Visible Light Communications, atualmente chamada de LiFi (light Fidelity) [2], torna-se interessante e tem sido bastante explorada nos últimos anos, sem o intuito de substituir o Wifi [3] e, sim, complementá-lo.

O fato de que para esse sistema de comunicação não se torna necessário o licenciamento ou reserva de

espectros de frequência, ou até mesmo o fracionamento do espectro de frequência com outros serviços, verificou-se uma maior importância aos meios de Comunicação Ótica sem fio, visando oferecer disponibilidade a todo o momento e com velocidades de transmissão cada vez maiores, apresentando-se como alternativa promissora. Além disso, uma vantagem de termos um enlace VLC é o fato de não ser afetado pela turbulência atmosférica como os sistemas FSO atmosférico [4]. Porém, a VLC é afetada pela mobilidade de pelo menos um dos dispositivos envolvidos [5]. Adicionalmente, a VLC (indoor), mais do que o FSO tradicional (outdoor), é mais afetada pelos requisitos de segurança ocular [6], o que implica em princípio na utilização quase que obrigatória de LEDs ao invés de LDs (*Laser Diodes*) como fonte ótica. Nesse contexto, este trabalho supõe como cenário de aplicação real, um enlace VLC entre um transmissor óptico fixo a LED posicionado em até cerca de 1m de distância de um receptor ótico móvel. Este último, consiste de um pequeno segmento (poucos cms) de POF de PMMA ou fluorescente, funcionando como uma espécie de “antena ótica”. Dessa forma, são descritos resultados experimentais iniciais do *Receptor-VLC*. [6]

II. O RECEPTOR-VLC: CAPTURA DE LUZ

A Figura 1 mostra esquematicamente uma montagem experimental simples, destinada a verificar preliminarmente o desempenho em sensibilidade de alguns tipos de “antenas óticas” plásticas. Está destacado por um retângulo pontilhado o desenho esquemático do *receptor-VLC*, que consiste essencialmente de uma “antena ótica” envolta por um tubo capilar de vidro de diâmetro interno 1,10 mm e comprimento 75 mm para melhor sustentação da antena. Destacado em amarelo,

modelo PM20A da **Thorlabs** com -50 dBm de sensibilidade. A escolha do super bender gel para crinela se deve ao fato dele proporcionar uma média de perda por inserção de até $0,4$ dB [7].

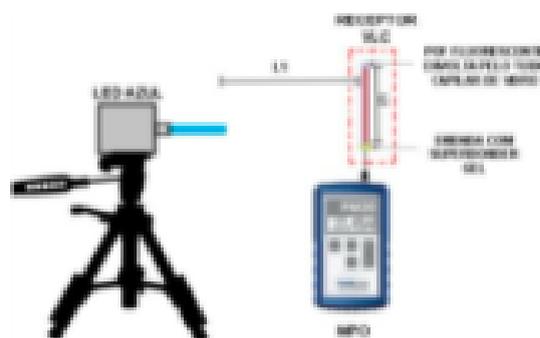


Fig. 1. Diagrama esquemático da montagem experimental para caracterização comparativa de alguns tipos de “antenas ópticas” planares. O símbolo pontilhado destaca o receptor-VLC.

O experimento foi dividido em 2 ciclos de caracterização. O primeiro a nível comparativo para avaliar qual POF teria melhores resultados e o segundo ciclo foi de caracterização da POF que tivera melhores resultados no primeiro ciclo com aprimoramentos nas crinelas tornando resultados promissoras. Em um primeiro momento, quatro tipos distintos de “antenas ópticas” foram caracterizadas: 1º) POF PMMA in natura, 2º) POF PMMA com ranhuras a quente, 3º) POF PMMA com ranhuras a frio e 4º) POF de poliestireno fluorescente, modelo IF-810087 da Industrial Fiber Optics (USA). Em todos os quatro casos, a cobertura (opaca) protetora de policetileno foi cuidadosamente retirada. A ideia foi a de conseguir guiar pela POF no sentido do fotodiodo, a máxima potência óptica incidente externamente pelo LED azul posicionado perpendicularmente ao fotodiodo. O comprimento físico das “antenas ópticas” foi de $L_2 = 5$ cm. Uma mesma lâmina metálica tanto na temperatura ambiente quanto aquecida foi utilizada para imprimir ranhuras nas “antenas ópticas” a “frio” e a “quente”, respectivamente.

As ranhuras foram feitas tangencialmente e de forma superficial com periodicidade de 1 mm ao longo de L_2 . A “frio”, estimam-se ranhuras gravadas com profundidade de $0,1$ mm enquanto que a “quente”, pouco mais, de $\approx 0,2$ mm. A ideia das ranhuras foi a de aumentar o poder espalhador da POF através do mecanismo de espalhamento Mie, e portanto do poder de captura [8]. Nas medidas com as fibras de PMMA (5 amostras cada), o MPO foi configurado para 460 nm, enquanto que com a POF fluorescente (1 amostra), ≈ 635 nm. Todas

as medidas foram realizadas em ambiente escuro.

A princípio, o LED azul (≈ 460 nm) compatível com a VLC e com potência óptica de saída nominalmente em 4 mW (@ 20 m). A escolha para a excitação da “antena óptica” deve-se ao seguinte: 1º) Para as fibras óticas, incluindo as POFs de PMMA, o espalhamento Rayleigh é mais intenso quanto menor o comprimento de onda, 2º) no caso da POF fluorescente, obtém-se maior potência fluorescente via excitação com luz azul, quando se compara, por exemplo, com excitação usando a luz de um LED verde (520 nm) [9]. Uma desvantagem no 1º caso é a menor responsividade exibida pelos fotodiodos de silício no azul. Conforme Figura 1, a distância entre o transmissor e o receptor-VLC foi fixada em $L_1 = 10$ cm. Com a POF PMMA in natura não foi possível observar sinal para uma distância de $L_1 = 10$ cm. A Tabela 1 mostra comparativamente os níveis de potência luminosa produzidos nas “antenas óticas” para $L_1 = 10$ cm, conforme a leitura no MPO nos ciclos 1 e 2.

Da Tabela 1, nota-se a baixa eficiência de captura da POF PMMA in natura que ficou no nível low signal, que no medidor de potência ótica, é no máximo

-50 dBm, o que nos leva a estimar um aumento na eficiência de captura de pelo menos 13 dB em relação às antenas com ranhuras. Pode-se também notar que não fez diferença realizar ranhuras a frio ou a quente.

Entretanto, a POF fluorescente vermelha apresentou um poder de captura 6 dB maior quando se compara com qualquer das POFs PMMA com ranhuras. Com a POF fluorescente, deve-se notar que ocorre uma conversão de comprimento de onda de 460 nm para ≈ 635 nm. Um fotodiodo de Si possui maior responsividade em 635 nm quando se compara com 460 nm.

TABELA 1. Resultados comparativos de nível de sinal óptico produzido pelas “antenas óticas” a 10 cm de distância de LED azul emissor no ciclo 1 e ciclo 2.

POF	Potência de saída	POF	Potência de saída
Ciclo 1		Ciclo 2	
PMMA in natura	Low signal	PFV in natura	$102,0 \mu\text{W}$
PMMA w/ ranhuras a quente	$202,5 \mu\text{W}$	PFV w/ ranhuras a quente	$162,1 \mu\text{W}$
PMMA w/ ranhuras a frio	$203,0 \mu\text{W}$	PFV w/ ranhuras a frio	$161,1 \mu\text{W}$
Poliestireno fluorescente vermelha (PFV)	$199,3 \mu\text{W}$	-	-

III. CONCLUSÕES

Pode-se concluir preliminarmente sobre a possibilidade de usar PCF PMMA comum com ranhuras superficiais como forma de aumentar o seu poder de espalhamento ótico e, então, a sua eficiência de captura. Porém, a PCF fluorescente foi a que exibiu o melhor resultado. Pode-se inferir que PCFs fluorescentes riscadas superficialmente tem o potencial de exibir uma eficiência ainda maior, o que deverá ser uma das vertentes de futuras pesquisas neste tema. Técnicas de se aumentar a captura de luz via espalhamento devem ser mais a fundo investigadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal Fluminense e ao Laboratório de Comunicações Ópticas.

REFERÊNCIAS

- [1] Demirkol, I., Campo-Mor, D., Paradis, J., Corbelli, M., Popoola, W., & Haas, H. (2019). *Powering the internet of things through light communication*. IEEE Communications Magazine, 57(6), 107-113.
- [2] Borchardt, H., Serafimovski, N., Tsonev, D., Vukobratovic, S., & Haas, H. (2014). *VLC: Beyond point-to-point communication*. IEEE Communications Magazine, 52(7), 98-105.
- [3] A. Sarkar, S. Agarwal and A. Nath, "LiFi Technology: Data Transmission through Visible Light," Int. J. of Advance Research in Computer Science and Management Studies, vol. 3, issue 6, pp. 1-12, June 2015.
- [4] De Oliveira G, Silva VN, Barbosa AP, Ribeiro RM, Coelho T V, Dos Santos AB. Measurements of indoor/outdoor atmospheric turbulance through optical LiFi propagation method. Measurement Science and Technology. 2017 Apr 6;28(3):035207.
- [5] A. C. Rousounides, P. Chatziminis, Z. Ghazzanary, M. Uysal and E. Vamvakopoulos, "Standards for Indoor Optical Wireless Communications," IEEE Communications Magazine - Communications Standards Supplement, pp. 20-31, March 2015.
- [6] [Silva V. N. H., Oliveira, J., Ribeiro, R. M., Silva, V. N. H., Barbosa, A. P. L. Receptor de Comunicações por Luz Visível \(VLC\) Usando Antena de Fibras Ópticas Plásticas. MOJAG 2020](#)
- [7] Zanon, M. [Desenvolvimento para WDM sobre fibras ópticas plásticas com base em](#) [DOI:10.1002/ol](#)
- [8] M. Poppendieck and D. Bryson, "Control of Light Output from Plastic Optical Fiber with Optical Elements," pp. 580-593, 1996.
- [9] Ribeiro, R. M., Silva, V. N. H., Barbosa, A. P. L., Aires, C. M., & Rodrigues, C. R. L. (2015). *Fast wavelength conversion by grating 500 nm fluorescence for data transmission in polymer optical fibers*. Electronics Letters, 51(2), 168-170.

Artigo Publicado no MOMAG (Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica)2020

Receptor de Comunicações por Luz Visível (VLC) Usando Antena de Fibra Óptica Plástica

Coordenação de
Telecomunicações CEFET – RJ -
Maricará
Rio de Janeiro, RJ - Brasil
claudia.marcondes@cefet-rj.br

Antonio A. C. Batista, Juliana O. Paula, Andréis P.
L. Barbero, Ricardo M. Ribeiro e Vinícius N. H. Silva
Departamento de Engenharia de
Telecomunicações Universidade Federal Fluminense
Niterói, RJ – Brasil
antonio.cadado@hotmail.com, juliana_oliveira@id.uff.br

Resumo— Neste artigo apresenta-se os primeiros passos no desenvolvimento de uma “antena” ótica. A ideia central é utilizar um pequeno segmento de fibra óptica plástica (POF) de PMMA ou de poliestireno fluorescente, com espalhamento aumentado ou não, acoplada à um fotodiodo para aumentar a captação da luz e o campo de visão em sistemas VLC (Visible Light Communication).

Foram realizadas medidas de caracterização do receptor-VLC visando um aumento do seu poder de captação de luz e a ampliação/planificação de sua resposta óptica angular de $0^\circ - 90^\circ$. Esta última, deverá permitir um enlace fora-de-visual quando se compara com apenas o fotodiodo operando como receptor-VLC.

Palavras-chave—comunicações por luz visível; fibra óptica plástica; espalhamento; fluorescência; campo-de-visual

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de Comunicações por Luz Visível (VLC – *Visible Light Communication*, atualmente chamada de *LiFi*), tem sido bastante explorada nos últimos anos [1]. O intuito, obviamente, não é substituir o *WiFi* [1], mas complementá-lo. A razão do interesse crescente no VLC se concentra no fato de se utilizar a luz visível para transmitir dados. Isso significa em aproveitar, por exemplo, luz ambiente de salas, semáforos e postes de luz para transmissão de dados através de uma portadora ótica cuja capacidade é potencialmente maior que portadoras no espectro de rádio frequência (RF). Em algumas aplicações específicas, como por exemplo hospitais ou locais em que interferências de RF são um problema, o *LiFi* se apresenta como uma solução bastante interessante para comunicação de dados [2].

Destaca-se ainda, o aumento da demanda por banda que vem sendo pressionada pelo crescimento de dispositivos, sensores e equipamentos conectados na rede, no que se conhece por Internet das Coisas (IoT) [3]. Assim, requisições em massa de conexões que eventualmente não poderiam ser atendidas por enlaces de rádio devido a limitação na disponibilidade do espectro eletromagnético, problemas de interferência, banda requerida na faixa de GHz para cada dispositivo, etc, poderiam ser atendidas em conjunto através de um sistema VLC.

Um enlace VLC não é afetado pela turbulência atmosférica como os sistemas FSO atmosférico [4]. Porém, a VLC é afetada pela mobilidade de pelo menos um dos dispositivos envolvidos [6]. Adicionalmente, a VLC (*receptor*) mais do que o FSO tradicional (*emissor*), é mais afetada pelos requisitos de segurança ocular [6], o que implica em princípio na utilização quase que obrigatória de LEDs ao invés de LDs (*Laser Diodes*) como fonte óptica. Nesse contexto, este trabalho supõe como cenário de aplicação real, um enlace VLC entre um transmissor óptico fixo a LED posicionado em até cerca de 1m de distância de um receptor óptico móvel. Este último, consiste de um pequeno segmento (poucos cm) de POF de PMMA ou fluorescente, funcionando como uma espécie de “antena óptica” por sua vez acoplado a um fotodiodo de pequena área. Desta forma, são descritos resultados experimentais visando um aumento do sinal óptico capturado assim como a ampliação do campo-de-visual (FOV) e planicidade da resposta óptica angular do receptor-VLC [7][8].

II. O Receptor-VLC: CAPTURA DE LUZ

A Figura 1, mostra esquematicamente uma montagem experimental simples, destinada a verificar preliminarmente o desempenho em sensibilidade de alguns tipos de “antenas ópticas” plásticas. Está destacado

Claudia B. Marcondes

um retângulo perfurado o desenho esquemático do **receptor-VLC**, que consiste essencialmente de uma "antena óptica" acoplada a um fotodiodo integrado de um medidor de potência óptica (MPO), modelo PM20A da **Troxelabs** com ~ 50 dBm de sensibilidade.

As "antenas ópticas" caracterizadas foram de quatro tipos distintos: 1^o) POF PMMA *de natureza*, 2^o) POF PMMA com ranhuras a quente, 3^o) POF PMMA com ranhuras a frio e 4^o) POF de policistireno fluorescente, modelo IF-810087 da **Industrial Fiber Optics** (USA). Em todos os quatro casos, a cobertura (opaca) protetora de polietileno foi cuidadosamente retirada. A ideia, foi a de conseguir guiar pela POF no sentido do fotodiodo, a medida com as fibras de PMMA (5 amostras cada), o MPO foi configurado para 460 nm, enquanto que com a POF fluorescente (1 amostra), ~ 635 nm. Todas as medidas foram realizadas em ambiente escuro.

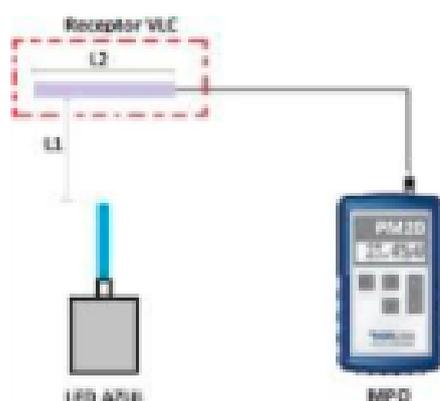


Fig. 1. Diagrama esquemático da montagem experimental para caracterização de algumas L_2 de "antenas ópticas" plásticas. L_1 fibra óptica perfurada de saída e **receptor-VLC**.

Para esta primeira etapa de caracterização, foi escolhido como transmissor óptico apenas um LED com acoplamento em POF da **Dicromat GmbH** emitindo no azul (~ 460 nm), com potência óptica de saída nominalmente em 4 mW@ 20 mA. A extremidade livre da POF acoplada ao LED (NA = 0,5), foi simplesmente clivada, resultando em um ângulo de divergência de saída de luz em $\sim 60^\circ$.

Em princípio, o LED azul (compatível com a VLC) escolhido para a excitação da "antena óptica", deve-se ao seguinte: 1^o) Para as fibras óticas, incluindo as POFs de PMMA, o espalhamento Rayleigh é mais intenso quanto menor o comprimento de onda e 2^o) no caso da POF fluorescente, obtém-se maior potência fluorescente via

máxima potência óptica incidente externamente pelo LED azul posicionado perpendicularmente ao fotodiodo. O comprimento físico das "antenas ópticas" foi de $L_2 = 5$ cm. Uma mesma lâmina metálica, tanto na temperatura ambiente quanto aquecida, foi utilizada para imprimir ranhuras nas "antenas ópticas" a "frio" e a "quente", respectivamente. As ranhuras foram feitas tangencialmente e de forma superficial com periodicidade de 1 mm ao longo de L_2 . A "frio", estímulam-se ranhuras gravadas com profundidade de 0,1 mm enquanto que a "quente", pouco mais de $\sim 0,2$ mm. A ideia das ranhuras, foi a de aumentar o poder espalhador da POF através do mecanismo de espalhamento Mie, e portanto do poder de captura [9]

excitação com luz azul, quando se compara, por exemplo, com excitação usando a luz de um LED verde (520 nm) [10]. Uma desvantagem no 1^o caso, é a menor responsividade exibida pelos fotodiodos de silício no azul.

Conforme o esquema da Figura 1, a distância entre o transmissor e o **receptor-VLC** foi fixada em $L_1 = 10$ cm. Com a POF PMMA *de natureza* não foi possível observar sinal para uma distância de $L_1 = 10$ cm. A Tabela 1 mostra comparativamente os níveis de potência luminosa produzidos por cada grupo das "antenas ópticas" para $L_1 = 10$ cm, conforme a leitura no MPO.

Tabela 1. Resultados comparativos do nível de sinal óptico gerado pelas "antenas ópticas" a 10 cm de distância de LED azul excitas.

Da Tabela 1, nota-se a baixa eficiência de captura da POF PMMA *de natureza* que ficou no nível *low signal*, que no medidor de potência ótica, é no máximo ~ 50 dBm, o que nos leva a estimar um aumento na eficiência de captura de pelo menos 13 dB em relação as antenas com ranhuras.

Pode-se também notar que não fez diferença realizar ranhuras a frio ou a quente. Entretanto, a POF fluorescente vermelha apresentou um poder de captura 6 dB maior quando se compara com qualquer das POFs PMMA com ranhuras. Com a POF fluorescente, deve-se notar que ocorre uma conversão de comprimento de onda de 460 nm para ~ 635 nm. Um fotodiodo de Si

possa

maior responsividade em 635 nm quando se compara com 460 nm.

III. RESPOSTA ÓPTICA ANGULAR DO RECEPTOR-VLC

A Figura 2, mostra esquematicamente a montagem experimental utilizada para caracterizar o receptor-VLC em sua resposta óptica ao ângulo de incidência do feixe luminoso.

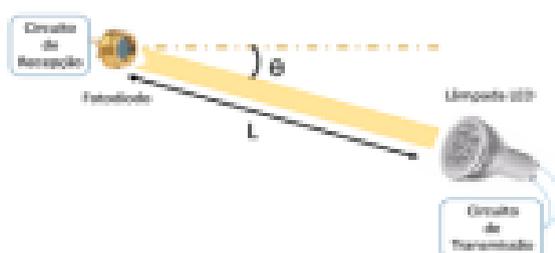


Fig. 2. Diagrama esquemático da montagem experimental para caracterizar a resposta óptica angular do receptor-VLC aqui descrito.

A montagem experimental esquematizada na Fig. 2, consiste em uma base fixa onde o fotodetector (PD) é posicionado e aí permanece imóvel. Ao longo de uma haste com comprimento $L = 1m$, uma lâmpada-LED (3W/12V) de luz branca não-coerente com alimentação DC, era encasada e podia ser transladada ao longo da referida haste. Desta forma, a haste permitia que a

lâmpada avançasse ou recuasse em direção ao fotodetector (PD). A haste também podia ser girada de forma controlada, em um

ângulo θ total de 90° com centro coincidente com o fotodiodo ou com o ponto médio da "antena óptica" em 90° . Agora, ao invés do MPO, foi utilizado como parte do receptor-VLC um fotodiodo de Si da Thorlabs modelo FD8010. Este último, alimentado por um circuito de polarização sem amplificação, mas dotado de um filtro de ruído RC (passa-baixa) de forma a suprimir contribuições espúrias dos 60 Hz da rede de energia. O aparato permitiu então realizar medidas de resposta óptica angular do receptor-VLC no intervalo $0^\circ - 90^\circ$, de 5 em 5° para diversas distâncias radiais \leq Improvemente fixadas.

Um experimento preliminar, sem a "antena óptica" e com ângulo ajustado em 0° , permitiu constatar que o sinal elétrico de saída do PD saturava para distâncias PD-lâmpada iguais ou menores que ~ 20 cm. Então, a referida distância radial foi fixada em 50 cm e uma varredura angular de referência, sem a "antena óptica", mas apenas como fotodiodo recebendo luz foi realizada.

As "antenas ópticas" foram simplesmente acopladas ao fotodiodo em *butt-to-but*, de forma similar ao que foi feito anteriormente. Nesta etapa, foi fabricada numa impressora 3D

uma pequena guia (*sleeve*) plástica para realizar o referido acoplamento. A seguir, a varredura angular foi repetida usando um POF PMMA *in natura*, seguindo-se de 3 "antenas ópticas" de POF poliestireno fluorescente nos modelos verde (IF-810082), amarelo (IF-810083) e vermelho (IF-810087). Em todas as medidas, o comprimento de cada "antena óptica" do receptor-VLC foi fixado em 6 cm. Os resultados das varreduras angulares estão mostrados nos gráficos da Figura 3.

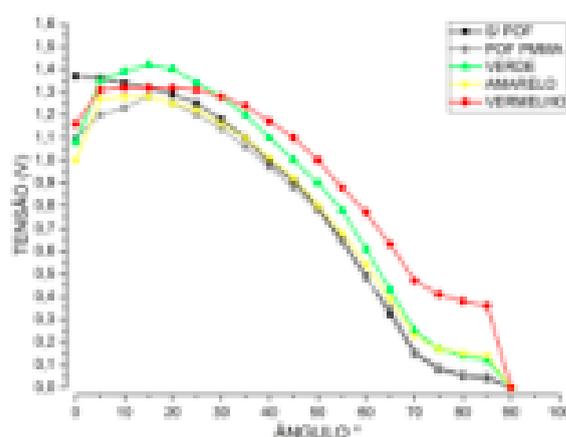


Fig. 3. Curvas de resposta óptica angular do receptor-VLC dotado de diversas "antenas ópticas" considerando uma distância radial de 50 cm emissor-receptor.

Podem-se notar dos gráficos da Fig. 3 que a resposta com fotodiodo puro, até cerca de 45° , foi pouco melhor do que o uso da POF PMMA *in natura*. As razões são: fotodiodo

Antena de Fibra Óptica Plástica como Detectora em Enlaces LiFi

Juliana O. de Paula, Maristela Ciara e Ricardo M. Ribeiro, Departamento de Engenharia de Telecomunicações Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ – Brasil, juliana.oliveira@id.uff.br; maristela.ciara@id.uff.br; ricardo@id.uff.br; Vinicius N. H. Silva, Instituto de Telecomunicações, Coimbra, Portugal, vinicius.silva@ict.utp.pt e Cláudia B. Marcondes, Coordenação de Telecomunicações, CEPET – RJ – Maracanã, Rio de Janeiro, RJ – Brasil, claudia.marcondes@cepet-ri.br.

Juliana O. de Paula, Maristela Ciara, Vinicius N. H. Silva, Ricardo M. Ribeiro e Cláudia B. Marcondes

Resumo—Este artigo apresenta o desenvolvimento de um dispositivo que funciona como um detector de luz na faixa visível, como uma “antena ótica”. A ideia central é utilizar um pequeno segmento de fibra óptica plástica (POF) de PMMA ou de poliestireno fluorescente (FPOF) para recepção em enlaces LiFi (Light Fidelity).

Palavras-Chave—comunicações por luz visível; fibra óptica plástica; espalhamento; fluorescência.

Abstract—This paper presents the development of a device that works as a light detector in the visible spectrum, like an “optical antenna”. The idea is to use a small strand of plastic optical fiber (POF) made from PMMA or fluorescent polystyrene (FPOF) in a LiFi-link (Light Fidelity) receiver.

Keywords—visible light communications; plastic optical fiber; scattering; fluorescence.

I. INTRODUÇÃO

Dispositivos em rede estão sendo incorporados em diversos segmentos de nossa rotina. Essa multiplicidade de dispositivos, sensores e equipamentos conectados em rede, ou Internet das Coisas (IoT) [1], causará um aumento na demanda por banda. Dessa forma, com a densificação, a alta demanda resultante deverá causar saturação no espectro de rádio, além de problemas de interferência. Bandas requeridas na faixa de Gb/s para cada dispositivo, deverão demandar a tecnologia VLC (Visible Light Communications) ou LiFi (Light Fidelity) [2], que tem sido bastante explorada nos últimos anos, sem o intuito de substituir o WiFi [3] e, sim, complementá-lo.

O LiFi é um sistema de comunicação que utiliza a luz visível como portadora. Devido aos requisitos de segurança ocular, esses sistemas utilizam quase que obrigatoriamente LEDs ao invés de LDs (Laser Diodos) como fontes ópticas. É um sistema que não requer licenciamento de espectro e sofre pouca influência de efeitos atmosféricos, como a turbulência nos sistemas FSO [4]. Porém, o LiFi é afetado pela mobilidade dos transceptores [5], sendo extremamente importante o aumento do campo de visão afim de atenuar erros de apontamento e conseqüentemente perda aumento da taxa de erro de bit e até perda da comunicação.

Este trabalho supõe como cenário de aplicação real, um enlace LiFi entre um transmissor óptico fixo a LED, posicionado em até cerca de 1m de distância de um detector óptico móvel. Este último, consiste em um pequeno segmento (poucos centímetros) de POF de PMMA ou fluorescente (FPOF), funcionando como uma espécie de “antena óptica” conectada à um fotodiodo para aumentar o campo de visão dele. Desta forma, são descritos resultados experimentais comparativos de captura óptica em dBm deste detector-LiFi.

II. O DETECTOR-LiFi: CAPTURA DE LUZ

A Figura 1 mostra esquematicamente uma montagem experimental simples, destinada a medir o poder de captura de luz de alguns tipos de “antenas ópticas” plásticas. Está destacado por um retângulo pontilhado vermelho o desenho esquemático do detector-LiFi, que consiste essencialmente de uma “antena óptica” com 1 mm de diâmetro envolta por um tubo capilar de vidro de diâmetro interno 1,10 mm e comprimento 75 mm para uma melhor sustentação da fibra. Destacado em amarelo, temos a emenda entre a antena e um pequeno segmento de POF feita com Superbondor em gel, proporcionando uma perda por inserção de ~ 0,4 dB [6]. O segmento de POF é acoplado à um fotodiodo integrado de um medidor de potência óptica (MPO) com -50 dBm de sensibilidade.

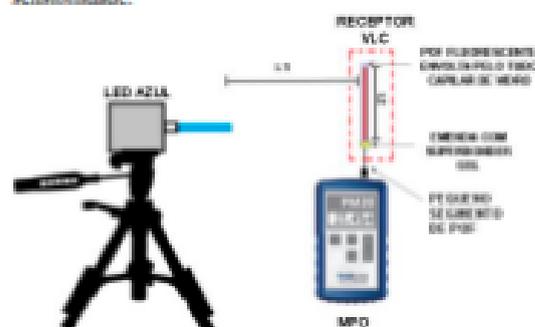


Fig. 1. Diagrama esquemático da montagem experimental. O retângulo pontilhado destaca o detector-LiFi.

As medidas foram divididas em 2 ciclos. O 1º ciclo, a nível comparativo, serviu para avaliar qual tipo de POF mostra maior poder de captura de luz onde as “antenas” eram simplesmente inseridas no conector de entrada do MPO, sem o invólucro de vidro. O 2º ciclo como mostra a Fig. 1, foi o de caracterização da POF de melhor resultado no 1º ciclo, incluindo aprimoramentos nas emendas. Quatro tipos distintos de “antenas ópticas” foram caracterizadas no 1º ciclo: 1º) POF *in natura*, 2º) POF com ranhuras feitas “a quente”, 3º) POF com ranhuras feitas “a frio” e 4º) FPOF (poliestireno fluorescente vermelho) modelo IF-310087 da Industrial Fiber Optics (USA). Em todos os quatro casos, a cobertura (opaca) protetora de polietileno foi cuidadosamente retirada. A ideia foi a de conseguir guiar pela POF no sentido do fotodiodo, uma máxima fração de potência óptica incidente externamente, esta última gerada por um LED azul posicionado perpendicularmente à fibra (Fig.1). O comprimento físico das “antenas ópticas” foi de $L_1 = 5$ cm nos 2 ciclos. Uma mesma lâmina metálica, tanto na temperatura ambiente quanto aquecida na mesma

temperatura de um ferro de soldar comum (~ 180 °C), foi utilizada para imprimir ranhuras nas “antenas ópticas” a “frio” e a “quente”, respectivamente. As ranhuras foram feitas tangencialmente e de forma superficial com periodicidade de ~ 1 mm ao longo de L_1 . A “frio”, estampa-se ranhuras gravadas com profundidade de 0,1 mm enquanto que a “quente”, pouco mais, de $\sim 0,2$ mm. A ideia das ranhuras, foi a de aumentar o poder espalhador da POP através do mecanismo Bragg, e, portanto, do poder de captura luminosa [7]. Todas as medidas foram realizadas em ambiente escuro com o MPO devidamente ajustado para receber medidas calibradas em 460 nm (POF-PMMA) ou 635 nm (FPOF-vermelha). A razão da escolha da “antena” com a POF-PMMA foi a de expor todo o comprimento L_1 ao campo luminoso externo minimizando a re-absorção da fluorescência no FPOF [8], se for o caso.

O LED azul (~ 460 nm) com potência óptica de saída nominalmente em 4 mW@20 mA foi escolhido para a excitação da “antena óptica” pelos seguintes motivos: 1°) O espalhamento Rayleigh é mais intenso quanto menor for o comprimento de onda e 2°) No caso da FPOF, obtém-se maior potência fluorescente via excitação com luz azul [8], o que pode-se também obter com LEDs brancos, amplamente utilizados no LiFi. Uma desvantagem no 1° caso, é a menor responsividade no azul exibida pelos fotodiodos de silício quando se compara com maiores comprimentos de onda. Conforme a Fig.1, a distância entre o transmissor e o receptor-VLC foi fixada em $L_2 = 10$ cm. As Tabelas 1 e 2 mostram comparativamente os níveis de potência luminosa (dBm) produzidos pelas “antenas ópticas”, conforme as leituras no MPO nos ciclos 1 e 2, respectivamente.

Da Tabela 1, nota-se a baixa eficiência de captura da POP *in natura* que fica no nível *low signal*. Como o MPO possui sensibilidade de ~ 50 dBm, isto não leva a estimar um aumento na eficiência de captura de pelo menos 13 dB gerada pelas antenas com ranhuras. Pode-se também notar que não faz diferença realizar ranhuras “a frio” ou “a quente”. Entretanto, a FPOF-vermelha apresentou um poder de captura 6 dB maior quando se compara com qualquer das POFs-PMMA com ranhuras. Com a FPOF-vermelha, deve-se notar que ocorre uma conversão de comprimento de onda de 460 nm para ~ 635 nm. Um fotodiodo de Si possui maior responsividade em 635 nm quando se compara com 460 nm, o que contribui para a referida melhoria.

TABELA 1. Resultados comparativos de nível de sinal óptico *Post* gerado pelas “antenas ópticas” a 10 cm de distância do LED azul emite no ciclo 1.

Antena Óptica	Post (dBm)
PMMA <i>in natura</i>	<i>Low signal</i>
PMMA <i>c/ ranhuras a quente</i>	-36,9
PMMA <i>c/ ranhuras a frio</i>	-36,9
FPOF-vermelha	-31,8

Melhorias como mostra o retângulo pontilhado da Figura 1, foram realizadas na estrutura da antena. Então foi realizado o ciclo 2 de medições. A Tabela 2 indica os resultados dessas medições de ciclo 2 feitas somente com a FPOF-vermelha *in natura* ou modificada, onde a primeira foi identificada como a mais eficiente no ciclo 1.

TABELA 2. Resultados comparativos de nível de sinal óptico *Post* gerado pelas “antenas ópticas” FPOF-vermelha a 10 cm de distância do LED azul emite no ciclo 2.

Antena óptica: FPOF-vermelha	Post (dBm)
<i>in natura</i>	-17,8
<i>c/ ranhuras a quente</i>	-14,9
<i>c/ ranhuras a frio</i>	-14,6

III. CONCLUSÕES

Pode-se concluir preliminarmente sobre a possibilidade de usar uma POF-PMMA comum com ranhuras superficiais como forma de aumentar o seu poder de espalhamento óptico e então a sua eficiência de captura luminosa. Porém, a FPOF-vermelha foi a que exibiu o melhor resultado. Além disso, pode-se observar que POFs fluorescentes riscadas superficialmente exibiram uma eficiência melhorada de 1,2 dB em relação a mesma fibra *in natura*. Técnicas para aumentar a captura de luz via espalhamento e/ou fluorescência devem ser mais a fundo investigadas, porém neste trabalho, de *low signal/onde* < -50 dBm até $-14,6$ dBm com a FPOF-vermelha riscada a frio, obteve-se uma melhoria na captura de luz de pelo menos $-14,6$ dBm $- (-50$ dBm) = 35,4 dB em condições experimentais bastante similares.

AGRADECIMENTOS

Autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Financeiro Code 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

REFERÊNCIAS

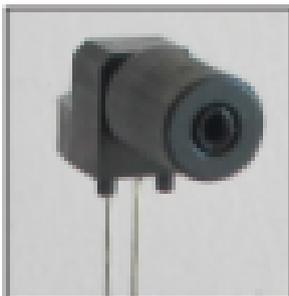
- [1] Demirkol, I., Çarpan-Mer, D., Parselli, I., Combalu, M., Papadou, W., & Hain, R. (2019). Powering the Internet of Things through light communications. *IEEE Communications Magazine*, 57(6), 103-113.
- [2] Burchard, H., Sengulmezki, N., Tomez, B., Vider, S., & Hain, R. (2014). VLC: Beyond point-to-point communications. *IEEE Communications Magazine*, 52(7), 98-105.
- [3] A. Sahar, S. Agarwal and A. Nath, “LiFi Technology: Data Transmission through Visible Light,” *Int. J. of Advances Research in Computer Science and Management Studies*, vol. 3, issue 5, pp. 1-12, June 2021.
- [4] De Oliveira G, Silva VN, Barbosa AP, Ribeiro EM, Coelho TV, Dos Santos AB. Measurement of indoor/outdoor atmospheric turbidity through optical transmission method. *Measurement Science and Technology*. 2017 Apr 6;28(5):055201.
- [5] A. C. Bonaventura, P. Chatterjee, Z. Ghahserinejad, M. Uysal and K. Yigitsoygun, “Standards for Indoor Optical Wireless Communications,” *IEEE Communications Magazine* – Communications Standards Supplement, pp. 24-31, March 2015.
- [6] Michele C. Zanon, Virginia S. R. Silva, André P. L. Barbosa and Ricardo M. Ribeiro, Practical opticing of poly-methyl-methacrylate plastic optical fibers, *Applied Optics*, 57(4), 812-820, February 2018.
- [7] M. Poppendieck and D. Brown, “Control of Light Output from Plastic Optical Fiber with Optical Elements,” pp. 580-594, 1998.
- [8] Ribeiro, R. M., Silva, V. N. R., Barbosa, A. P. L., Alves, C. M., & Rodrigues, C. R. L. (2013). Post manufacturing conversion to generate 660 nm fluorescence for data transmission in polymer optical fibers. *Electronics Letters*, 49(2), 104-106.

Anexos

Datasheet IFD92

Plastic Fiber Optic Phototransistor

IFD92



DESCRIPTION

The IFD92 is a high-sensitivity NPN phototransistor detector housed in a "connector-less" style plastic fiber optic package. Optical response of the IFD92 extends from 400 to 1100 nm, making it compatible with a wide range of visible and near-infrared LEDs and laser diode sources. This includes 650 nm stable red LEDs used for optimum transmission in PMMA plastic optic fibers. The detector package features an internal micro-lens and a precision-molded PBT housing to ensure efficient optical coupling with standard 1000 μm core plastic fiber cables.

APPLICATION HIGHLIGHTS

The IFD92 is suitable for digital data links at rates up to 20 Mbps. Analog bandwidths greater than 15 kHz are possible making the IFD92 suitable for high frequency audio transmission. Phototransistor operation provides high internal gain - reducing the amount of post amplification required in many circuits. The integrated design of the IFD92 makes it a simple, cost-effective solution in a variety of analog and digital applications.

APPLICATIONS

- ▶ Low Speed Digital Data Links
- ▶ Motor Controller Triggering
- ▶ Audio Links
- ▶ Medical Instruments
- ▶ Automotive Electronics
- ▶ Robotics Communications
- ▶ EMC/EMI Signal Isolation
- ▶ Electronic Games
- ▶ Process Control

FEATURES

- ▶ High Optical Sensitivity
- ▶ Meets with Standard 1000 μm Core, 2.2 mm Jacketed Plastic Fiber Optic Cable
- ▶ No Optical Design Required
- ▶ Inexpensive but Rugged Plastic Connector Housing
- ▶ Internal Micro-Lens for Efficient Optical Coupling
- ▶ Connector-Less Fiber Termination
- ▶ Light Tight Housing provides Interference Free Transmission
- ▶ RoHS Compliant

MAXIMUM RATINGS

($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Operating and Storage Temperature Range (T _{OP} , T _{STG})	-40 to 85°C
Junction Temperature (T _J)	85°C
Soldering Temperature (2 lead from case bottom) (T _{SL})	240°C
Collector-Emitter Voltage (V _{CE0})	30V
Emitter-Collector Voltage (V _{EC0})	5V
Collector Current (I _C)	50 mA
Collector Peak Current (ICM) 1 = 1 ms	100 mA
Power Dissipation (P _{TOT}) T _A = 25°C	100 mW
Derate Above 25°C	1.67 mW/°C

CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Wavelength for Maximum Photosensitivity	λ_{max}	-	670	-	nm
Spectral Bandwidth (At 10% of I _{sat})	$\Delta\lambda$	400	-	1100	nm
Switching Time (10% to 90% and 90% to 10%) (I _C = 1 mA, I _E = 1.0 mA, V _{CE} = 5V, A = 1000 nm)	t _r t _f	-	25	-	ns
Responsivity min. @ 670 nm @ 650 nm	R	-	450 350	-	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Collector Dark Current (I _{C0}) (I _E = 0 mA)	I _{C0}	-	-	100	nA
Breakdown Voltage (I _C = 100 μA)	V _{CE0} (I _C)	30	-	-	V
Breakdown Voltage (I _C = 100 μA)	V _{EC0} (I _C)	5	-	-	V
Saturation Voltage (I _C = 250 μA , I _E = 100 μA)	V _{CE(sat)}	-	0.25	-	V

CAUTION: The IFD92 is ESD sensitive. To minimize risk of damage observe appropriate precautions during handling and processing.

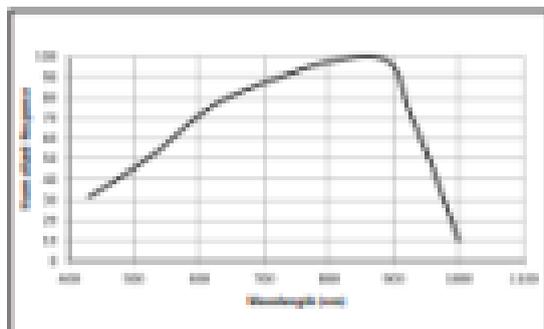
IF D92**Plastic Fiber Optic Phototransistor**

FIGURE 1. Typical detector response versus wavelength.

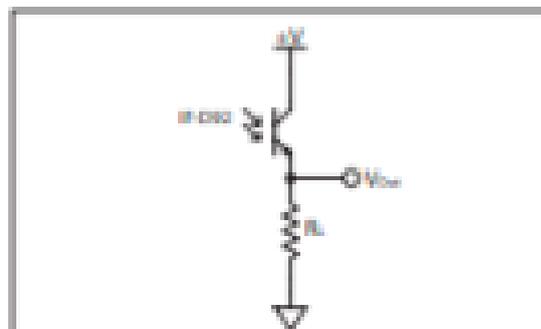


FIGURE 4A. Switching time test application circuit

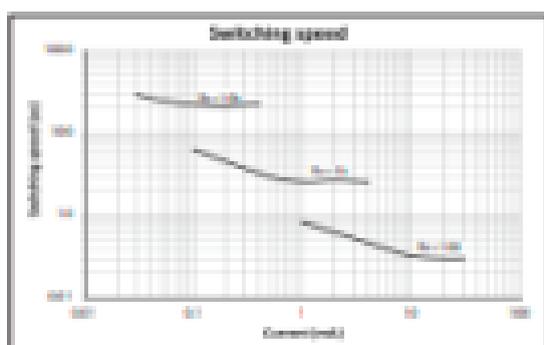


FIGURE 2. Rise and fall times of phototransistor.

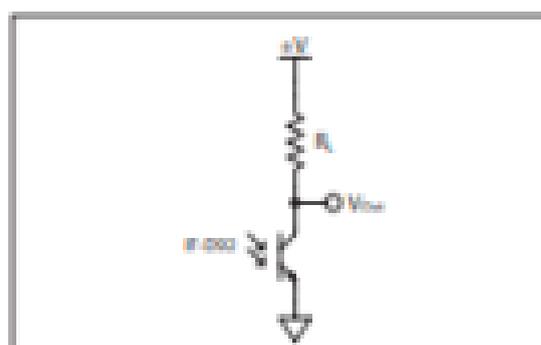


FIGURE 4B. Switching time test application circuit

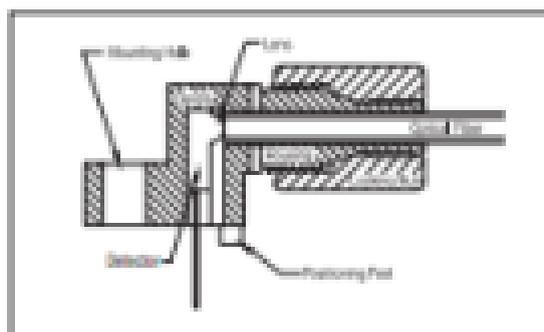


FIGURE 3. Cross-section of fiber optic device.

FIBER TERMINATION INSTRUCTIONS

1. Cut off the ends of the optical fiber with a single-edge razor blade or sharp knife. Try to obtain a precise 90-degree angle (square).
2. Insert the fiber through the locking nut and into the connector until the core tip seats against the internal micro-lens.
3. Screw the connector locking nut down to a snug fit, locking the fiber in place.

IF D92 Plastic Fiber Optic Phototransistor

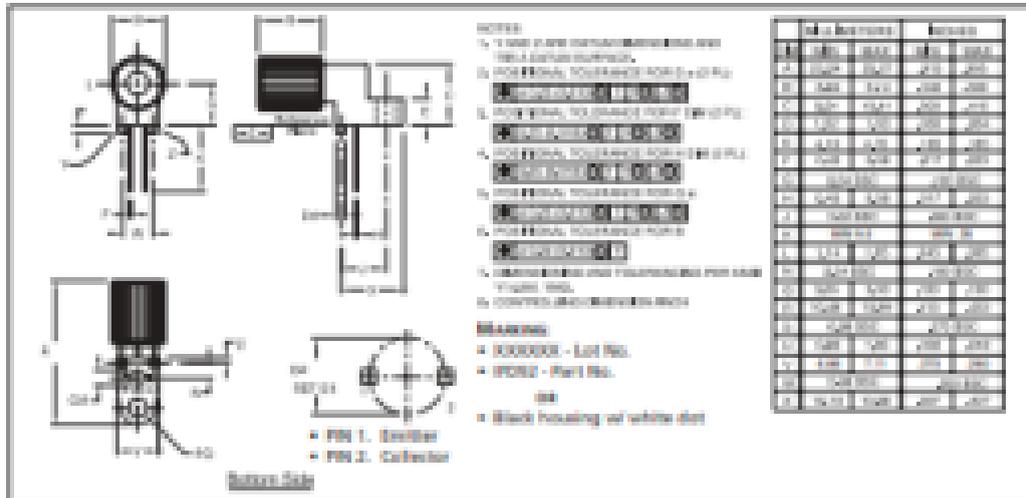


FIGURE 4. Case outline. Specifications are believed to be accurate but are subject to change. Industrial Fiber Optics assumes no responsibility for the consequences of using the information provided without appropriate safety or product not meeting stated specifications. Industrial Fiber Optics products are not authorized for use in life support applications without written approval from the President of Industrial Fiber Optics Corporation.

CAUTION:

- Do not separate from the case to package stress, do not bend or form leads outside the information shown on drawing.
- Ensure that solder flux does not migrate into the device and block the optical path, degrading the performance.
- If washing the device, liquid may become trapped in the part cavity. Ensure that all potentially volatile materials are flushed out of the device.

APPLICATION NOTES

DIGITAL TRANSMISSION

The basic circuits of Figure 4 can be used for digital transmission. Figure 4A is non-inverting and Figure 4B is inverting. The output voltage for Figure 4A is $V_{out} = P_{in} \times R \times R_L$. Where P_{in} is the input power from the fiber, R is the responsivity of the IF-D92 at the wavelength used, and R_L is the load resistance. The output voltage for Figure 4B is $V_{out} = -V - P_{in} \times R_L$. The speed of both circuits is virtually the same.

ANALOG TRANSMISSION

Sending analog information over an optical fiber is difficult. Any small change in the loop can make the received signal level change. Transmitting digital information is much more reliable, but performing an analog to digital conversion at the transmit end and a digital to analog conversion at the receiving end can be cumbersome. Below are simple circuits for transmitting analog information. They convert the analog voltage to a frequency and then convert the frequency back to analog.

The circuit shown in Figure 5 is a basic voltage to frequency converter. It uses an LM331 voltage to frequency IC and an IF-D92E as the emitter. With the supply voltage, +V, set to 15 Volts, the input range is 0 to 10 Volts. The frequency runs from approximately 200 Hz at 0 Volts input to 9 kHz at 10 Volts input. The duty cycle also changes as the input voltage changes and variable resistor R52 should be set so that the duty cycle does not go to 0 % or 100 % at the input extremes. Resistor R1 sets the drive current for the IF-D92E at approximately 3.3 mA. It can be changed within the current limits of the IF-D92E and the LM331. The waveforms driving the output can be seen at point POINT.

IF D92

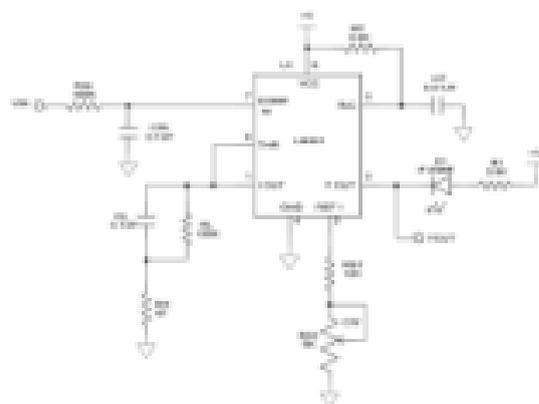
Plastic Fiber Optic Phototransistor

FIGURE 5. Voltage to Frequency converter

The circuit shown in Figure 6 is a basic frequency to voltage converter. It uses an LM131 voltage to frequency converter IC and an IF-D92 to detect the signal from the emitter in the circuit of Figure 5. The supply voltage, +V, should be set to 15 volts for a 0 to 10 volt output range. In this circuit variable resistor R32 should be adjusted so that the output voltage tracks the voltage input into the circuit of Figure 5. The inverted received signal can be seen at point PIN.

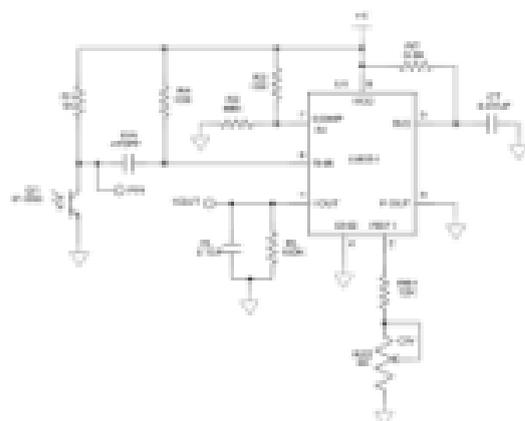


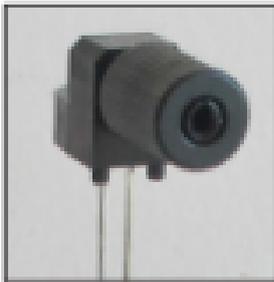
FIGURE 6. Frequency to Voltage converter

The circuits in Figures 5 and 6 work together to transmit an analog DC voltage over a fiber optic cable. The combined circuits have a response time of 50 ns (to 1%). Refer to the LM131 datasheet for more complex circuits with higher accuracy or faster response time.

Datasheet IFD93

Plastic Fiber Optic Photodarlington

IFD93



APPLICATIONS

- ▶ Low Speed Optical Links
- ▶ Optical Interrupters/
Reflective Sensors
- ▶ Process Control
- ▶ Motor Controller Triggering
- ▶ Medical Instruments
- ▶ Automotive Electronics
- ▶ Robotics Control
- ▶ EMI/EMS Signal Isolation
- ▶ Electronic Gates

DESCRIPTION

The IFD93 is a very high-sensitivity photodarlington detector housed in a "connector-less" style plastic fiber optic package. Optical response of the IFD93 extends from 400 to 1100 nm, making it compatible with a wide range of visible and near-infrared LEDs and other optical sources. This includes 650 nm visible red LEDs used for optimum transmission in PMMA plastic optic fiber. The detector package features an internal micro-lens and a precision-molded PBT housing to ensure efficient optical coupling with standard 1000 μm core plastic fiber cable.

APPLICATION HIGHLIGHTS

The IFD93 is suitable for low-speed optical links requiring high sensitivity. Triggering rates up to 1 kHz are possible using the IFD93 and a suitable LED source. Photodarlington transistor operation provides very high optical gain, eliminating the need for post-amplification in many circuits. The integrated design of the IFD93 makes it a simple, cost-effective solution in a variety of applications.

FEATURES

- ◆ Meets with Standard 1000 μm Core, 2.2 mm Jacketed Plastic Fiber Optic Cable
- ◆ No Optical Design Required
- ◆ Inexpensive but Rugged Plastic Connector Housing
- ◆ Internal Micro-Lens for Efficient Optical Coupling
- ◆ Connector-Less Fiber Termination
- ◆ Light-Tight Housing provides Interference Free Transmission
- ◆ Very High Optical Sensitivity
- ◆ RoHS Compliant

MAXIMUM RATINGS

($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Operating and Storage Temperature Range (T _{OP} , TSTG)	-40° to 85°C
Junction Temperature (T _J)	85°C
Soldering Temperature (Lead from case bottom) (T _J) t ≤ 3 s	260°C
Collector-Emitter Voltage (V _{CEO})	15 V
Emitter-Collector Voltage (V _{EC})	5 V
Collector Current (I _C)	50 mA
Collector Peak Current (ICM) t = 1 ms	100 mA
Power Dissipation (P _{TOT}) T _A = 25°C	100 mW
Dc rate Above 25°C	1.67 mW/°C

CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Wavelength for Maximum Photosensitivity	λ_{opt}	-	650	-	nm
Spectral Bandwidth (R _{10%} to R _{90%})	$\Delta\lambda$	400	-	1100	nm
Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) (R _L = 1k Ω , V _{CE} = 5 V, I _C = 100 μA) (See Figure 2, V _{CE} = V)	t _r t _f	-	700 800	-	μs
Responsivity min. @ 670 nm @ 650 nm	R	-	5000 7000	-	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Collector Dark Current (V _{CE} = 15 volts)	I _{C(DK)}	-	-	100	nA
Breakdown Voltage (I _C = 1 mA)	BV _{CEO}	15	-	-	V
Breakdown Voltage (I _C = 100 μA)	BV _{EC}	5	-	-	V
Saturation Voltage (I _C = 100 μA , R _L = 10 $\mu\Omega$)	V _{CE(sat)}	-	0.75	1.10	V

CAUTION: The IFD93 is ESD sensitive. To minimize risk of damage observe appropriate precautions during handling and processing.

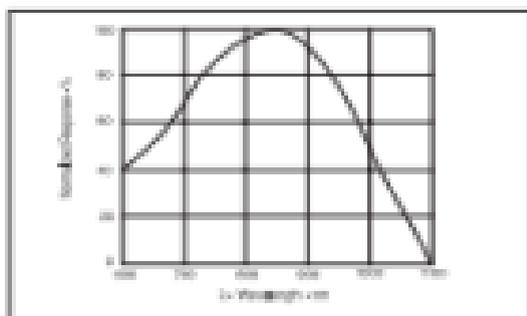
IF D93**Plastic Fiber Optic Photodarlington**

FIGURE 1. Typical detector response versus wavelength.

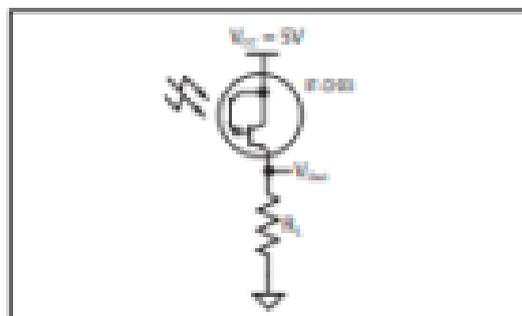


FIGURE 3. Switching time and application circuit.

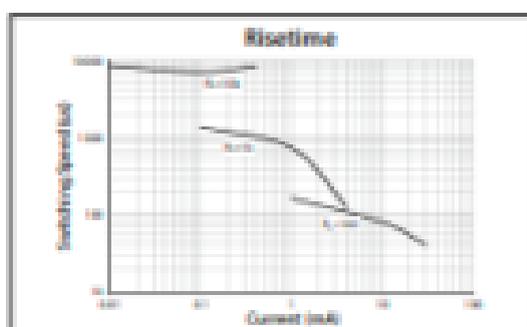


FIGURE 2A. Rise time versus load resistance.

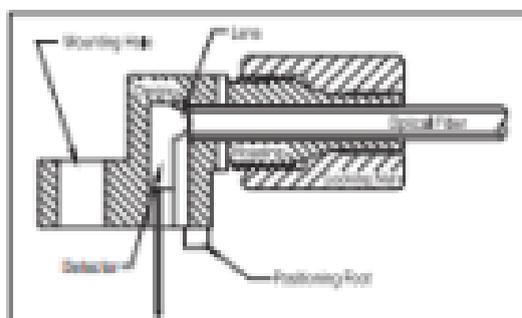


FIGURE 4. Cross-section of fiber optic device.

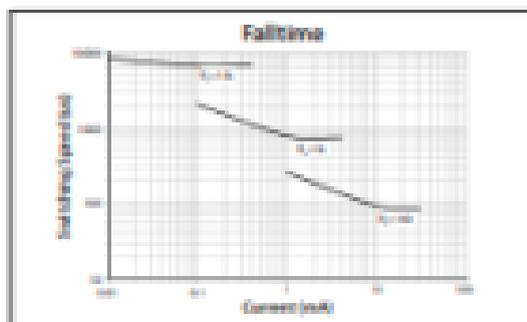


FIGURE 2B. Fall time versus load resistance.

FIBER TERMINATION INSTRUCTIONS

1. Cut off the ends of the optical fiber with a single-edge razor blade or sharp knife. Try to obtain a precise 90-degree angle (square).
2. Insert the fiber through the locking nut and into the connector until the core tip seats against the internal micro-lens.
3. Screw the connector locking nut down to a snug fit, locking the fiber in place.

IF D93 Plastic Fiber Optic Photodarlington

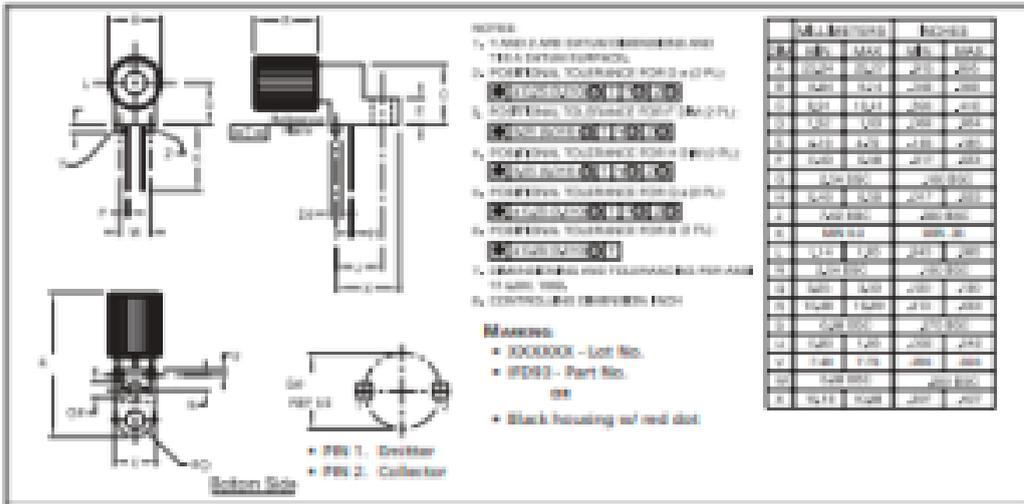


FIGURE 4. Case outline. Specifications are believed to be accurate but are subject to change. Industrial Fiber Optics assumes no responsibility for the consequences of using the information provided beyond replacement warranty for products not meeting stated specifications. Industrial Fiber Optics products are not authorized for use in life support applications without written approval from the President of Industrial Fiber Optics Corporation.

CAUTION: - To avoid degraded device life due to package stress, do not bend or form leads outside the orientation shown on drawing.
 - Ensure that solder flow does not migrate into the device and block the optical path, degrading the performance.
 - If washing the device, liquid may become trapped in the part cavity. Ensure that all potentially corrosive materials are flushed out of the device.

Datasheet LED Diemount

LED to 1mm POF coupled modules

Description:

The LED module bases on a microstructured parabolic reflector setup responsible for the high POF coupled optical power. The LED die is placed in the parabola's focus point. The reflector couples the light with high efficiency to a standard POF with 1mm core diameter and a numerical aperture of 0.5. Typically the POF cable jacket diameter is 2.2mm, other POF cable types (e.g. 1.25mm cable diameter) or bare fiber POF are available on request.

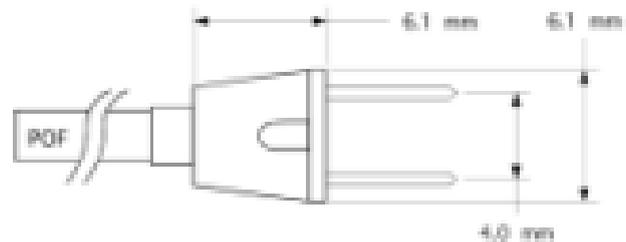
The polished POF endface emits the light in a light cone with a divergence of $\pm 29^\circ$ to the optical axis. The typical fiber length is 15cm, but customer specific length modifications are possible.

Electrically the POF module is connected by a 4 mm pitch two pin connector.

Customer specific LED dice can be mounted into the package if the die edge length doesn't exceed 340 μ m.



Mechanical dimensions:



Applications:

POF coupled LED modules are useful in a wide variety of applications:

- Object illumination at places with difficult access due to tiny space or other limitations
- Generation of high optical power area density for laboratory applications
- Light barrier setups

Technical specifications for some selected LED to POF coupled modules:

	blue	green	amber	orange-red	red	hyper-red
peak wavelength [nm]	460	520	590	615	640	650
typical optical output power @ 20mA [mW]	4.0	2.3	1.4	2.5	2.3	4.0

DieMount GmbH				
		Gieselerweg 3, D- 38855 Wernigerode		
www.diemount.com tele: + 49 03913 621700 fax: + 49 0391 621715 e-mail: info@diemount.com				

2017-03-05