



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

ANTONIO ADADE DE CASTRO BATISTA

**Aumento do Ângulo de Visão de Fotodetectores para Sistemas de
Comunicações Ótica por Luz Visível através do Uso de Fibras Óticas de
Plástico Fluorescentes**

NITERÓI
(JUNHO / 2021)

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

ANTONIO ADADE DE CASTRO BATISTA

**Aumento do Ângulo de Visão de Fotodetectores para Sistemas de
Comunicações Ótica por Luz Visível através do Uso de Fibras Óticas de
Plástico Fluorescentes**

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

Orientador:

Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva

Co Orientador:

Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro

NITERÓI
(JUNHO / 2021)

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

C355a Castro batista, Antonio Adade de
Aumento do Ângulo de Visão de Fotodetectores para Sistemas de Comunicações Ótica por Luz Visível através do Uso de Fibras Óticas de Plástico Fluorescentes / Antonio Adade de Castro batista ; Vinicius Nunes Henrique Silva, orientador ; Ricardo Marques Ribeiro, coorientador. Niterói, 2021.
50 f. : il.

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.36438524875>

1. Comunicação Optica. 2. Produção intelectual. I. Henrique Silva, Vinicius Nunes, orientador. II. Marques Ribeiro, Ricardo, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

ANTONIO ADADE DE CASTRO BATISTA

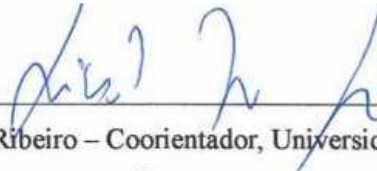
Aumento do Ângulo de Visão para Receptores Óticos em Sistemas de Comunicações Ótica por Luz Visível Através do Uso de Fibras Óticas de Plástico Fluorescentes

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

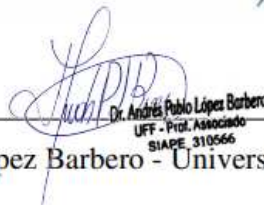
BANCA EXAMINADORA



Prof. D.Sc. Vinicius Nunes Henrique Silva – Orientador, Universidade Federal Fluminense



Prof. D.Sc. Ricardo Marques Ribeiro – Coorientador, Universidade Federal Fluminense



Dr. Andrés Pablo López Barbero
UFF - Prof. Associado
SIAPE 310566

Prof. D.Sc. Andrés Pablo Lopez Barbero - Universidade Federal Fluminense



Prof. D.Sc. Luiz Anet Neto – École Nationale Supérieure Mines – Télécom Atlantique
Bretagne – Pays de la Loire

NITERÓI

(JUNHO / 2021)

Dedico este trabalho a meu filho Vinicius.

Que possa servir de inspiração.

Agradecimentos

Camila minha doce esposa que sempre acreditou em mim, que me tolera, que me apoia e me sustenta nas horas de mais difíceis,

A minha família, pela base moral que me deram ao longo da vida

Prof. D.Sc. Ricardo que me orientou nos experimentos no Lacop e a escrever o artigo que serviu de base para esta dissertação.

Aos amigos do Lacop que ajudaram na parte experimental deste trabalho.

E um agradecimento especial ao Prof. D.Sc. Vinicius que foi incansável e acreditou até o último minuto neste trabalho.

Sem seu apoio, acompanhamento e orientação não teria sido possível.

Obrigado!

Resumo

Comunicação por Luz visível, conhecido por VLC – Visible Light Communication é um conceito onde se aproveita a luz emitida por uma lâmpada para estabelecer Comunicação. A utilização de luz como forma de enviar sinais remete aos tempos antigos, onde sinais de fumaça era utilizado para avisar sobre a eminência de perigo em um povoado. Nas grandes navegações, a luz de um farol indicava a tripulação do barco a existência de uma região costeira.

Com o passar dos anos e o avanço da tecnologia, surgiram lâmpadas LED que são propícias para VLC por permitirem modulação e possuírem uma grande largura de banda, permitindo que enlaces por luz visível tenham um potencial de transferência de dados na ordem dos Gigabits. Porém, a aplicação de sistemas de luz visível é fortemente afetada por obstáculos entre o emissor e o receptor além de não possuírem bom desempenho em situações onde os elementos não estão alinhados entre si.

Com finalidade de resolver este problema, este trabalho apresenta uma proposta de antena optica utilizando fibra plástica do tipo fluorescente de modo a produzir um receptor compatível com VLC capaz de permitir mobilidade entre o emissor e receptor. Ao longo do trabalho é demonstrado os resultados dos ensaios utilizando segmentos de POF nas cores Verde, Vermelho e Amarelo onde a POF de cor vermelha se destacou ampliando o campo de visão FOV do fotodetector em 19dB a 85°, o que representa um ângulo fora de visada direta. Também foram realizados testes com POF unidas em formatos geométricos onde verificamos um aumento na área de sombra no fotodetector não ampliando o FOV, além de testar a reciprocidade do conjunto emissor fixo / receptor fixo onde foi possível verificar que o semiângulo da lâmpada branca utilizada no experimento é de 90°.

Além destes testes, um arranjo com 2 lâmpadas foi experimentado a fim de verificar se mais luminosidade melhora o acoplamento da antena no fotodetector, produzindo um ganho de 2,5dB a 0° o que representa uma linha de visão (LOS) direta com 2 lâmpadas dispostas a 15cm entre si. Por fim sugerimos a continuação deste trabalho com a determinação de medidas complementares e mais aprofundadas sobre o tema.

Palavras Chaves: VLC, Campo de Visão, Antena Ótica, Luz Visível

Abstract

Visible Light Communication, known as VLC – Visible Light Communication is a concept where the light emitted by a lamp is used to establish Communication. The use of light as a way to send signals goes back to ancient times, where smoke signals were used to warn of the imminence of danger in a village. In the great sailings, the light of a lighthouse indicated to the boat crew the existence of a coastal region.

Over the years and the advancement of technology, LED lamps have emerged that are suitable for VLC because they allow modulation and have a large bandwidth, allowing visible light links to have data transfer potential in the order of Gigabits. However, obstacles between the emitter and the receiver affected strongly the application of visible light systems, in addition to not having good performance in situations where the elements are not aligned with each other.

In order to solve this problem, this work presents a proposal for an optical antenna using fluorescent-type plastic fiber in order to produce a VLC compatible receiver capable of allowing mobility between the emitter and receiver. Throughout the work, the results of tests using POF segments in Green, Red and Yellow are shown, where the red POF stood out, expanding the FOV field of view of the photodetector by 19dB at 85°, which represents an angle outside of direct target. Tests were also carried out with POF united in geometric formats where we verified an increase in the shadow area in the photodetector not expanding the FOV, in addition to testing the reciprocity of the fixed emitter / fixed receiver set where it was possible to verify that the semi angle of the white lamp used in the experiment is 90°.

In addition to these tests, an arrangement with two lamps was tried in order to verify if more luminosity improves the coupling of the antenna to the photodetector, producing a gain of 2.5dB at 0° which represents a direct line of sight (LOS) with two lamps arranged 15cm apart. Finally, we suggest the continuation of this work with the determination of complementary and more in-depth measures on the subject.

Keywords: VLC, Campo de Visão, Antena Ótica, Luz Visível

Lista de Figuras

FIGURA 1 - EXEMPLOS DE GRANDEZAS OPTICAS. ADAPTADO DE [36].	19
FIGURA 2 - CAMPO DE VISÃO FOV DE UM RECEPTOR OPTICO COMPATÍVEL COM VLC. ADAPTADO DE [12].	21
FIGURA 3 - GUIAMENTO DA LUZ ATRAVÉS DE MATERIAL FLUORESCENTE ACOPLADO A UM FOTODETECTOR (PD) A PARTIR DE BOMBEIO DE UMA FONTE EXTERNA [19].	22
FIGURA 4 - EXEMPLOS DE ANTENAS OPTICAS FLUORESCENTE. A) APLICAÇÃO DE FILME FLUORESCENTE ENTRE LÂMINAS DE VIDRO [8]. B) PLACAS DOPADAS COM COUMARIM [15]. [ADAPTADO PELO AUTOR]	23
FIGURA 5 - ESQUEMATIZAÇÃO DA MONTAGEM DO APARATO PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ANGULAR DE UM RECEPTOR VLC.	27
FIGURA 6. CURVA CARACTERÍSTICA DE SATURAÇÃO DO FOTODIODO	27
FIGURA 7. DISPOSITIVO DESENVOLVIDO PARA MOVIMENTO ANGULAR HORIZONTAL [AUTOR]	28
FIGURA 8 RESPOSTA ANGULAR DO FOTODETECTOR SEM UTILIZAÇÃO DE ANTENA OPTICA COM EMISSOR A 50CM DE DISTÂNCIA DO RECEPTOR.	29
FIGURA 9 CURVA ESPECTRAL DA LÂMPADA LED DE LUZ BRANCA UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS [AUTOR]	30
FIGURA 10 - CURVA ESPECTRAL POFs COM 5CM DE COMPRIMENTO	31
FIGURA 11 - DETALHE DO ACOPLAMENTO <i>BUTT TO BUTT</i> ENTRE A ANTENA OPTICA E O FOTODETECTOR.	32
FIGURA 12 - RESPOSTA ANGULAR DO FOTODETECTOR UTILIZANDO ANTENA OPTICA COM SEGMENTO DE 1CM.	33
FIGURA 13 - RESPOSTA ANGULAR DO FOTODETECTOR UTILIZANDO ANTENA OPTICA DE 3CM.	33
FIGURA 14 RESPOSTA ANGULAR DO FOTODETECTOR UTILIZANDO ANTENA OPTICA DE 5CM.	34
FIGURA 15 COMPARATIVO DO GANHO EM DB ENTRE AS ANTENAS A) VERMELHA B) AMARELO C) VERDE.	36
FIGURA 16 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC COM ANTENA OPTICA DE 5CM DE COMPRIMENTO – EMISSOR FIXO	37
FIGURA 17 RECIPROCIDADE DA RESPOSTA ANGULAR DO FOTODETECTOR. COMPARATIVO ENTRE EMISSOR FIXO X EMISSOR MÓVEL.	38
FIGURA 18 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC COM ANTENAS EM FORMATO GEOMÉTRICO.	39
FIGURA 19 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC COM ANTENAS EM FORMATO GEOMÉTRICO.	39
FIGURA 20 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC COM ANTENAS EM FORMATO GEOMÉTRICO.	40
FIGURA 21 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC COM ANTENAS EM FORMATO GEOMÉTRICO.	40
FIGURA 22 ESQUEMATIZAÇÃO DA MONTAGEM DO APARATO PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ANGULAR DE UM RECEPTOR VLC UTILIZANDO 2 LÂMPADAS VISTO DE CIMA.	41
FIGURA 23 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC UTILIZANDO 2 FONTES DE LUZ DISTANTES 0CM ENTRE SI.	42
FIGURA 24 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC UTILIZANDO 2 FONTES DE LUZ DISTANTES 5CM ENTRE SI.	42
FIGURA 25 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC UTILIZANDO 2 FONTES DE LUZ DISTANTES 10CM ENTRE SI.	43
FIGURA 26 RESPOSTA ANGULAR DO RECEPTOR VLC UTILIZANDO 2 FONTES DE LUZ DISTANTES 15CM ENTRE SI.	43

Lista de Abreviaturas e Siglas

PPGEET	Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica de de Telecomunicações
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
FSO	<i>Free Space Optical</i>
POF	<i>Polymer Optical Fiber</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITS	<i>Intelligent transport systems</i>
FOV	<i>Field of View</i>
RGB	<i>Red Green Blue</i>
RF	<i>Radio Frequencia</i>
MIMO	<i>Multiplo In Multiplo Out</i>
GRIN	<i>Gradiente Index</i>
CPC	<i>Compound Parabolic Concentrator</i>
WLED	<i>White Light Emitting Diode</i>
Ce:YAG	<i>Cerium-doped Yttrium-Aluminum Garnet</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PMMA	<i>Polimetilmetacrilato</i>

PD	<i>Photodiode</i>
RC	<i>Resistivo Capacitivo</i>
DC	<i>Direct Courent</i>
CIE	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
BER	<i>Bit Erro Rate</i>
OOK	<i>On Off Key</i>
APD	<i>Avanche Photodiode</i>
TTL	<i>Transistor Transistor Logic</i>

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	13
1.1 Motivação	15
1.2 Objetivos	15
1.3 Estrutura do Trabalho	15
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	17
2.1 Geração de Luz Visível - VLC	17
2.2 Fotometria	17
2.2.1 Propriedades Básicas da Luz	18
2.2.2 Luminância e Iluminância	18
2.2.3 Potência Óptica	20
2.3 Efeitos da Fluorescência na Fibra Óptica Plástica	21
2.4 Métodos de ampliação do Campo de Visão de Sistemas VLC	23
Capítulo 3 - Materiais Métodos e Resultados	26
3.1 Dispositivo Para Movimento Angular	26
3.2 Caracterização da Fonte Emissora e das Fibras Plásticas	29
3.2.1 Caracterização da Lâmpada LED	29
3.2.2 Caracterização das Antenas Ópticas	30
3.3 Utilização de Fibra Plástica de Poliestireno POF como Antena Óptica	31
3.4 Reciprocidade entre Emissor x Receptor	36
3.5 Antenas Ópticas em Formato Geométrico	38
3.6 Utilização de Múltiplas Lâmpadas LED	41
Capítulo 4 - Conclusão e Proposta de Trabalho Futuro	45
4.1 Proposta de Trabalhos Futuros	45
Bibliografia	47

Capítulo 1 - Introdução

Historicamente, a luz no espectro visível foi amplamente utilizada pela humanidade como forma rudimentar de sinalização e comunicação. Desde a utilização de fogo e sinal de fumaça entre povoados locais, até a construção de faróis luminosos em regiões costeiras para orientação de navios em locais que apresentam perigo para navegação, sendo o mais famoso deles o farol de Alexandria, construído em 280 a.C. [4].

A luz visível ainda é utilizada como forma simples de comunicação através de sinais de trânsito, navios que se comunicam via código *morse* por uma portadora ótica no visível, além de aviões que emitem luz para indicar sua localização. Além destas formas simples, a luz visível pode ser utilizada para telecomunicações. Em 1880, Alexander Graham Bell inventou o *Photophone* e demonstrou o uso da luz solar como portadora para estabelecer uma conversa telefônica entre pontos distantes 213m [5].

A tecnologia de Comunicações por Luz Visível (VLC – *Visible Light Communications*) é uma forma de comunicação sem fio que utiliza a luz visível e o espaço livre FSO (*Free Space Optical*) como canal de comunicação. Esse tipo de comunicação vem se popularizando devido ao surgimento de fontes de luz no visível, de baixo custo, moduláveis e com largura de banda da ordem de MHz, como é o caso dos LED (*Light Emitting Diode*).

Em 2018, mais de 280 milhões de lâmpadas LEDs foram importadas para o Brasil [20], e a utilização deste tipo de fonte de luz em detrimento a lâmpada incandescente/fluorescente possui fatores relevantes como: longa duração (expectativa média de vida de 50.000 horas), baixo consumo de energia (na ordem de 5W/h), alta eficiência luminosa (lm/w – Lumen / Watt) [2], além de possuir banda de modulação na faixa de 2MHz à 20MHz [18]. Com isso, é possível transmitir informação ao mesmo tempo que oferece iluminação. O mesmo não ocorre com as lâmpadas incandescentes/fluorescentes, pois a vida útil é reduzida quando moduladas, não sendo relevantes para transmissão de dados [4]

Novas tecnologias proporcionam o aparecimento de novos serviços, que por sua vez viabilizam aplicações como IoT (*Internet of Things*) ou internet das coisas. Estes dispositivos IoT interligarão serviços e dispositivos antes distintos formando um sistema integrado e inteligente capaz de suportar aplicações como navegação virtual, telemedicina, detecção digital e transmissão de vídeo full HD em drones entre outros. Estima-se que até 2025 mais

de 25 bilhões de dispositivos utilizarão aplicações IoT [34]. Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS - *Intelligent transport systems*) podem utilizar a luz LED existente nos automóveis para estabelecer comunicação entre veículos e funções de sinalização de trânsito [9] também contribuirão para o aumento no consumo de dados. Segundo a Consultoria PwC, até o final de 2021 o consumo de dados no Brasil deve ser três vezes maior se comparado com 2016, chegando a 42 Trilhões de Megabytes [7].

Estas aplicações requerem que os sistemas de comunicação estejam preparados para a nova geração de redes 5G, B5G (beyond 5G) e 6G que permitirá integração entre comunicações terrestres, aéreas e marítimas em uma rede robusta mais confiável e rápida capaz de suportar um grande número de dispositivos conectados simultaneamente e que além de requerer latência ultrabaixa, permita grande mobilidade entre emissor e receptor [6] [34].

Neste contexto, os sistemas Wireless convencionais poderão não suprir o aumento na demanda por banda devido ao esgotamento do espectro RF (Rádio Frequência) e pela sua limitação de tráfego de dados [3].

Neste cenário, VLC se apresenta como uma opção viável para complementar os sistemas WiFi, por possuir um espectro eletromagnético livre de licença (380-780nm), largura de banda na ordem de 400THz, potencial para taxas de transmissão de dados na ordem de Gigabits, alta segurança, baixo consumo de energia quando comparado com equipamentos de Rádio Frequência além de não sofrer interferência eletromagnética. [17]

No entanto, o VLC apresenta uma grande questão. Originalmente, a Comunicação Óptica Sem Fio foi desenvolvida para estabelecer conexão entre 2 pontos estacionários, e a mobilidade de apenas um dos dispositivos afeta fortemente o sistema [10]. Uma forma de permitir mobilidade entre emissor e receptor é ampliando-se o Campo de Visão (FOV - *Field of View*) do receptor. Métodos conhecidos como MIMO (*Multiple In Multiple Out*) utilizam arranjos de lâmpadas LEDs e Fotodetectores dispostos uniformemente em um determinado local de forma a ampliar o campo de visão de um sistema VLC [19]. Em ambientes *Indoor*, este método pode utilizar o espalhamento difuso da luz de um emissor se beneficiando da reflexão de parte da luz em diferentes direções, permitindo que o receptor não esteja alinhado em visada direta com o emissor [12].

Outra maneira diminuir a dependência angular entre emissor e receptor é a utilização de Antenas Ópticas. Este termo refere-se a dispositivos que auxiliam no aumento da captura de energia óptica, proporcionando um campo de visão - FOV mais amplo quando comparado a um fotodetector simples [8]. Dispositivos como lentes GRIN (*Gradiente Index*) [13], concentradores de luminosidade do tipo CPC (*Compound Parabolic Concentrator*) [14] e

Filmes Fluorescentes [15] [16] são exemplos de aparatos experimentados como Antenas Ópticas. Entretanto, as aplicações destes conceitos para ampliação do FOV apresentam *setups* elaborados e de difícil reprodução, além da utilização de materiais que não são de fácil acesso.

Neste sentido, este trabalho propõe um novo conceito de Antena Óptica de baixo custo e aplicação simples, utilizando POF (*plastic Optical Fiber*) do tipo Poliestireno Fluorescente simplesmente conectado a um fotodetector de Silício (Si) de forma a aumentar o poder de captura da luz ampliando/planificando o campo de visão de um Sistema VLC

1.1 Motivação

O presente trabalho foi motivado pela necessidade de proporcionar mobilidade para sistemas baseados em VLC, aumentando o poder de captura de luz para ampliação/planificação do campo de visão, diminuindo a dependência angular entre emissor e receptor com aplicação em enlaces ultracurtos, com base no conceito PAN – *Personal Area Networking*.

Os métodos citados na introdução comprovaram ser efetivos, porém se mostraram complexos, com utilização de materiais específicos. O presente estudo propõe um método que une simplicidade, baixo custo, fácil implementação e boa resposta.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor uma Antena Óptica compatível com VLC, utilizando um segmento de Fibra Óptica Plástica do tipo Poliestireno Fluorescente ou PMMA, com a finalidade de aumentar o sinal óptico capturado, assim como a ampliação do campo-de-visão (FOV) e planicidade da resposta óptica angular do receptor-VLC em enlaces ultracurtos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O capítulo 1 apresenta a introdução do tema, a motivação do trabalho, os objetivos e a organização. No capítulo 2 são apresentados alguns métodos utilizados para ampliação do campo de visão - FOV de

fotodetectores em aplicação *indoor* para sistemas VLC. No capítulo 3 é descrito o protótipo de uma Antena Optica utilizando POF Fluorescente, mostrado qualitativamente e quantitativamente os resultados das medições realizadas com o protótipo. No capítulo 4, é apresentada uma conclusão com considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica sobre os elementos envolvidos em VLC apresentando métodos e dispositivos capazes de ampliar o campo de visão de um fotodetector.

2.1 Geração de Luz Visível - VLC

Aplicação utilizando VLC se beneficia da luz visível gerada por lâmpadas do tipo LED para transmissão de dados. Em ambientes *Indoor* o tipo de lâmpada LED mais utilizado emite luz branca (WLED) [29]. A luz branca pode ser obtida através da combinação de LEDs Vermelho, Verde e Azul (Red, Green, Blue), este tipo de lâmpada é conhecido como RGB LEDs e são utilizados em monitores, displays e TVs devido a possibilidade de gerar uma ampla gama de cores [27].

Outra forma de obter luz branca é através da adição de uma camada de fosfato amarelo ao díodo. Lâmpadas produzidas com este método utilizam o pico de emissão de fótons na região de 460nm (Azul) gerado pelo díodo para bombardear um composto químico, geralmente Granada de Ítrio e Alumínio dopado com Cério (Ce:YAG - Cerium-doped Yttrium-Aluminum Garnet), gerando um pico em 550nm (Amarelo) o qual fluoresce através do espectro entre 500nm e 700nm [28]. Este método além de ser mais barato quando comparado a lâmpadas RGB por utilizar apenas um LED azul [28], é o modelo de maior aplicação domésticas e em ambientes *Indoor*, como escritórios e data centers [26].

Lâmpadas incandescentes que geram luminosidade como resultado do aquecimento de um filamento de tungstênio (W) inerte em vácuo, e lâmpadas fluorescentes do tipo eletrônica que precisam de um reator para ionizar moléculas de gás Argônio (Ar) e/ou Mercúrio (Mg) não são utilizados em sistemas VLC pois apresentam baixa eficiência quando moduladas.

2.2 Fotometria

Fotometria é a área de conhecimento da optica que estuda as propriedades básicas da luz emitida por uma lâmpada LED. O conhecimento destas propriedades facilita a compreensão de um sistema de comunicação por luz visível uma vez que este sistema utiliza

propriedades familiares da luz como por exemplo a Luminância (L) que é a parte visível da luz aos olhos humanos. Além da Luminância, as outras propriedades básicas são: Intensidade Luminosa (I) medido em Candela [cd], Fluxo Luminoso (Φ) medido em Lúmen [lm], Potência Óptica (P) dado em Watt [W], Iluminância (E) medido em Lux [lx] [2].

2.2.1 Propriedades Básicas da Luz

A Intensidade Luminosa (I) é a propriedade que indica a quantidade de luz emitida por uma lâmpada LED a partir de um ângulo de emissão e que concentra o fluxo luminoso em uma determinada direção e tem sua unidade medida em Candela [cd]. Quanto mais concentrado o fluxo luminoso for, ou seja, quanto menor o ângulo de emissão, maior será a intensidade luminosa da lâmpada.

O Fluxo Luminoso (Φ) por sua vez é a quantidade de luz emitida por uma lâmpada e que se propaga em todas as direções e é medida em Lumens [lm]. Ela é responsável pela claridade que a luz visível oferece a um ambiente e sua intensidade depende da energia radiante do emissor (Φ_e) e de sua eficiência luminosa (V). Entretanto, o fluxo luminoso pode ser limitado a região do visível para aplicação em sistemas VLC [2]. Desta forma temos:

$$\Phi = k \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d(\lambda) \text{ [lm]} \quad (1)$$

A constante k indica a eficiência da lâmpada LED em transformar a energia irradiada e a corrente consumida em luz visível. O valor máximo para k é atingido na região da cor verde, em 550nm e equivale a 683 lumen/w [27].

Uma vez conhecida o fluxo luminoso, podemos determinar a intensidade luminosa:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \text{ [cd]} \quad (2)$$

2.2.2 Luminância e Iluminância

Em fotometria, Luminância medida em candela [cd] é a parte visível da luz e indica a percepção fisiológica da luz percebida pelo olho humano. É a parte da luz refletida em uma

superfície ou objeto em um determinado ângulo e mede a relação entre fluxo luminoso e a intensidade luminosa e sua intensidade depende da área onde o fluxo luminoso se concentra [30].

A Iluminância, entretanto, é a parte não visível da luz, porém é a parte que efetivamente incide em uma área iluminando-a. Sua unidade de medida é o Lux [lx] e é responsável pela claridade percebida pelo olho humano além de se propagar pelo ambiente sem refletir em objetos [34]. Tanto a Luminância quanto a Iluminância dependem do ângulo de incidência (ψ) quanto do ângulo irradiante (ϕ), assim, em um sistema VLC Indoor assumindo que a lâmpada LED e as superfícies onde a luz reflita sejam lambertinas, ou seja, que as luzes emitidas obedeçam às leis de cosseno de Lambert, podemos determinar que a quantidade de luz incidente no fotodetector pode ser medida pelo cálculo da Iluminância em uma área [31]:

$$E = \frac{I \cos^m \phi}{D^2 \cos \psi} \text{ [lx]} \quad (3)$$

Onde m é a ordem de emissão Lambertina

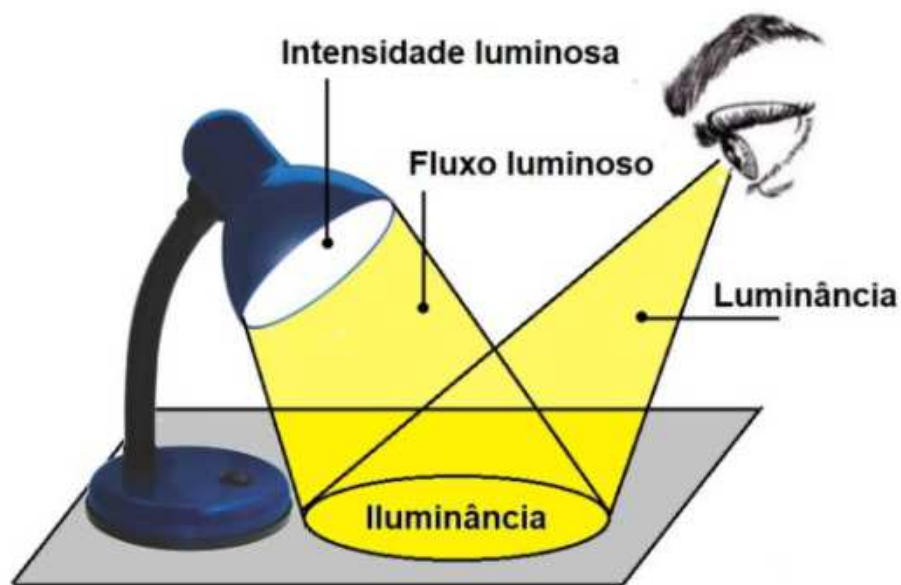


Figura 1 - Exemplos de grandezas ópticas. Adaptado de [36].

Como o fluxo luminoso se propaga em todas as direções, e a luminância reflete a luz visível sucessivas vezes sobre objetos e superfícies, podemos concluir que existam diversos

caminhos ópticos possíveis entre o emissor e o fotodetector obtendo assim múltiplos canais ópticos.

Entretanto, neste trabalho assumiremos a existência de apenas um canal óptico possível em visada direta (line of Sight – LOS), omitindo os demais canais adjacentes gerados pelas sucessivas reflexões da luz.

Neste sentido, um canal óptico (H) será estabelecido pela quantidade de luz incidente no detector pela pelo emissor a uma distância (l), a área (A) do fotodetector e a relação do ganho do receptor (T) e do concentrador óptico (g), o qual chamaremos de antena óptica [2]:

$$H(0) = \frac{(m + 1)A}{2\pi l^2} \cos^m(\psi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi \quad (4)$$

2.2.3 Potência Óptica

A Potência Óptica transmitida por uma lâmpada, medida em watt (W), depende diretamente do Fluxo de Energia radiante (Φ_e) do LED, ela fornece o brilho da lâmpada e a direção de propagação da luz depende do semiângulo de abertura da lâmpada que pode ser mais amplo com a utilização de difusores, ou mais diretas quando utilizadas lentes de ampliação. Entretanto, a Potência recebida no detector (P_r) será parte da energia incidente dentro da região limitada pelo campo de visão FOV do fotodetector. Desta forma, temos que a área de captura da luz depende da relação entre a área disponível para recepção da luz em um determinado ângulo de incidência, formando um cone de entrada para luz no detector, o qual é delimitado pela integral dupla da Equação 5:

$$P_r = \int_0^{\text{FOV}} \int_0^{2\pi} \Phi_e d\psi d\lambda [W] \quad (5)$$

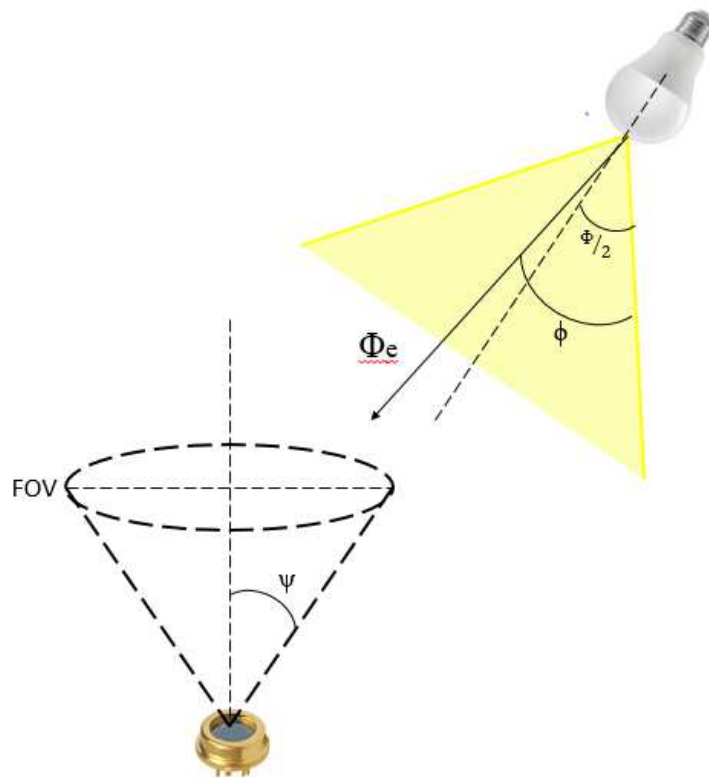


Figura 2 - Campo de visão FOV de um receptor optico compatível com VLC. Adaptado de [12].

Como a velocidade de processamento em banda larga de um fotodiodo de silício (Si) dependem do tamanho da área de detecção (Responsividade $[A/W]$) a utilização de fotodiodos com FOV mais amplo torna o sistema mais lento [37], desta forma, torna-se interessante aumentar o FOV do sistema de recepção sem perder as características físicas do fotodetector e continuar operando em banda larga em um campo mais amplo. Com intuito de resolver este problema, nas demais sessões deste trabalho é apresentada soluções para ampliação do campo de visão do detector, e ao final é demonstrado a utilização de fibras plásticas fluorescentes como antena optica e os resultados obtidos em testes em laboratório.

2.3 Efeitos da Fluorescência na Fibra Optica Plástica

A motivação para utilizar elementos fluorescentes como concentradores de luz em sistemas VLC se dá pelo fenômeno da fluorescência. Este mecanismo permite aproveitar o pico de fótons na região da cor Azul (450nm) gerado por uma lâmpada de luz branca como forma de bombeio para excitar os dopantes fluorescentes, a fim de aumentar a quantidade de fótons confinados dentro do elemento se valendo do efeito de espalhamento Mie para ampliar a quantidade de luz guiada até o fotodetector [15].

O material fluorescente absorve a luz incidente e a reemite em um comprimento maior que excita fluoróforos vizinhos gerando um efeito em série em todo o material. Parte da energia gerada pela remissão dos fluoróforos pode ser reabsorvida por outros fluoróforos ou escapar pelas bordas do material em forma de luz e calor por não conseguir atingir o ângulo de reflexão gerando atenuação do sinal. [19].

A Figura 4 ilustra o mecanismo de fluorescência a partir do bombeio externo de luz azul:

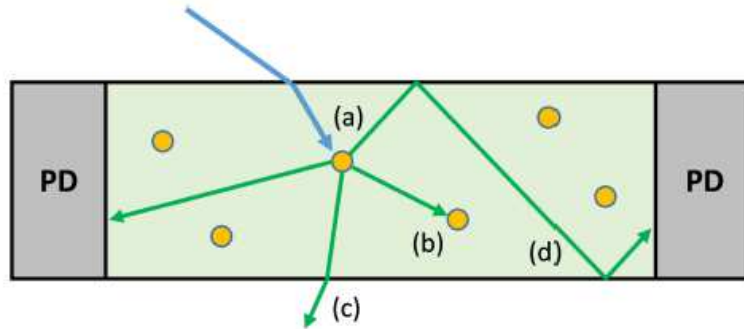


Figura 3 - Guiamento da luz através de material fluorescente acoplado a um fotodetector (PD) a partir de bombeio de uma fonte externa [19]

Existem alguns estudos onde antenas ópticas foram desenvolvidas utilizando materiais fluorescentes, por exemplo, a utilização de películas de filme fluorescente entre lâminas de vidro [8] ou placas dopadas com fluoróforos livres e [15] além de fibras plásticas (POF) fluorescentes [1].

Em todos os casos, estes materiais ampliam o campo de visão FOV por disponibilizar maior área para captação de luz, porém a utilização de filmes fluorescentes apresenta complexidade na montagem do sistema de recepção ou pela forma na qual os setups são apresentados, uma vez que o acoplamento entre o fotodetector e as placas com filmes fluorescentes necessitam de aparatos como lentes e guias para direcionar a luz capturada pelas placas além de serem mais caras se comparado a fibras plásticas. Desta forma, deste trabalho se concentra em propor uma antena óptica utilizando fibra plástica fluorescente acoplado diretamente ao fotodetector, sem a necessidade de aparatos complementares ao acoplamento, aproveitando dos fenômenos da Fluorescência para aumentar o ganho na captura da luz e seu guiamento através fibra plástica.

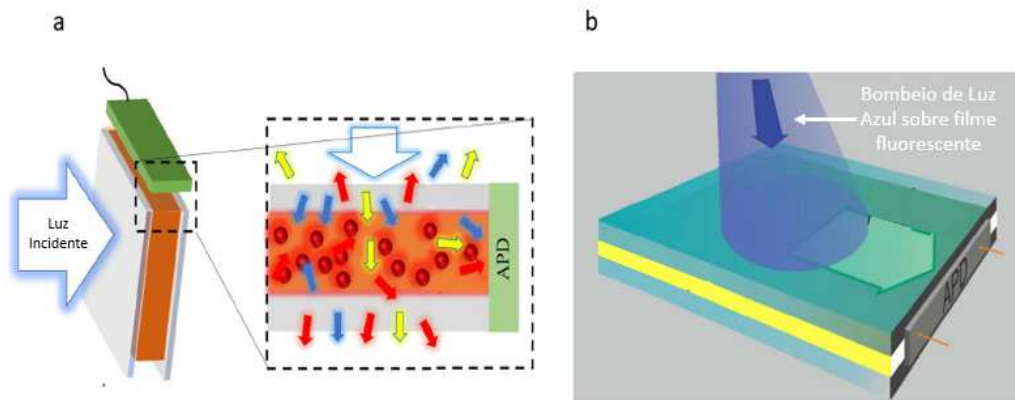


Figura 4 - Exemplos de Antenas Ópticas Fluorescente. a) Aplicação de filme fluorescente entre lâminas de vidro [8]. b) Placas dopadas com Coumarim [15]. [Adaptado pelo autor]

2.4 Métodos de ampliação do Campo de Visão de Sistemas VLC

Nesta sessão será descrito alguns métodos para ampliação do campo de visão de um fotodetector utilizado em VLC o qual vem sendo estudado a bastante tempo. No laboratório de comunicações ópticas (LACOP) da Universidade Federal Fluminense (UFF) este tema foi pesquisado em 2011, onde foi utilizado um conjunto de 6 LEDs de luz branca distantes aprox 2 metros do receptor. Esta distância representa uma altura média de um ambiente doméstico, ou seja, o trabalho demonstra uma aplicação indoor em dimensão real. O transmissor opera em modulação TTL (Transistor Transistor Logic) com um circuito de controle baseado em MOSFETs que são transistores capazes de chaveamento relativamente rápido em altas correntes, com uma taxa máxima de 3Mbtis que foi limitada pela interface USB-TTL utilizada para modular a fonte emissora.

No circuito de recepção foram utilizados 3 tipos de fotodetectores e realizado um comparativo entre as respostas obtidas entre eles. Em todos os casos foram utilizados Lentes convergentes de fundo plano para melhorar o acoplamento da luz. Também foi realizado um comparativo da banda recuperada pelo circuito de detecção com ou sem a utilização de filtro Azul na lente convergente.

Com a utilização de um fotodetector S6036 da empresa Hamamatsu e a uma distância de 2m da fonte emissora de luz branca, a banda recuperada pelo receptor foi de 1,7Mhz sem utilização do filtro azul. Já com a utilização do filtro, a banda medida passa para 5Mhz a uma taxa de transmissão de 10Mbits [35].

Binhai Yu et al propôs uma antena fluorescente utilizando estrutura ‘sanduiche’ composto por uma camada de filme de material fluorescente, sobreposta a uma lamina de

vidro que será responsável por guiar a luz capturada pelo sistema até o detector, que por sua vez foi colocado sobre uma superfície espelhada a fim de aumentar o espalhamento da luz confinada no sistema Filme x Vidro.

Neste trabalho, o arranjo permitiu o deslocamento angular da fonte de luz em relação ao fotodetector que permanece imóvel, ampliando o campo de visão do detector de 35° para 80°. [8]

Em um modelo similar ao apresentado por Binhai Yu, Pavlos P Manousiadis et al conseguiu um ganho de 12dB na captura da Luz utilizando um arranjo de filme fluorescente de coumarin – 9 (Cm6) de 1mm de espessura sobreposto a uma lâmina de vidro, conseguindo um ganho 4 vezes maior quando comparado com a não utilização da antena. [15].

Utilizando uma abordagem MIMO, Rahmat Mulyawan também utilizou uma estrutura “sanduiche” com filme em Corumarin-9 de 1mm de espessura disposto entre duas lâminas de vidro. Nesta proposta, o autor utilizou 2 fotodetectores do tipo avalanche (APD) acoplado as extremidades do concentrador fluorescente de 75mm de comprimento, o qual possuía uma lente de Fresnel em sua frente para concentrar o feixe de luz no centro do anteparo com filme fluorescente.

O receptor VLC foi posto a uma distância de 30cm de 2 lâmpadas LED de luz branca separados a uma distância de 30cm, e tanto os emissores quanto o receptor permaneciam fixos.

Este experimento não produziu resposta angular da antena optica, porém utilizando o concentrador fluorescente, o campo de visão foi ampliado em 22° se comparado a não utilização do dispositivo. [19].

Amna Riaz et al também utilizou material fluorescente para propor uma antena optica. Em seu estudo a autora propõe a utilização de POF fluorescente na cor verde e comprimento de 13cm, acoplado a um fotodetector através de um guia impresso em impressora 3D, o qual não permite passagem de luz através dele, de forma que a luz somente alcançasse o detector através da fibra fluorescente.

Na outra extremidade da POF foi inserido uma lente de Fresnel para melhorar o acoplamento da luz branca emitida pela lâmpada LED que permaneceu fixo em uma linha de visada direta entre a lâmpada e receptor VLC, o qual também permaneceu fixo.

A finalidade deste estudo foi verificar se o pico de luz azul contido na luz branca de uma lâmpada LED influência na largura de banda medido na saída do fotodetector utilizando POF fluorescente na cor verde. Para isto, foi utilizado um filtro de cor azul na frente da lente

de Fresnel para retirar o componente azul do experimento e comparar a largura de banda do sistema sem fluorescência gerada pela luz azul.

Com este experimento, foi possível verificar um aumento com largura de banda de 2,5Mhz para 5,5Mhz utilizando POF fluorescente na cor verde quando foi utilizado o filtro de luz azul [29]

Muitas pesquisas realizadas com tema VLC se concentram no potencial de altas taxas de transmissão aproveitando a grande largura de banda no espectro do visível, porém a necessidade de mobilidade entre os elementos que com põem uma comunicação VLC é minimizado. Este fato pode ser verificado pela escassez de artigos relevantes sobre o tema mobilidade em VLC que proponham soluções simples para diminuir a dependência angular e a necessidade de alinhamento entre emissor e receptor, pertinentes a utilização deste tipo de sistema. Mesmo em artigos que citam a necessidade de ampliação do campo de visão de um fotodetector VLC, em uma leitura mais atenta, a conclusão do artigo será concentrada na taxa de transmissão alcançada pelo dispositivo, além da utilização de materiais de valor elevado e setups complexos, como por exemplo, a utilização de filmes fluorescentes entre camadas de espelhos, que em uma busca na internet pode-se encontrar o elemento fluorescente coumarim por R\$ 477,00 [8] [15] [19].

Neste cenário, este trabalho propõem uma abordagem com foco em desenvolver um dispositivo simples e econômico, de fácil montagem e sem exigir equipamentos de precisão, que permita a ampliação do campo de visão e o aumento do poder de captura da luz em ângulos críticos onde o emissor esteja praticamente perpendicular ao detector, em situações onde a utilização de VLC inicialmente se mostraria inviável. O trabalho sugere uma aplicação Indoor para enlaces curtos, com distâncias entre emissor / receptor $< 1\text{m}$ em que o detector se desloque em relação ao emissor.

Capítulo 3 - Materiais Métodos e Resultados

Este capítulo é dedicado a apresentação dos elementos envolvidos durante o processo prático deste trabalho. O capítulo foi estruturado da seguinte maneira: descrição do equipamento criado para controlar o movimento angular da fonte luminosa, caracterização do Fotodetector, caracterização das Fibras Plásticas utilizada como antena Óptica VLC, caracterização da lâmpada LED determinação da resposta angular do receptor VLC, aplicação da antena óptica em formatos geométricos, e por fim, teste da reciprocidade das antenas.

3.1 Dispositivo Para Movimento Angular

Foi desenvolvido um esquema experimental para determinação da resposta angular do receptor VLC. Este dispositivo consiste em uma base fixa onde o fotodetector (PD) é posicionado e aí permanece imóvel. Ao longo de uma haste com comprimento $L=1\text{m}$, uma lâmpada comercial do tipo LED da marca Kiran (9W/127V/ Φ 810lm) de luz branca não-coerente foi encaixada e podia ser movimentada ao longo da haste em direção a base fixa. Desta forma, a haste permitia que a lâmpada avançasse ou recuasse longitudinalmente em direção ao fotodetector (PD). A haste também podia ser girada horizontalmente 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 0° . Este dispositivo não permitia o movimento vertical da fonte luminosa e também do fotodetector.

Como parte do receptor-VLC, foi utilizado um fotodiodo de Silício (Si) da Thorlabs modelo FDS010 o qual é 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.

Este aparato permitiu então realizar medidas de resposta óptica angular do receptor-VLC no intervalo $0^\circ - 90^\circ$, com intervalos de 5 em 5° para diversas distâncias radiais $L=1\text{m}$ previamente fixadas. A Figura 6 representa o dispositivo visto de cima desenvolvido para o experimento:

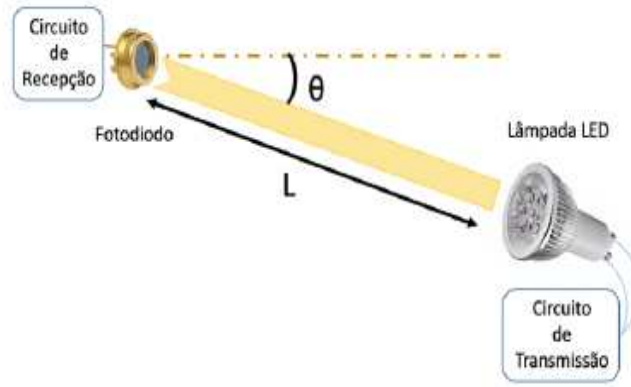


Figura 5 - Esquemática da montagem do aparato para determinação da resposta angular de um receptor VLC.

Disposto deste aparato, inicialmente foi realizado a caracterização da saturação do fotodiodo em função de sua distância em relação a lâmpada. A função deste teste é conhecer a curva característica do fotodetector e sua resposta em Tensão (V) para a intensidade de luz incidente proporcionada pela lâmpada LED.

A varredura compreende a distância total da haste $L=1\text{m}$, sendo 1m a posição mais distante entre a lâmpada e o fotodetector. As medidas tiveram um intervalo de 5cm iniciando em 1m até 0m sendo 0m a distância mais próxima entre a lâmpada e o fotodetector como mostra a Figura 6:

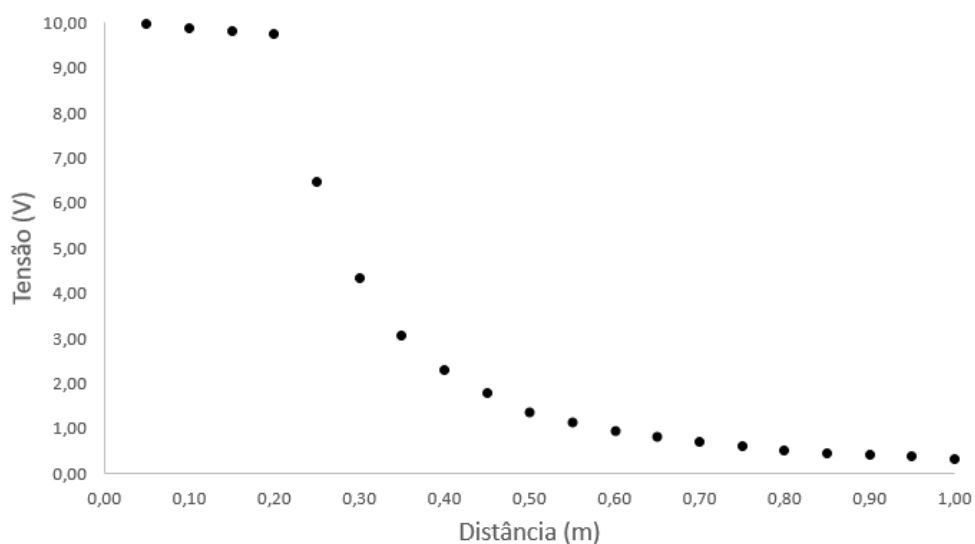


Figura 6. Curva característica de saturação do fotodiodo

A saturação do Fotodiodo ocorre a uma distância de 20cm da lâmpada e a 50cm o fotodiodo tem uma resposta em prox. 1,5V. Como a aplicação do modelo apresentado por este trabalho é um enlace ultracurto ou *Personal Area Network* (PAN), todas as medidas foram tomadas a partir da distância de 50cm do LED simulando uma aplicação real por exemplo, em luz de leitura para poltronas de aviões e ônibus.

Após a caracterização da saturação do fotodiodo, foi realizado uma varredura inicial sem a utilização de antena ótica, com a lâmpada LED 50cm distante do fotodetector, movendo a haste de forma angular e horizontalmente em relação ao detector abrangendo a região entre 0° a 90° sendo 0° coincidente com o centro do fotodiodo. O intuito deste teste é determinar a curva característica da resposta angular do fotodetector.

Neste ensaio o detector foi colocado em frente de um anteparo de plástico permitindo que toda a região de detecção do fotodiodo ficasse exposta a captura da luz sem áreas de sombreamento, ou seja, o detector do fotodiodo não estava “enterrado” dentro do anteparo plástico. A curva característica do fotodiodo é mostrada na Figura 8.

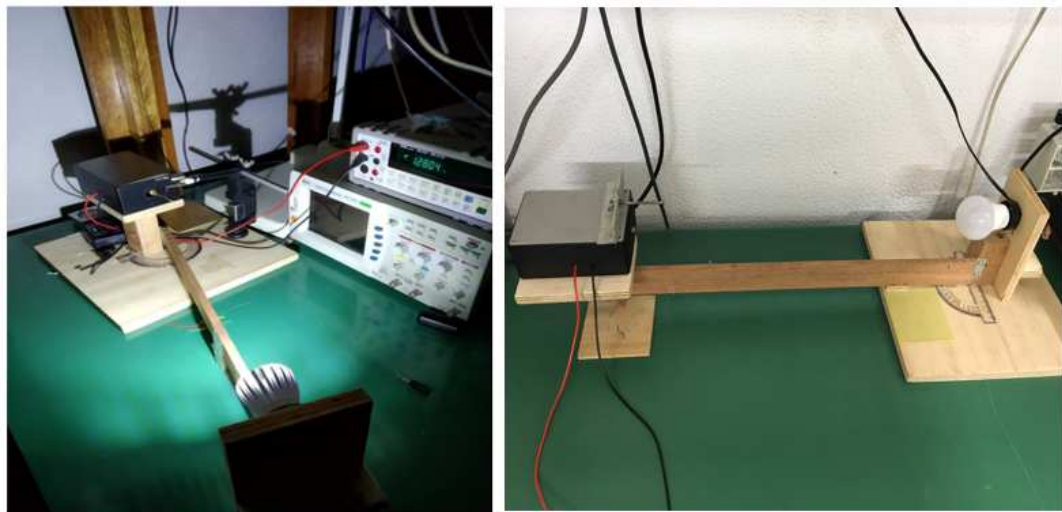


Figura 7. Dispositivo desenvolvido para movimento angular horizontal [Autor]

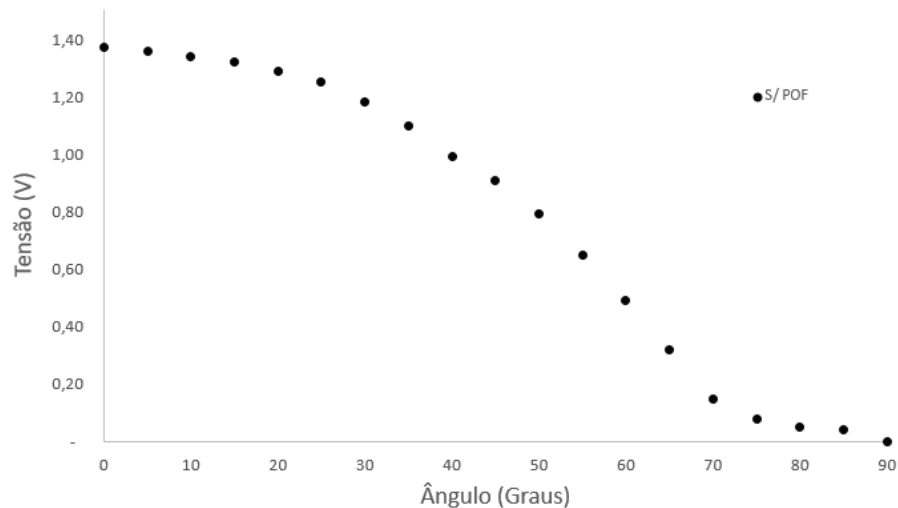


Figura 8 Resposta angular do fotodetector sem utilização de antena óptica com emissor a 50cm de distância do receptor.

3.2 Caracterização da Fonte Emissora e das Fibras Plásticas

Esta sessão se destina a demonstrar a caracterização das POF Fluorescente e do tipo PMMA, além de determinar a curva espectral emitida pela lâmpada LED. Para realizar a caracterização, foi utilizado um espectrômetro da Thorlabs SP1 400nm-800nm com abertura de 25 μ m em um ambiente escuro.

3.2.1 Caracterização da Lâmpada LED

Com a utilização do espectrômetro foi possível conhecer a curva espectral da lâmpada LED de Luz Branca da marca Kiran (9W/127V/ Φ 810lm). Mesmo utilizando um espectrômetro de 400nm a 800nm, houve medidas até a faixa de 739nm, na qual possui intensidade próxima a zero, sendo possível desprezar valores além deste ponto.

O procedimento foi realizado de forma direta, apontando a lâmpada LED diretamente para o receptor do espectrômetro, sem a utilização de acopladores ou guias para confinar a luz da lâmpada.

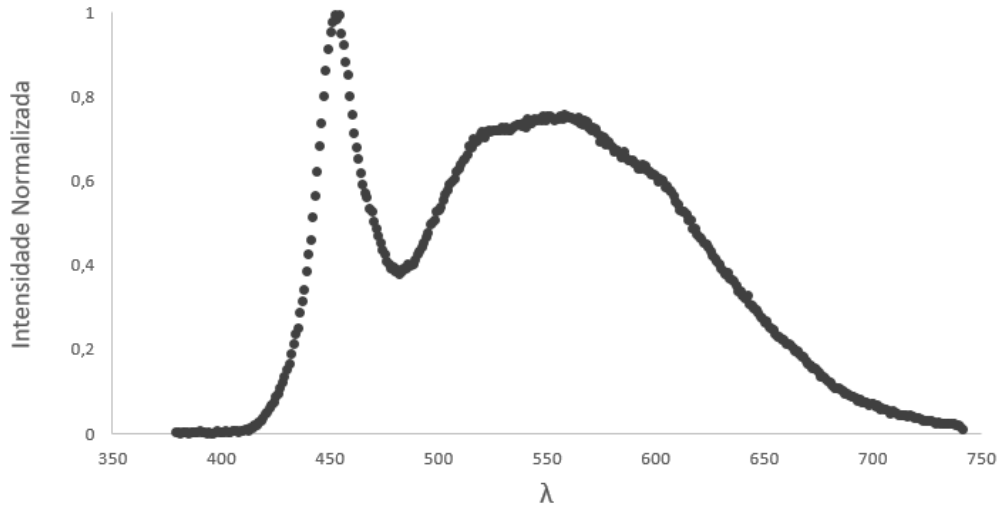


Figura 9 Curva espectral da lâmpada LED de luz branca utilizada nos experimentos [Autor]

3.2.2 Caracterização das Antenas Ópticas

O acoplamento dos segmentos de POF também foi realizado de forma direta ao fotodetector do espectrômetro, porém, foi colocando um anteparo de borracha preto em frente à entrada do espectrômetro de forma a impedir que luz ambiente entrasse na cavidade de detecção do aparelho gerando distorções durante a medição. A caracterização foi realizada utilizando segmentos com 5cm de comprimento de POF nas cores Amarelo, Verde e Vermelho, além da POF de PMMA. A lâmpada LED de luz branca utilizada na caracterização tem o mesmo perfil espectral mostrado na Figura 9.

Observando a curva espectral das POFs, é possível observar facilmente o pico de intensidade na região do comprimento de cor de cada fibra, provocado pela excitação causada aos dopantes fluorescentes pelo pico em 450nm, na região da cor azul gerado pela lâmpada LED que é utilizado como bombeio para induzir a fluorescência na POF que será propagada através de seu comprimento, permitindo uma banda total do sistema na ordem de 50Mhz [38].

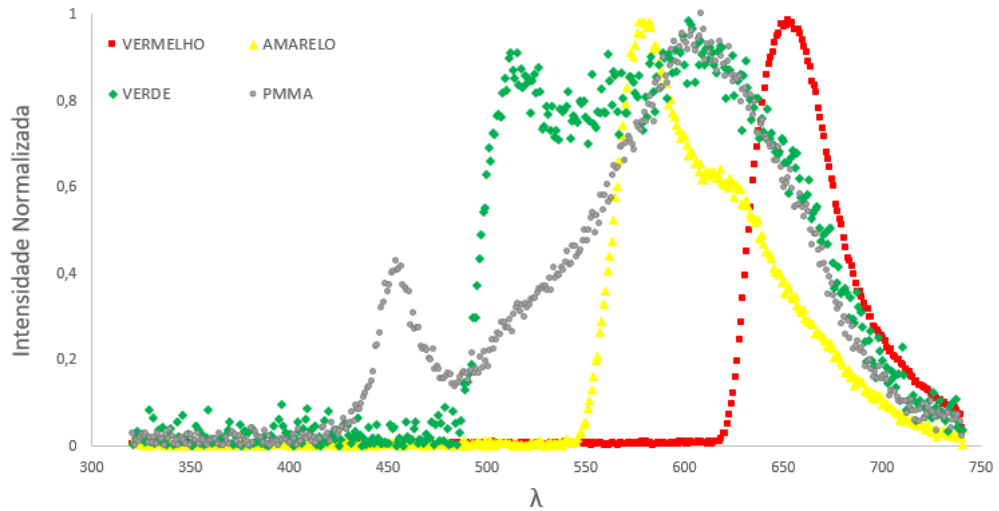


Figura 10 - Curva espectral POFs com 5cm de comprimento

3.3 Utilização de Fibra Plástica de Poliestireno POF como Antena Óptica

Nesta etapa, a mesma varredura angular foi realizada, porém desta vez com a utilização de pequenos segmentos de POF PMMA in natura, seguindo-se de testes com 3 segmentos de POF poliestireno fluorescente nos modelos verde (IF- 810082), amarela (IF- 810083) e vermelha (IF-810087) produzidas pela Industrial Fiber. Este arranjo utilizando POF chamaremos de “antenas ópticas”.

As antenas ópticas foram simplesmente acopladas *butt – to – butt* ao fotodiodo através de um pequeno guia que serviu como estrutura para acomodar o segmento de fibra a frente do detector de forma a permitir que a luz também alcançasse a área de detecção do fotodiodo. Todos os testes foram realizados em ambiente escuro para evitar distorção do sinal obtido devido a outras fontes de luz.

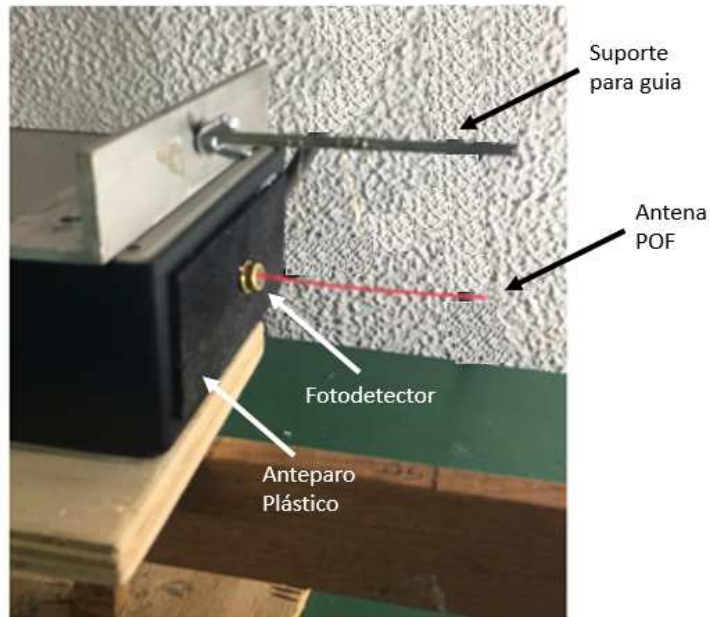


Figura 11 - Detalhe do acoplamento *butt to butt* entre a Antena Óptica e o fotodetector.

Para cada cor de POF foram realizadas medições com 3 tamanhos de antenas. A escolha dos tamanhos das antenas foi baseada na janela de tempo de fluorescência do na ordem de 10ns o que limita a utilização de segmentos maiores de Fibras Fluorescente devido a atenuação gerada pelo próprio fluoróforos presente na fibra [38], desta forma, pequenos seguimentos de POF fluorescente foi utilizado com comprimentos de 1cm, 3cm e 5cm. A ideia do teste é verificar a eficácia deste tipo de elemento acoplado ao fotodetector na ampliação do campo de visão FOV do receptor VLC.

Os resultados são médias de 3 varreduras realizadas em cada comprimento de POF e sua resposta é obtida em Tensão (V) e a Figura 12 mostra os resultados para antenas ópticas de 1cm de comprimento:

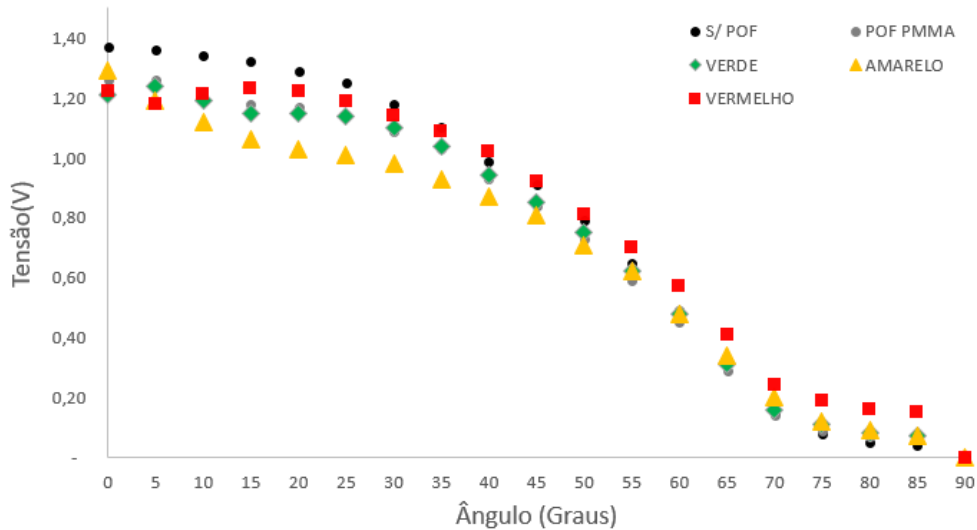


Figura 12 - Resposta angular do fotodetector utilizando antena optica com segmento de 1cm

Analisando a Figura 11 verificamos que o segmento de 1cm de POF na cor vermelha, a partir de um ângulo de 40° proporciona ganho de sinal ao sistema em relação a utilização do fotodetector sem antena. Porém, em ângulos onde a lâmpada está cada vez alinhada ao detector, a antena produz não traz ganho ao sistema, gerando atenuação que pode ser observada no intervalo entre 0° – 35°. Este fato pode ser explicado pelo sombreamento causado pelo acoplamento da POF sobre a área de detecção do fotodiodo. As Figura 13 e 14 mostram os resultados para antenas ópticas com segmentos de 3cm e 5cm:

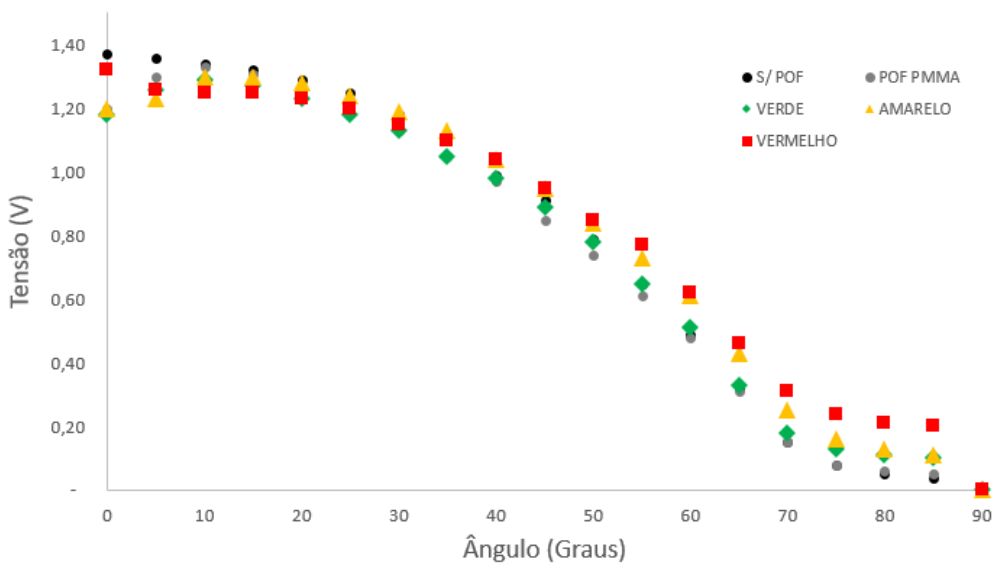


Figura 13 - Resposta angular do fotodetector utilizando antena optica de 3cm.

Como esperado, conforme o comprimento do segmento de POF aumenta, maior é o ganho obtido no intervalo entre 45°-90° o que representa um enlace cada vez mais fora de visada, além de aumentar a planicidade da captura da luz pelo Fotodetector. Podemos associar este resultado ao aumento da área disponível para captura da luz proporcionado pela antena optica acoplada ao fotodiodo, o qual em situações onde o emissor está em posição transversal a face do detector direciona parte da luz através do núcleo da POF até a região de detecção do fotodiodo, aproveitando a luz que inicialmente não seria captada pelo fotodetector

Em contrapartida, em situação de alinhamento entre emissor e receptor, o acoplamento da antena no fotodetector produz atenuação. Este fenômeno fica evidente no intervalo 0°-20° onde a antena não é eficiente na captura da luz, e a utilização do fotodetector sem antena acoplado se mostra mais eficiente. Na figura 14 é possível observar que utilização de POF verde com 5cm de comprimento apresenta um desempenho melhor se comparado a POF vermelha no intervalo entre 5°-25°. Isto se deve a dinâmica complexa de espalhamento da luz de excitação e de fluorescência, assim como a absorção e reabsorção levando em conta que embora a luz de excitação seja a mesma, as POFs fluorescentes são diferentes nos seus dopantes e concentrações, resultando numa resposta óptica distinta. Outra possibilidade para este efeito é o alinhamento entre a POF verde e o fotodetector pois como foram simplesmente acopladas, possíveis distorções por falha no acoplamento podem ocorrer [1].

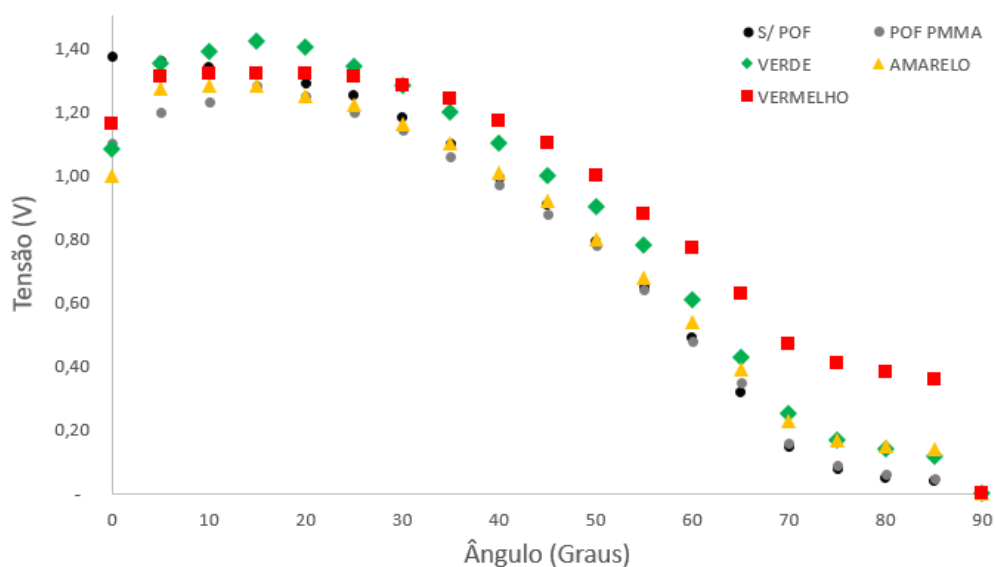


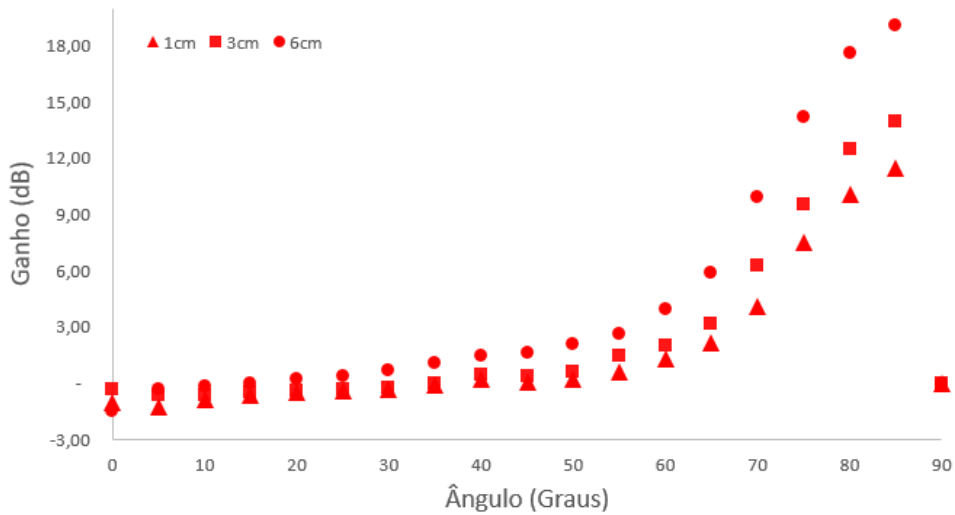
Figura 14 Resposta angular do fotodetector utilizando antena optica de 5cm.

Para que seja possível comparar o ganho entre as antenas e o fotodetector, é necessário transformar o resultado em Tensão (V) para Decibéis (dB) através da fórmula de Ganho para tensão que relaciona a tensão na saída do fotodetector sem a antena óptica V_{out} com a tensão medida utilizando a antena V_{in} :

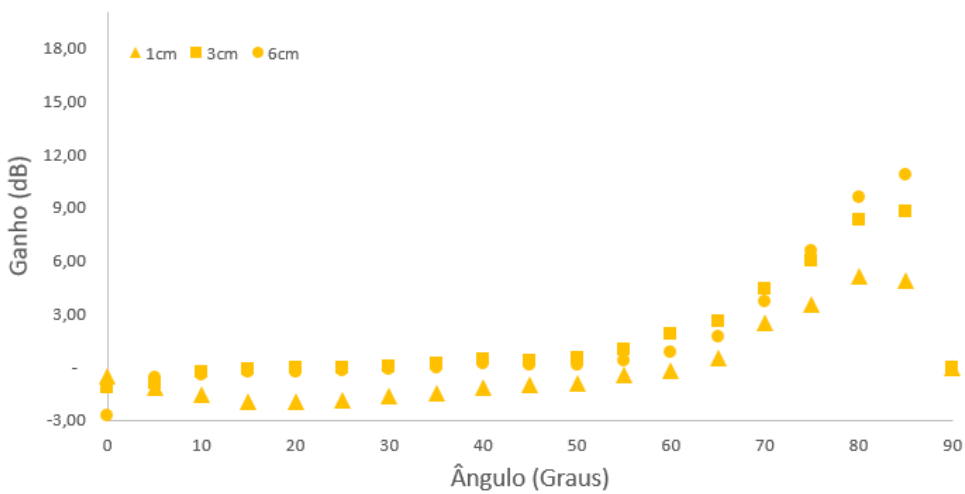
$$Ganho(dB) = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (8)$$

A Figura 15 mostra a relação do ganho entre os diversos comprimentos de POF Fluorescentes utilizado no experimento, nas cores Vermelho, Amarelo e Verde respectivamente.

A)



B)



C)

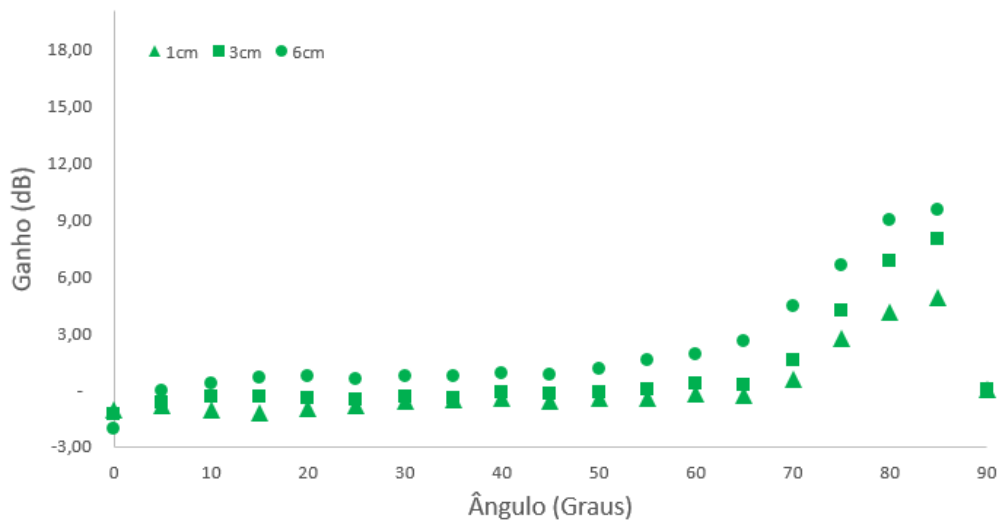


Figura 15 Comparativo do ganho em dB entre as antenas a) Vermelha b) Amarelo c) Verde

Com a utilização de POF Vermelha com 5cm de comprimento, foi possível obter um ganho de 19dB no ângulo de 85°, o que representa um ângulo totalmente fora de visada do fotodetector, perpendicular ao fotodiodo, deixando claro a funcionalidade da antena optica proposta apresentada neste trabalho.

3.4 Reciprocidade entre Emissor x Receptor

Nesta parte do experimento foram realizados testes de reciprocidade da antena optica. Neste teste, o receptor VLC foi transladado horizontalmente em relação a lâmpada LED, que por sua vez ficará fixo, diferentemente dos primeiros testes, no qual o receptor VLC estava fixo. O objetivo do teste é verificar se o fotodetector em movimento terá a mesma performance que obteve quando estava imóvel.

Analisando a curva características do fotodetector Fixo x Móvel vemos que a antena não é reciproca. O motivo para a não reciprocidade dos resultados se dá pela abertura do campo de visão FOV do fotodetector que é limitado pela equação 8 bem como a abertura angular da lâmpada. Enquanto o detector permanece imóvel, o FOV do detector não é amplo o bastante para capturar luz em ângulos maiores que 75°, chegando a 0 sinal quando a fonte está a 90° em relação ao detector.

Entretanto, quando a lâmpada permanece imóvel e o detector se movimenta em relação a ele, o campo de visão do detector e a abertura angular da lâmpada são suficientes para que haja captura da luz pelo fotodiodo mesmo em ângulos maiores que 75°,

estabelecendo um link optico mesmo em 90° em uma situação de perpendicularidade entre os elementos.

Para contornar esta situação de não reciprocidade, foi utilizado antenas opticas fluorescentes coloridas em um setup com emissor fixo. Os mesmos parâmetros de distância entre emissor e receptor foi utilizado neste ensaio, porém, apenas segmentos de POF com 5cm de comprimento foram utilizados como antena optica por terem obtido melhor resultado no ensaio com o fotodetector fixo.

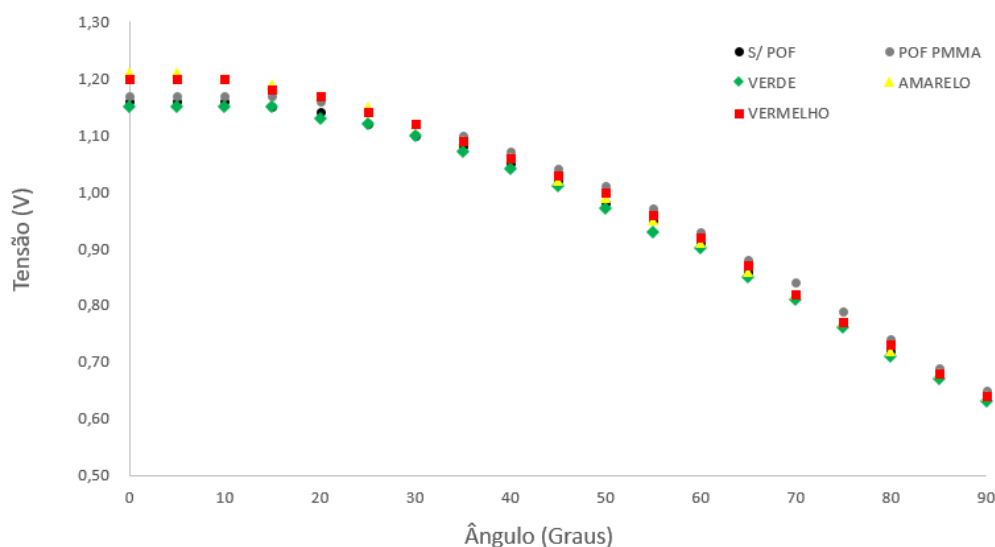


Figura 16 Resposta Angular do receptor VLC com antena optica de 5cm de comprimento – Emissor Fixo

A utilização das antenas opticas acopladas ao fotodetector que se movem horizontalmente em relação a lâmpada LED produziu ganho quase nulo para ângulos cada vez mais fora de visada. O motivo para o baixo desempenho é explicado pelo valor de abertura do semiângulo da lâmpada, onde sua intensidade luminosa diminui conforme se aproxima do ângulo crítico de abertura, reduzindo seu valor pela metade fora deste limite, o qual não é compensado pelo ganho produzido pela captura da luz através da antena optica.

É possível verificar na Figura 16 que a abertura angular da lâmpada LED utilizada no experimento é de 120° uma vez que a partir de 30° a resposta em tensão decaiu linearmente até o ângulo de 90°.

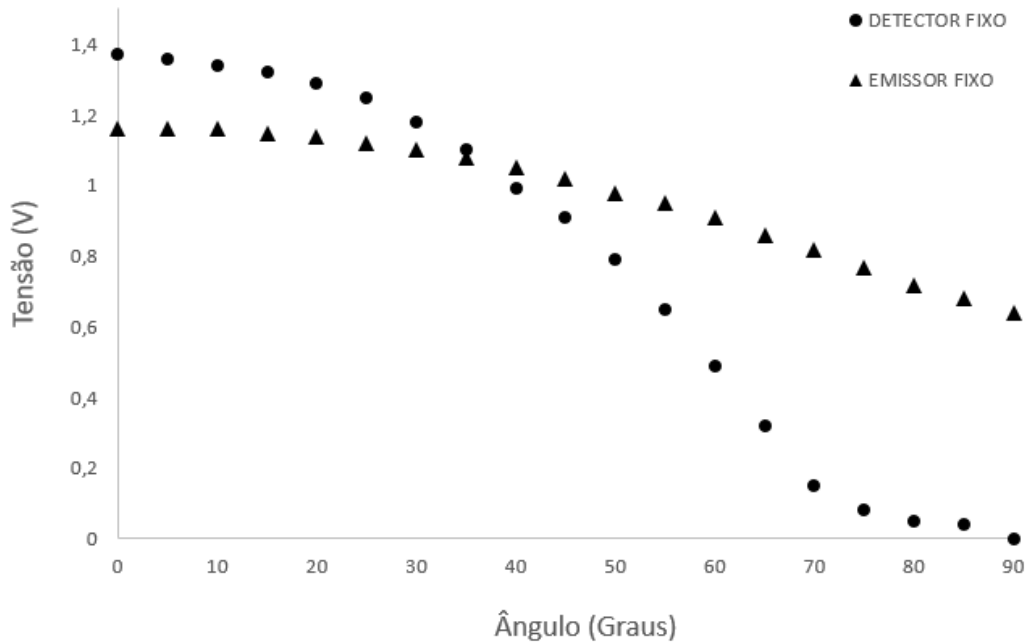


Figura 17 Reciprocidade da resposta angular do Fotodetector. Comparativo entre Emissor Fixo x Emissor Móvel.

3.5 Antenas Ópticas em Formato Geométrico

Neste experimento é apresentado o resultado da utilização antenas ópticas em formato geométrico. A motivação para realizar este experimento é determinar se a forma geométrica da antena contribui no aumento do poder de captura da luz do receptor VLC.

Segmentos de 5cm de POF de PMMA e Fluorescentes coloridas foram unidas entre si através de cola transparente, que possui o mesmo índice de refração das fibras de Sílica, e foram dispostos em formatos geométricos. Foram testados segmentos com 2 POFs unidas verticalmente e outro segmento também com 2 POFs dispostas horizontalmente uma em relação a outra. Também foram realizados testes com 3 segmentos de POF unidas de forma triangular entre si, e por fim, 4 segmentos de POF unidas entre si em um formato quadrado.

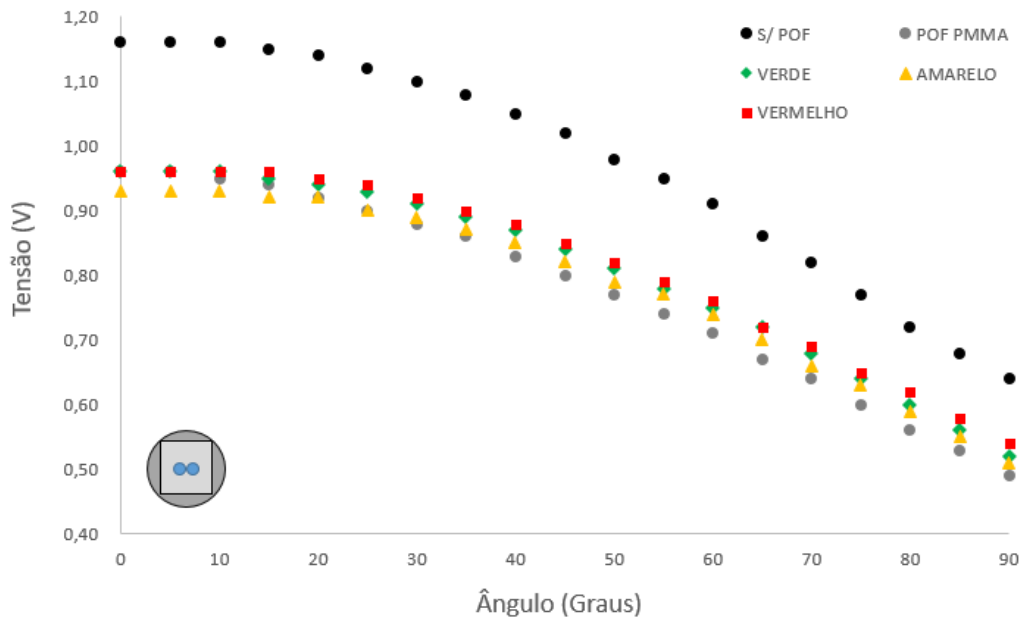


Figura 18 Resposta Angular do receptor VLC com antenas em formato geométrico

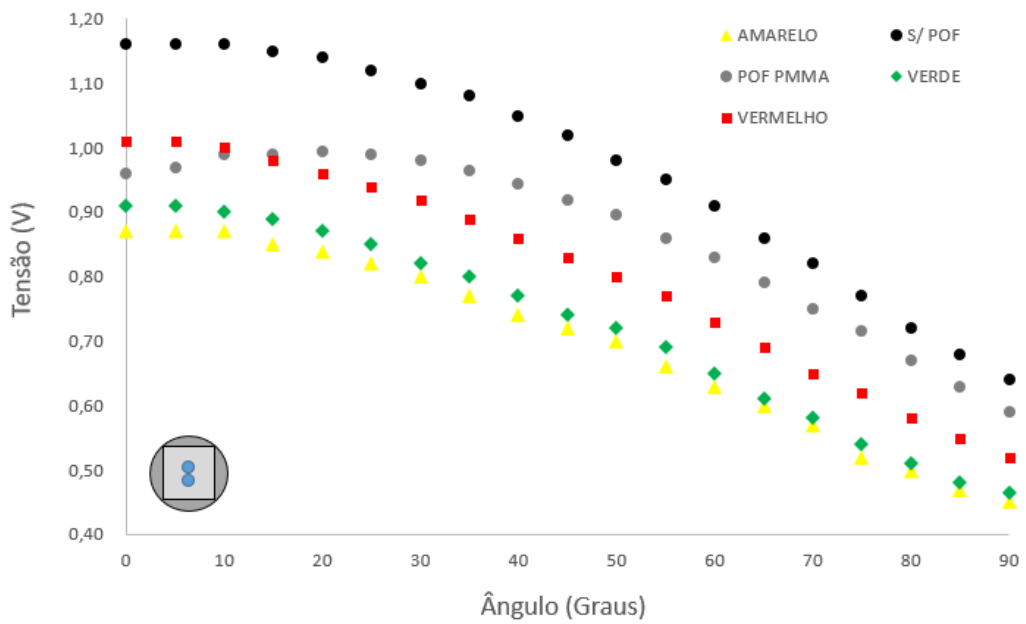


Figura 19 Resposta Angular do receptor VLC com antenas em formato geométrico

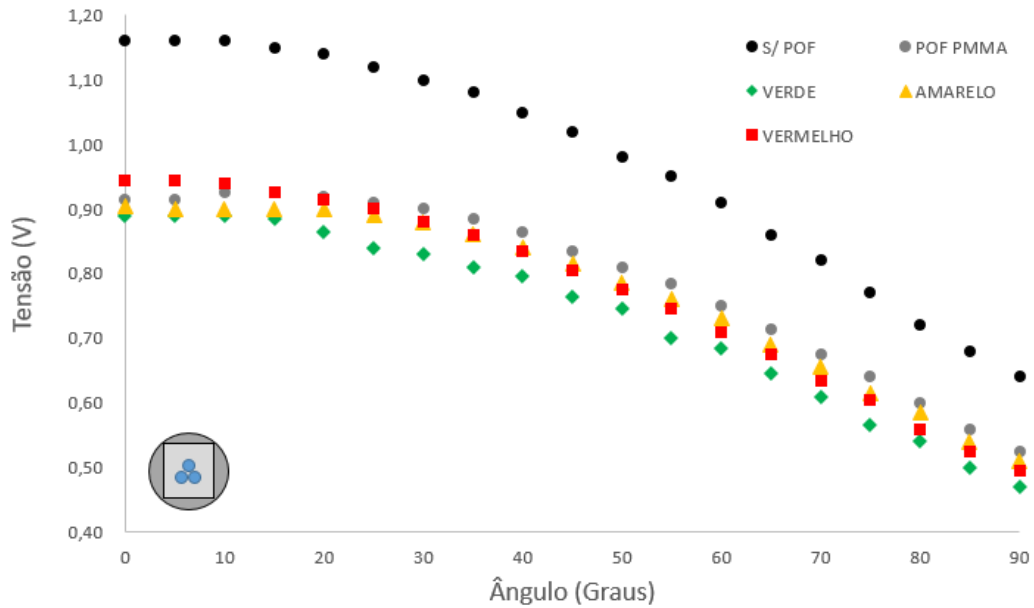


Figura 20 Resposta Angular do receptor VLC com antenas em formato geométrico

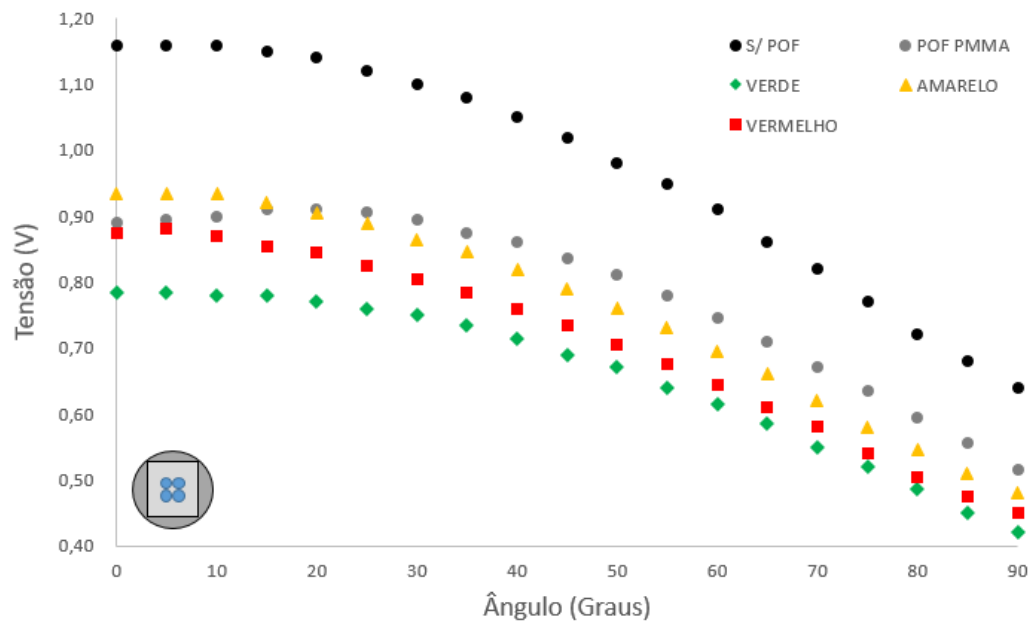


Figura 21 Resposta Angular do receptor VLC com antenas em formato geométrico

Neste experimento, nenhuma antena produziu ganho de sinal ao sistema, pelo contrário, atenuou a quantidade de luz recebida pelo fotodetector sugerindo que o aumento no diâmetro da antena não aumenta a quantidade de luz capturada pelo fotodetector. Novamente atribui-se este fato a geração de sombra pela antena optica sobre a área sensível a luz do fotodiodo.

Analisando a Figura 19 e 21, verificamos que ambos possuem uma resposta parecida, evidenciando que os fótons que escapam do núcleo do segmento de fibra mais adiantado e atravessam a POF são suficientes para excitar a fluorescência do segmento de POF subsequente, ou seja, mais segmentos de POFs subsequentes também não aumenta o ganho do receptor VLC.

3.6 Utilização de Múltiplas Lâmpadas LED

Este tópico é dedicado a conhecer a resposta angular do receptor VLC a partir da incidência de múltiplas fontes de luz. O objetivo é verificar se o acoplamento de luz na antena optica melhora em ângulos de visada direta entre o emissor e receptor, o qual apresentou baixa eficiência nos testes realizados com apenas uma lâmpada, além de caracterizar a resposta do receptor VLC submetido a incidência de luz fornecida por múltiplas fontes. Para este teste, o Receptor VLC ficou imóvel enquanto um aparato disposto com 2 lâmpadas LED que podiam se distanciar lateralmente entre si de forma controlada realizava movimento angular movendo –se horizontalmente em relação ao receptor.

Apesar da lâmpada utilizada emitir luz branca a partir de um conjunto de micro LEDs e da utilização de mais de uma fonte emissora de luz, esta abordagem não sugere um arranjo do tipo MIMO pois foi utilizado apenas um fotodetector na recepção da luz.

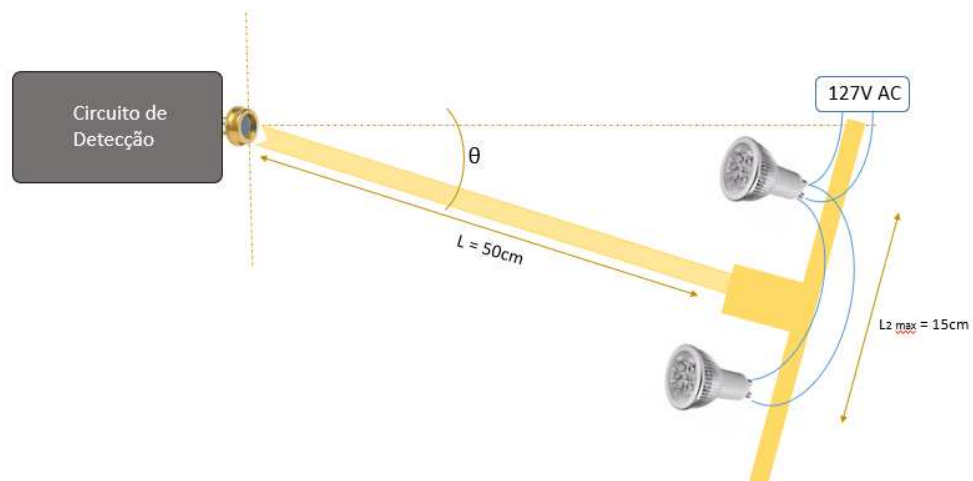


Figura 22 Esquemática da montagem do aparato para determinação da resposta angular de um receptor VLC utilizando 2 lâmpadas visto de cima.

Inicialmente as lâmpadas foram dispostas uma ao lado da outra encostando tangencialmente entre si. Este ponto é coincidente com o centro do fotodetector determinando o ponto inicial do deslocamento entre as lâmpadas, sendo a distância de 15cm o maior espaçamento possível devido à limitação do dispositivo. Os testes foram realizados espaçando as lâmpadas em intervalos de 5cm, ou seja, cada lâmpada se desloca lateralmente, afastando-se uma da outra 2,5cm do ponto central do fotodetector.

A cada vez que as lâmpadas se moviam entre si, eram realizadas varreduras de controle sem a utilização das antenas ópticas a fim de determinar a curva característica do fotodetector para aquele espaçamento de lâmpada:

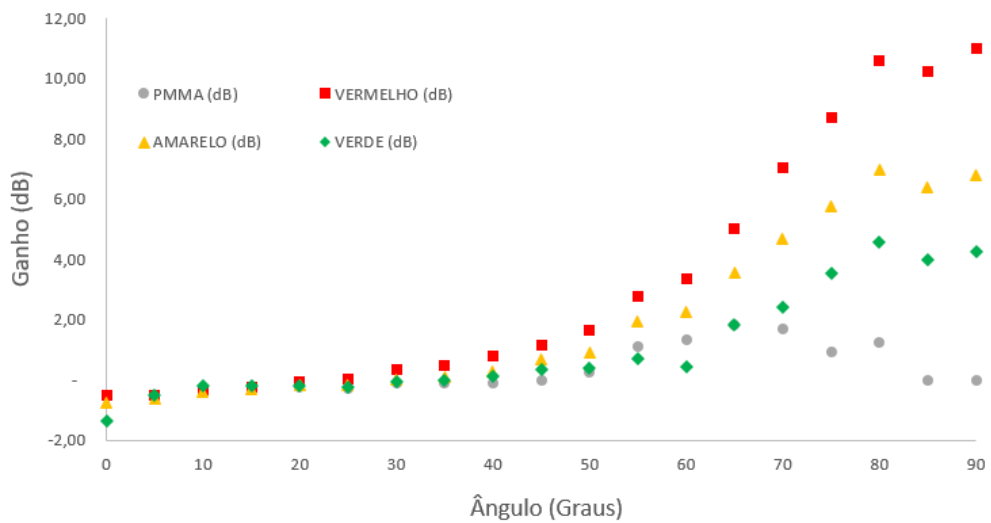


Figura 23 Resposta angular do receptor VLC utilizando 2 fontes de luz distantes 0cm entre si

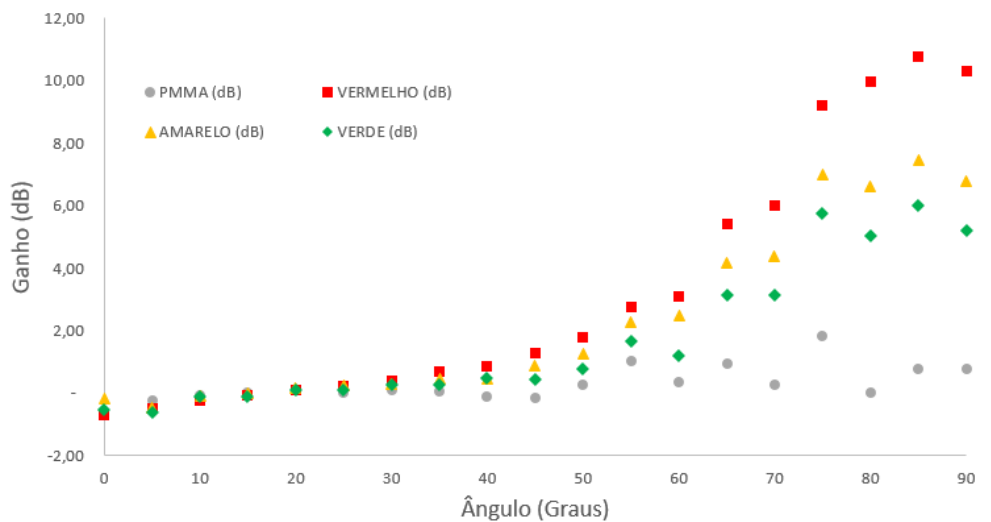


Figura 24 Resposta angular do receptor VLC utilizando 2 fontes de luz distantes 5cm entre si

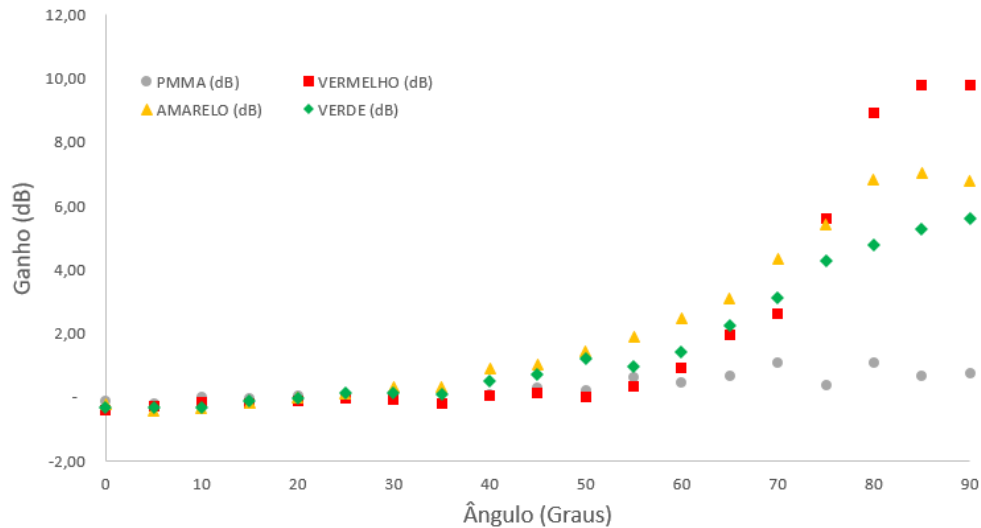


Figura 25 Resposta angular do receptor VLC utilizando 2 fontes de luz distantes 10cm entre si

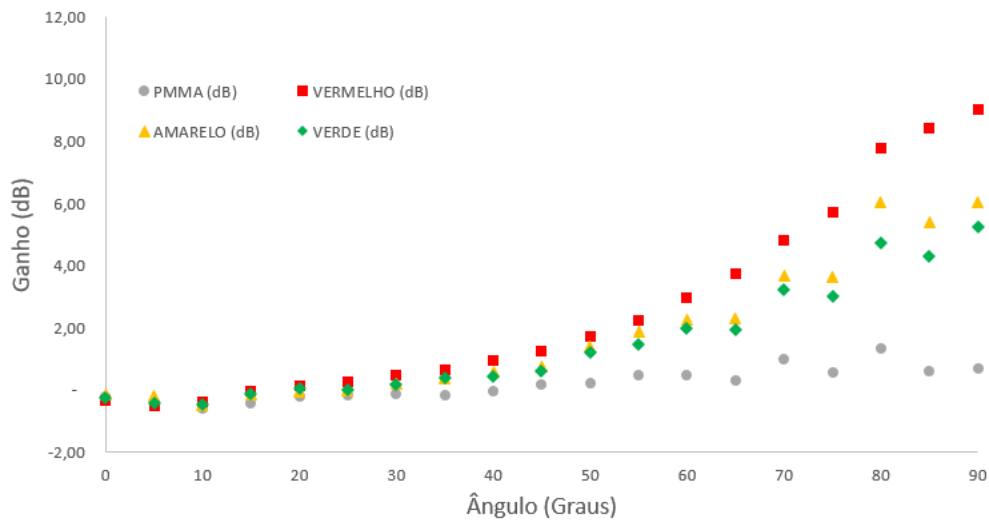


Figura 26 Resposta angular do receptor VLC utilizando 2 fontes de luz distantes 15cm entre si

Com a utilização de mais fontes, a tensão de saída do fotodetector aumentou aprox. 75% devido a maior quantidade de luz sobre o receptor VLC quando comparado ao mesmo setup utilizando apenas 1 lâmpada. A utilização de 2 lâmpadas distantes 15cm entre si melhorou o acoplamento da luz em 2,5dB na região de visada direta mostrando que o sombreamento que a antena causa no detector é facilmente compensada com a existência de mais fontes de luz se aproximando de uma aplicação real em ambientes indoor. Os testes mostraram também ser possível um ganho de 10dB utilizando 2 lâmpadas distantes 10cm entre si e uma antena fluorescente vermelha com 5cm de comprimento. É possível observar

que o receptor obtém ganhos maiores que 3dB a partir do ângulo de 55° para todas as distâncias de espaçamento entre as lâmpadas dobrando a intensidade do sinal recebido.

Capítulo 4 - Conclusão e Proposta de Trabalho Futuro

Foi demonstrado que a utilização de segmentos de POF acoplada a um fotodetector, que neste trabalho foi chamado de “Antena Optica”, resulta em um receptor compatível com VLC. A seção 3.2 demonstrou que entre os tipos de fibras aplicadas no estudo, a utilização de um segmento de POF Fluorescente Vermelha com comprimento de 5cm proporciona uma ampliação do campo de visão FOV do fotodetector em 19dB a um ângulo de 85°, que representa um enlace completamente fora da linha de visada do fotodetector.

Na seção 3.3 é demonstrado o teste de reciprocidade das antenas no qual produziu concluiu que os sinais das antenas são diferentes quando o detector se movimenta e não é compensado mesmo com a utilização das antenas. Entretanto, mesmo não sendo reciprocas, a utilização fibra plástica fluorescente vermelha como antena optica se mostrou 10dB mais eficiente um ângulo de 70°, no setup onde o fotodetector fica imóvel enquanto a fonte de luz se movimenta.

Na sessão 3.4 foi mostrado que a a utilização de antenas opticas em formato geométrico não aumenta o ganho para o receptor VLC, mesmo quando o formato geométrico era dotado de 4 segmentos de POF fluorescente sugerindo que o aumento do diâmetro da antena não é suficiente para compensar o sombreamento que ela causa na área excitação do fotodetector quando acopladas pelo método butt – to – butt.

Por fim, foi realizado um ensaio utilizando múltiplas fontes de luz na sessão 3.5. Este teste mostrou que a POF vermelha teve seu ganho ampliado em 8 dB em um ângulo de 85° com a utilização de 2 lâmpadas distantes 15cm entre si, servindo como esboço para a criação de uma matriz de espaçamento de fontes de luz versus resposta angular do fotodetector, o qual poderá ser aplicado para determinar a localização dos pontos de luz em um ambiente fechado. Para isto, este ensaio precisar ser melhor desenvolvido.

4.1 Proposta de Trabalhos Futuros

Este trabalho se limitou a apresentar os resultados quantitativos da utilização de fibras plásticas como antena optica. Neste sentido, análises mais profundas precisam ser realizadas no sistema proposto.

Sugerimos como trabalho futuro a determinação da relação Sinal x Ruído em um enlace VLC utilizado a antena optica proposta neste trabalho.

Utilização de modulação OFDM no setup VLC proposto para determinação da taxa de transmissão do sistema além de uma investigação mais detalhada sobre a utilização de múltiplas fontes de luz, aproximando o sistema aqui proposto em um arranjo MIMO.

Determinação de relação de distâncias entre lâmpadas LED x Receptor de modo a gerar uma matriz que permita determinar o posicionamento da lâmpadas, em função do sinal de saída do receptor VLC para elaborar a cartografia do enlace adicionando mais medidas em distancias maiores que 50cm para aplicações domesticas (distâncias entre 2 e 3m).

Bibliografia

- [1] Antonio A. C. Batista, Juliana O. Paula, Andrés P. L. Barbero, Ricardo M. Ribeiro e Vinicius N. H. Silva, “Receptor de Comunicações por Luz Visível (VLC) Usando Antena de Fibra Óptica Plástica” MoMag (2020).
- [2] Komine T, “Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights” IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 50, No. 1, FEBRUARY 2004.
- [3] Irina Stefan* and Harald Haas, “Analysis of Optimal Placement of LED Arrays for Visible Light Communication,” Institute for Digital Communications, The University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3JL, UK.
- [4] POHLMANN, C, “Visible Light Communication,,” Seminar Kommunikationsstandards in der Medizintechnik.
- [5] Eitane et al., “OPTICAL WIRELESS COMMUNICATIONS REALIGNMENT,” Pub. No.: US 2007/0031152 A1 Pub. Date: Feb. 8, 2007.
- [6] Ilker Demirkol, Daniel Camps-Mur, Josep Paradells, Marc Combalia, Wasiu Popoola, and Harald Haas, “Powering the Internet of Things,” IEEE Communications Magazine • June 2019.
- [7] “Mercado global de mídia e entretenimento vai movimentar US\$ 2,23 trilhões em 2021,” disponível em <https://www.pwc.com.br/pt/sala-de-imprensa/noticias/pwc-mercado-global-midia-entretenimento-movimentar-17.html>.
- [8] Binhai Yu, Shunming Liang, Xinrui Ding , Zongtao Li , and Yong Tang, “A Sandwich Structure Light-Trapping Fluorescence Antenna With Large Field of View for Visible Light Communication,” IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 68, NO. 2, FEBRUARY 2021.
- [9] R. M. Marè, C. L. Marte and C. E. Cugnasca, “Visible Light Communication Applied to Intelligent Transport Systems: an Overview,” IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 14, NO. 7, JULY 2016.

- [10] A. C. Boucouvalas, Periklis Chatzimisios, Zabih Ghassemlooy, Murat Uysal, and Konstantinos Yiannopoulos, "STANDARDS FOR INDOOR OPTICAL WIRELESS COMMUNICATIONS," IEEE Communications Magazine Communications Standards Supplement • March 2015.
- [11] Renhai Feng, Mingjun Dai, Hui Wang, Bin Chen Xiaohui Lin , "Linear Precoding for Multiuser Visible-Light Communication With Field-of-View Diversity," Volume 8, Number 2, April 2016
- [12] FRITZ R. GFELLER AND URS BAPST, "Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation," PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 67, NO. 11, NOVEMBER 1979
- [13] DAI WANG AND TIAN LAN, "Design of a gradient-index lens with a compound parabolic concentrator shape as a visible light communication receiving antenna," Acta Phys. Sinica 64, 024201 (2015).
- [14] XING PENG , LINGBAO KONG, XIANG SUN , AND HAOYU LYU, "Design and Analysis of Optical Receiving Antenna for LED Visible Light Communication Based on Taguchi Method," Shanghai Engineering Research Center of Ultra-Precision Optical Manufacturing, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China
- [15] PAVLOS P. MANOUSIADIS, SUJAN RAJBHANDARI, RAHMAT MULYAWAN, DIMALI A. VITHANAGE, HYUNCHAE CHUN, GRAHAME FAULKNER, DOMINIC C. O'BRIEN, GRAHAM A. TURNBULL, STEPHEN COLLINS, AND IFOR D.W. SAMUEL, "Wide field-of-view fluorescent antenna for visible light communications beyond the étendue limit," published 28 June 2016.
- [16] Yingcong Chen, Shangsheng Wen, Yuxiang Wu, Yuanyuan Ren, Weipeng Guan , Yunlin Zhou, "Long-range visible light communication system based on LED Available online 24 May 2016.
- [17] Sung-Man Kim and Seong-Min Kim, "Performance Improvement of Visible Light Communications using Optical Beamforming," ICUFN 2013.
- [18] Dobroslav Tsonev, Sinan Sinanovic, Harald Haas, "Practical MIMO Capacity for Indoor Optical Wireless Communication with White LEDs," 2013 IEEE

- [19] Rahmat Mulyawan, Hyunchae Chun, Ariel Gomez, Sujun Rajbhandari, Grahame Faulkner, Pavlos P. Manousiadis, Dimali A. Vithanage, Graham A. Turnbull, Ifor D. W. Samuel, Stephen Collins, Dominic O'Brien, "MIMO Visible Light Communications Using a Wide Field-of-View Fluorescent Concentrator," IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 29, NO. 3, FEBRUARY 1, 2017.
- [20] Alfredo Bomilcar e Georges Blum, "O LED e o mercado em expansão," disponível em <https://www.abilumi.org.br/o-led-e-o-mercado-em-expansao>.
- [21] Lubin Zeng, Dominic C. O'Brien, Hoa Le Minh, Grahame E. Faulkner, Kyungwoo Lee, Daekwang Jung, YunJe Oh, Eun Tae Won, "High Data Rate Multiple Input Multiple Output (MIMO) Optical Wireless Communications Using White LED Lighting," IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 27, NO. 9, DECEMBER 2009.
- [22] Xu Bao Guanding Yu Jisheng Dai Xiaorong Zhu, "Li-Fi: Light fidelity-a survey," Published online: 18 January 2015.
- [23] Al-Kinani, A, Wang, C-X, Zhou, L & Zhang, W 2018, 'Optical Wireless Communication Channel Measurements and Models', IEEE Communications Surveys and Tutorials.<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2838096>.
- [24] Dominic O'Brien, "Multi-Input Multi-Output (MIMO) indoor optical wireless communications," Department of Engineering Science University of Oxford Parks Road Oxford, OX1 3PJ United Kingdom.
- [25] Juan C. Miñano, Pablo Benítez, Rubén Mohedano, José L. Alvarez, Maikel Hernández, Juan C. González, Kazutoshi Hirohashi, Satoru Toguchi, "Ultracompact optics for optical wireless communications," Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering · December 1999.
- [26] Saeed Ur Rehman, Shakir Ullah, Peter Han Joo Chong, Sira Yongchareon Dan Komosny, "Visible Light Communication: A System Perspective—Overview and Challenges," Published: 7 March 2019.
- [27] Parth H. Pathak, Xiaotao Feng, Pengfei Hu, and Prasant Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 17, NO. 4, FOURTH QUARTER 2015.
- [28] Jeff Hecht, "Are LEDs Ready to Become the Market Standard?," March 2012.

- [29] Amna Riaz, Grahame Faulkner, Steve Collins, “A Fluorescent Antenna for White Light Visible Light Communications,” Department of Engineering Sciences University of Oxford Oxford, United Kingdom.
- [30] Hans Peter Grieneisen, “As Bases da Fotometria em Medições Goniofotométricas,” disponível em <http://www.inmetro.gov.br/ciebrasil/docs/As-bases-da-Fotometria-em-Medicoes-Goniofotometricas.pdf>
- [31] Plinio Godoy, “Capitulo 3: Fotometria básica,” Acta Phys. Sinica 64, 024201 (2015).
- [32] L. Xiang, L. Tian, W. Yun, and W. Long-Hui, “Design and study of Fresnel lens for an antenna in indoor visible light communication system,” Acta Phys. Sinica 64, 024201 (2015).
- [33] L. Xiang, L. Tian, W. Yun, and W. Long-Hui, “Design and study of Fresnel lens for an antenna in indoor visible light communication system,” Acta Phys. Sinica 64, 024201 (2015).
- [34] centro de ensino e pesquisa aplica. Aula 0006. Disponível em cepa.if.usp.br/energiaenergia2000turmaAgrupo6luminancia.htm
- [35] Coelho Junior, Helio, “Comunicação de Dados Utilizando Luz Visível”, Niteroi – RJ 2011.
- [36] Power Lume. Lúmen, Candela e Lux, Conceitos básicos. Disponível em <https://www.powerlume.com.br/lumen-candela-e-lux-conceitos-basicos/>.
- [37] Fonic Devices, Jia-Ming Liu, Chapter 14.
- [38] Ribeiro, R. M., Silva, V. N. H., Barbero, A. P. L., Alves, C. M., & Rodrigues, C. R. L. (2015). Fast wavelength conversion to generate 560nm fluorescence for data transmission in polymer optical fibers. Electronics Letters, 51(2), 168-170.
- [39] Merck. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sial/72609?context=product>.