



INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Ceará

CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

TRANSCEPTORES ÓPTICOS PARA COMUNICAÇÃO FSO/CWO
UTILIZANDO LED: O COMPORTAMENTO DO SINAL NO CANAL LOS E
PROPOSTA DE UMA NOVA TOPOLOGIA

CARLOS EUGÊNIO BENÍCIO DUARTE

Fortaleza, junho de 2018

CARLOS EUGÊNIO BENÍCIO DUARTE

**TRANCEPTORES ÓPTICOS PARA COMUNICAÇÃO FSO/CWO UTILIZANDO LED: O
COMPORTAMENTO DO SINAL NO CANAL LOS E PROPOSTA DE UMA NOVA
TOPOLOGIA**

Dissertação apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Fortaleza, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de Concentração:

Sistemas de Telecomunicação

Orientador:

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino

Fortaleza, junho de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B456t Benício Duarte, Carlos Eugênio.
TRANCEPTORES ÓPTICOS PARA COMUNICAÇÃO FSO/CWO UTILIZANDO LED : O
COMPORTAMENTO DO SINAL NO CANAL LOS E PROPOSTA DE UMA NOVA TOPOLOGIA /
Carlos Eugênio Benício Duarte. - 2018.
67 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Aperfeiçoamento de Professores para a Educação
Inclusiva, Campus Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino.

1. FSO. 2. Eavesdropper. 3. Comunicação Óptica. 4. OWC. I. Título.

CDD 371.9



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

Carlos Eugênio Benício Duarte

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino

Instituto Federal do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

Instituto Federal do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Régis Cristiano Pinheiro Marques

Instituto Federal do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcócer

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Dedicatória

"Ao meu filho, João - 'O Ousado'"

"A minha esposa, Renata Hevila - 'Sempre Presente'"

"Em memória de minha mãe Maria de Fátima e minha avó Isaura - Saudades"

Agradecimentos

A Deus em primeiro lugar e Nossa Senhora do Sagrado Coração que sempre ilumina meu caminho.

A todos os amigos e colegas que me incentivaram a continuar meu aprimoramento acadêmico. Em especial ao companheiro David M. Leite que ajudou no desenvolvimento dos primeiros softwares de teste.

Ao meu chefe, meu orientador, meu professor, meu amigo e muitas vezes irmão mais velho, Francisco José, sem sua orientação nesse mestrado e na vida, tenho plena consciência que não seria o profissional que sou hoje.

*Deus disse:
"Faça-se a Luz!"
E a Luz foi feita...
— (GN 1,3).*

Resumo

O estudo sobre luz como forma de trafegar informações passou por muitas inovações, envolvendo meios guiados e não guiados de comunicação. O termo FSO (*Free Space Optics*) e OWC (*Optical Wireless Communication*) são termos equivalentes para descrever as mesmas tecnologias ópticas não guiadas baseadas em Li-Fi (*Light Fidelity*). Essas tecnologias têm em comum a preocupação com existência de *Eavesdropper*, termo usado para identificar equipamento “espião” que não participa da rede e rouba informações. Outras preocupações comuns em redes OWC como taxa de transmissão, alcance e custo, estão diretamente relacionados com o tipo de transmissor utilizado seja ele LED ou laser. Nesta dissertação é apresentado um estudo sobre alcance de sinal de transmissores de LED em comunicação OWC, como foco na identificação dos pontos de *Eavesdropper*. É realizado, também, um mapeamento em um plano cartesiano da área de alcance do sinal transmitido por LED, e dentro desse plano verificamos os pontos de maior e menor intensidade de sinal recebido. Além disto, definimos a utilização de ferramentas de medição e simulação para avaliar o desempenho e a estrutura de um enlace ponto a ponto com ocorrência de *Eavesdropper*. Também foram realizadas diversas simulações de enlaces OWC com transmissor de LED com o objetivo de mensurar sua funcionalidade e viabilidade de operação. Como a topologia que estamos propondo é nova demos o nome fantasia de *Firefly B* e após realização dos testes comprovamos a viabilidade de operação do *Firefly B*. Além disso, comprovamos que o *Eavesdropper* não só pode ser usado para colaborar com o funcionamento da rede *Firefly B*, como utilizado da forma correta melhorar o aproveitamento do sinal do transmissor, aumentar o alcance da rede bem como o número de usuários que podem ser atendidos.

Palavras-chave: FSO, OWC, Comunicação Óptica, Segurança da Informação e *Eavesdropper*.

Abstract

The study of light as a way to travel information has undergone many innovations, involving guided and unguided means of communication. The term Free Space Optics (FSO) and OWC (Optical Wireless Communication) are equivalent terms to describe the same unguided optical technologies based on Li-Fi (Light Fidelity). These technologies have in common the concern with the existence of Eavesdropper, a term used to identify "spy" equipment that does not participate in the network and steals information. Other common concerns in OWC networks like transmission rate, range and cost are directly related to the type of transmitter used be it LED or laser. In this dissertation a study is presented on the signal coverage of LED transmitters in OWC communication, as a focus on the identification of Eavesdropper points. A Cartesian plane mapping of the range of the signal transmitted by LED is also carried out, and within this plane we will verify the points of greatest and least intensity of received signal. In addition, we define the use of measurement and simulation tools to evaluate the performance and structure of a point-to-point link with the occurrence of Eavesdropper. Several simulations of OWC links with LED transmitter were also carried out with the objective of measuring its functionality and feasibility of operation. As the topology that we are proposing is new demos the fancy name of Firefly B and after realization of the tests prove the feasibility of operation of Firefly B. In addition, we prove that the Eavesdropper not only can be used to collaborate with the operation of the Firefly B network, as used correctly to improve the use of the transmitter signal, increases the reach of the network as well as the number of users that can be served.

Keywords: FSO, OWC, Optical Communication, Information Security and Eavesdropper.

Lista de Figuras

2.1	Faixa de Frequência de operação da Luz Vissível	19
2.2	Determinando frequências máximas e mínimas da luz aptas a transferir elétrons para banda de condução	21
2.3	Coordenadas geométricas do <i>link</i> NLOS	23
3.1	Topologia de Transmissão Óptica Sem Fio em Sistemas Internos	31
3.2	Diagrama de Classe da estruturação da topologia Firefly B	32
3.3	Estrutura da Topologia Firefly B baseada em OWC com LED	33
3.4	Estrutura da Topologia Firefly B baseada em OWC com LED	33
3.5	Imagem de uma das placas de tecnologia Arduino - modelo Genuíno Uno	37
3.6	Estrutura de rede de comunicação FSO ponto a ponto com tx de Led .	38
3.7	Detalhamento da placa protoboard com circuito receptor	38
3.8	Diagrama de atividades para análise de experiências realizadas	39
4.1	Sistema de transmissão FSO com a presença de <i>Eavesdropper</i>	42
4.2	Caixa de Poliacetal vedada para conter o sinal luminoso	43
4.3	Teste de intensidade luminosa do LED de Tx em caixa de poliacetal . . .	43
4.4	Cicuito Elétrico com Fotodiodo receptor	44
4.5	Medições no fotodetector (Ex) realizado com auxílio de Osciloscópio durante transmissão de dados	48
4.6	Medições no fotodetector (Ex) realizado com auxílio de Osciloscópio durante transmissão de dados	48
4.7	Plotagem dos valores obtidos nas tabelas de medição de intensidade para distância de 5cm e 2cm entre pontos de Ex	49

Lista de Abreviaturas

LED	<i>Light Emitting Diode</i>
NLoS	<i>non line of sight</i>
LoS	<i>line of sight</i>
FO	Fibra Optica
OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>
FSO	<i>Optical Free Space</i>
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
FT	Transformada de Fourier (<i>Fourier Transform</i>)
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i>
IFT	<i>Inverse Fourier Transform</i>
MEMS	<i>Micro-electromechanical System</i>
NLSE	<i>Nonlinear Schrödinger Equation</i>
OCDMA	<i>Optical Code Division Multiple Access</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Units</i>
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RSOA	<i>Reflective Semiconductor Optical Amplifier</i>
Ex	<i>Eavesdropper</i>
Rx	Receptor
Tx	Transmissor
SIR	<i>Signal To Interference Ratio</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexer</i>
Li-Fi	<i>Light Fidelity</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

Lista de Símbolos

A_0	Amplitude
A_f	Amplitude do Pulso Propagante
A_b	Amplitude do pulso Contra-Propagante
c	Velocidade da luz no vácuo $= 3 \times 10^8 m/s$
η	Eficiência quântica
ω_0	Frequência Central do Pulso
Λ_L	Período do LOS
Λ_N	Período do NLOS
λ	Comprimento de Onda da luz
λ_{uv}	Comprimento de Onda da Fonte de Ultra-Violeta
q	Carga do elétron $= 1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb
β_1	Coeficiente de Dispersão de Primeira Ordem
β_2	Coeficiente de Dispersão de Segunda Ordem
n_2	Coeficiente Não-Linear do Índice de Refração
α	Coeficiente de Perda
h	Constante de Planck $= 6,626 \times 10^{-34} Js$
r_g	Coeficiente de Reflexão
t_g	Coeficiente de Transmissão
n_0	Índice de Refração Médio
δ	Dessintonia (ou Detuning)
γ_0	Parâmetro de Não-Linearidade
$P_{entrada}$	Potência de Entrada do Sinal Luminoso
$P_{up\uparrow}$	Potência de Chaveamento Up
$P_{down\downarrow}$	Potência de Chaveamento Down

T_0	Largura a Meia Altura do Pulso no Domínio Temporal
γ	Parâmetro não-linear
α	Perdas inseridas pelo sistema
t	Tempo

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Abreviaturas

Lista de Símbolos

1	Introdução Geral	12
1.1	Objetivos	13
1.2	Motivação	13
1.3	Organização do Trabalho	14
2	Fundamentação	15
2.1	Introdução	15
2.2	Comunicação Óptica	15
2.3	Função de Mie	16
2.4	Comunicação VLC Utilizando LEDs	18
2.5	Espectro de Frequências Detectável em Fotodetectores	19
2.6	Direção ideal de <i>Eavesdropper</i>	23
2.7	Análise e Avaliação de Desempenho	26
2.8	Conclusão do Capítulo	28
3	Proposta: Topologia Firefly B	29
3.1	Introdução	29
3.2	Direcionamento Eavesdropper	29
3.3	Nova topologia: Firefly B	30
3.4	Comparando Tecnologias OWC	34
3.5	Modelo Experimental Proposto	36
3.5.1	Transmissor / Receptor	37
3.5.2	Técnica de Medição e Modelagem	38
3.6	Conclusão do Capítulo	40

4	Resultados	41
4.1	Introdução	41
4.2	Descrevendo a Simulação	41
4.3	Teste de Intensidade do Sinal	44
4.4	Testes com Osciloscópio e Plotagem	47
4.5	Conclusão do Capítulo	47
5	Conclusões	50
5.1	Sugestões para Pesquisas Futuras	51
	Referências Bibliográficas	52
	Apêndice I	54
	Apêndice II	58
	Anexo A	60
	Anexo B	62

Capítulo 1

Introdução Geral

Toda troca de informação em uma rede de comunicação de dados necessita de um meio, este por sua vez influencia na escolha de sinal e protocolos que serão utilizados. As redes de comunicação óptica não são uma exceção, e o fato dessa comunicação óptica poder ocorrer em um meio guiado ou não guiado, possibilita diferentes tipos de abordagem de estudo. As tecnologias Ópticas de espaço livre também conhecidas como FSO (*Free Space Optics*) bem como a comunicação sem fio óptica também conhecida como OWC (*Optical Wireless Communication*), veem recuperando um grande interesse de pesquisadores na última década como uma alternativa atraente ou complementar para tecnologias existentes, como a radiofrequência (RF) (CORREIA et al., 2017). Tecnologias *wireless* estão sendo bastante utilizadas, chegando em alguns casos aos limites de sua capacidade afim de servir a necessidades de aplicações emergentes. Assim, a tecnologia FSO veem sendo amplamente implantada em vários ambientes internos, terrestres e até mesmo sistemas subaquáticos (AGRAWAL, 2005).

Nesta dissertação adotamos a linha de pesquisa sobre comunicação FSO/ OWC utilizando transmissor e receptor (transceptor) com LED (*Light Emitting Diode*) vinculado ao uso de *Eavesdropper*. Construímos um aparato experimental que possibilitou a realização de testes e simulações reais, tornando possível a criação da proposta de uma nova topologia baseada em OWC.

O *Eavesdropper*, também conhecido como espião ou bisbilhoteiro, consiste em um dispositivo externo à rede que se aproveita da fulga de sinal entre o *link* ponto a ponto do transmissor para o receptor afim de capturar a informação enviada. Devido essa característica o *Eavesdropper* não é bem visto no cenário de redes de comunicação até o momento. Como exemplo podemos citar o artigo *Security solution with signal propagation measurement for Gigabit Passive Optical Networks* (MALINA et al., 2016) que reserva um tópico para alertar contra os perigos do *Eavesdropper* e aponta soluções para se proteger contra o surgimento do mesmo. Por sua vez, o artigo *Physical-Layer*

Security in Orbital Angular Momentum Multiplexing Free-Space Optical Communications (SUN; DJORDJEVIC, 2016) tem como objetivo estabelecer uma comunicação segura na presença do *Eavesdropper* e indica formas de evitar o surgimento do mesmo. Diversos outros artigos identificam no *Eavesdropper* apenas uma desvantagem a ser combatida.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é mostrar que é possível em uma situação aparentemente problemática de segurança da informação, reverter a mesma a fim de beneficiar a comunicação FSO tanto na questão de alcance do sinal como no que diz respeito ao número de usuários. Entre os objetivos específicos desta dissertação podemos citar:

- descrever o comportamento do sinal LOS entre transmissor de LED e fotodiodo receptor em espaço livre (FSO);
- entender o conceito de *Eavesdropper* (Ex), como surge e como pode ou não ser aproveitado;
- propor uma nova topologia de OWC com viabilidade técnica, baixo custo e que faça uso do *Eavesdropper*.

1.2 Motivação

Essa dissertação tem como motivação analisar a questão do *Eavesdropper* de forma diferenciada, visto que ela possui características que não são exploradas pelas redes FOS/CWO como um todo. Bem como usar as propriedades do *Eavesdropper* para construir uma nova topologia de baixo custo. Relacionados a motivação desse projeto, apresentamos as seguintes questões que responderemos no decorrer deste trabalho:

- Existem formas de capturar o sinal que foi transmitido sem interromper a comunicação?
- Como as redes OWC tratam o *Eavesdropper*?
- É possível propor uma nova topologia de redes FSO/OWC baseada em comunicação por LED e fuga de sinal?

1.3 Organização do Trabalho

O restante desta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- **Capítulo 2 Fundamentação:** é um capítulo conceitual onde abordamos as principais tecnologias de forma geral porém essencial para entendimento da proposta dessa dissertação. Comunicação óptica, FSO, OWC, VLC, LED, Hipótese de Planck, Função de Mie, *Eavesdropper* e avaliação de desempenho, são exemplos de tecnologias e conceitos abordados no decorrer desse capítulo.
- **Capítulo 3 Proposta: Topologia Firefly B:** nesse capítulo descrevemos equipamentos e a tecnologia utilizada para estruturar uma nova topologia FSO com transceptores usando LED. Descrevemos técnicas de avaliação de desempenho, realizamos simulações, medições, testes de intensidade de sinal, testes de transmissão e modelagem através de diagrama de *status*, afim de consolidar a proposta da nova topologia.
- **Capítulo 4 Resultados:** apresentamos todos os resultados de testes práticos realizados referentes a: definição da área de propagação de espectro de luz do transmissor de LED, intensidade do sinal de luz dentro dessa área, plotagem dos resultados, desenho da estrutura de topologia proposta. Mostramos um tópico comparando as redes OWC já existentes com nossa topologia de baixo custo com LED.
- **Capítulo 5 Conclusão:** por fim, esse capítulo apresenta as conclusões dessa dissertação e sugestões de alguns trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação

2.1 Introdução

As tecnologias de comunicação óptica seja para meios guiados ou não guiados estão em constante evolução. Dentro desse cenário a tecnologia FSO tem sido estimulada pela habilidade de fornecer soluções complementares às tradicionais. A fibra óptica seja do tipo monomodo ou multimodo, apresenta características de funcionamento que dificultam ou inviabilizam a captura de dados em diversos cenários. Contudo ao se tratar de comunicação óptica em espaço livre a segurança da informação transmitida levanta questões que devem ser respondidas. Nesse capítulo, abordaremos as principais tecnologias aplicadas ao processo de transmissão de informação através da luz e entender como originar uma equação para calcular o melhor ângulo de visada entre Tx (transmissor), Rx (receptor) e Ex (*Eavesdropper*).

2.2 Comunicação Óptica

A comunicação óptica, é a utilização de sinal luminoso para transmissão de dados seja em meio guiado ou não guiado. Dito isso, a comunicação óptica através da tecnologia FSO pode se utilizar do espectro visível ou infravermelho da luz para comunicação. Essa região invisível do espectro que corresponde ao infravermelho, está situada depois da região do visível e abrange a radiação com comprimento de onda de 750 a 100.000 nm. Esta região é dividida basicamente em três faixas: a radiação no infravermelho próximo NIR (*Near Infrared*) que compreende de 750 a 2.500 nm; a radiação no infravermelho médio MIR (*Middle Infrared*) de 2.500 a 50.000 nm; e a radiação no infravermelho distante FIR (*Far Infrared*) que compreende de 50.000 nm a 100.000 nm. Os limites aproximados para cada região são apresentados na Tabela 2.1 (PASQUINI, 2003).

Tabela 2.1: *Frequência da Região de Espectro Infravermelho (invisível)*

Região	Intervalo de número de onda λ , cm^{-1}	Região em comprimento de onda ν , nm	Região de Frequência (ν) Hz
Próximo (NIR)	12800 a 4000	750 a 2500	$3,8 \times 10^{14}$ a $1,2 \times 10^{12}$
Médio (MIR)	4000 a 200	2500 a 5000	$1,2 \times 10^{14}$ a $6,0 \times 10^{12}$
Distante (FIR)	200 a 10	5000 a 100.000	$6,0 \times 10^{12}$ a $3,0 \times 10^{11}$

Adaptado do original (SANTOS, 2011).

Nesta dissertação trabalhamos com espectro infravermelho, focando na utilização do espectro de radiação no infravermelho próximo (NIR). É importante ressaltar que na prática não existe um limite específico definido onde termina uma região e começa outra, é comum encontrar divergências de valores na literatura para cada faixa, como a do NIR: 750 a 2.500 nm. Entretanto a IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) define a região NIR sendo de 780 a 2.500 nm (PASQUINI, 2003).

Com a possibilidade de se utilizar NIR para propagar sinal através de curtas e longas distâncias, chegando a atravessar a própria atmosfera se necessário, as comunicações FSO ganharam destaque. A tecnologia FSO pode ser uma solução para problemas de última milha em redes locais devido às características similares das redes de FO (fibra óptica): alta largura de banda, baixo custo, fácil manutenção e com a vantagem de uma implantação mais barata e rápida, podendo reduzir os custos em manutenção (SINGHAL; GUPTA; RANA, 2015).

2.3 Função de Mie

O sinal luminoso emitido pelos sistemas FSO interage com partículas em suspensão na atmosfera. A luz pode ser espalhada e/ou absorvida pelas partículas em níveis que dependem do comprimento de onda da luz, do tamanho e do índice de refração das partículas. O espalhamento e/ou atenuação, podem ter diferentes abordagens teóricas, segundo o tamanho das partículas:

- **Absorção de luz por moléculas**, afeta os comprimentos de onda pertencentes ao espectro de absorção das moléculas constituintes da atmosfera pode ser evitado pela escolha de comprimentos de onda que estão em janelas de baixa absorção.

- **Espalhamento Rayleigh**, consiste no espalhamento da onda quando interage com partículas muito menores do que o comprimento de onda em questão, como moléculas, no caso de comprimento de onda no infravermelho. Rayleigh equaciona o problema para partículas $0,05\mu\text{m}$, o grau de espalhamento é proporcional a λ^{-4} . Devido a dependência com esse valor de λ pelo espalhamento de Rayleigh nos comprimentos de onda usados em FSO é irrelevante (SINGHAL; GUPTA; RANA, 2015).
- **Espalhamento Mie** é solução genérica das equações de Maxwell para partículas esféricas, sendo útil para a faixa de tamanho entre $0,05$ e $100\mu\text{m}$. Para partículas acima de $100\mu\text{m}$, a abordagem mais conveniente é da óptica geométrica, utilizando-se as teorias da reflexão, refração e difração de luz (GASPARINI, 2015).

Segundo Mie, as partículas são objetos finitos que contém um número de centros de espalhamento que é proporcional ao seu tamanho. Quando essas partículas espalham a luz, os centros de espalhamento estão suficientemente distanciados para que possa ocorrer interferência entre os raios emitidos das diferentes regiões da partícula. Com isso, partículas de diferentes diâmetros possuem distribuição de intensidades ou perfis de espalhamento distintos, o que permite sua identificação (GASPARINI, 2015).

Quando pretendemos calcular a intensidade da luz espalhada por partículas diposas seja em ambiente fechado ou aberto, a utilização de espalhamento de Mie é lembrada entre os modelos mais utilizados. Caso os diâmetros sejam maiores do que o comprimento de onda da luz utilizada o uso do modelo de Mie é ainda melhor. "O modelo de Mie idealiza as partículas como esféricas, isotrópicas, não magnéticas e com uma superfície lisa, dispersas em um meio não absorvente" (GASPARINI, 2015).

Observa-se que de modo geral $\beta_a > \alpha_a$, logo podemos afirmar que partículas de suspensão (no geral partículas de água) mais espalham do que absorvem a luz e portanto o coeficiente de extinção é tipicamente dominado pelo coeficiente de espalhamento das partículas, isto é $\gamma_e \cong \beta_a$.

O espalhamento Mie permite calcular, dentre outras coisas, a distribuição angular da potência após o espalhamento e a seção eficaz de atenuação σ (*cross-section extinction coefficient*). A partir de σ_e pode-se calcular γ_e , o coeficiente de extinção através da seguinte expressão (2.1):

$$\gamma_e(\lambda) = \int_r \sigma_e(\lambda, r) n(r) dr \quad (2.1)$$

onde σ_e é dado em μm^2 e $n(r)$ é a concentração volumétrica do número de partículas de raio r por unidade de raio da partícula, dado em μm^{-4} . Portanto, a atenuação depende da distribuição do tamanho das partículas presentes.

2.4 Comunicação VLC Utilizando LEDs

Pesquisas em comunicação por luz visível (*Visible Light Communication* - VLC) utilizando LEDs para transmissões de luz e/ou informação, estão em contínuo crescimento. Esta tecnologia é útil principalmente devido à alta capacidade de transmissão e taxa de informação, segurança da informação sem riscos para a saúde, e baixa utilização de energia. Nos últimos 40 anos enquanto a capacidade de fluxo de dados em um LED vem aumentando aproximadamente $30\times$ por década, o custo de produção do mesmo cai a $10\times$ por década. Essa relação é conhecida com o a Lei de Haitz (KUMAR et al., 2008).

Atualmente, LEDs são a melhor escolha para iluminação e também para fins de comunicação usando luz visível. A comunicação usando lâmpadas LEDs é possível por que o nível de energia pode ser mudado a uma taxa rápida o suficiente para não ser notada por um olho humano. A informação é codificada ao irradiar luz em diferentes intensidades. Um fotodetector no receptor recebe e decodifica o sinal modulado cumprindo. Assim, os critérios de iluminação e comunicação são alcançados simultaneamente. Nos últimos anos, tem sido demonstrado que o VLC pode atingir altas taxas de informação (PRANAV; NEHA, 2017).

Nas últimas duas décadas, os confinamentos de rádio frequência (RF) foram relacionados ao exponencial incremento de tráfego em redes de dados móveis. Ondas de RF interferem em dispositivos eletrônicos e podem atravessar efetivamente as paredes levando à deterioração de sinais e essa atenuação na propagação limita as taxas de informação dos clientes. No entanto, a luz visível não interfere nos dispositivos eletrônicos. A tecnologia VLC pode nesses casos dar o suporte necessário, uma vez a luz visível não pode se infiltrar nas paredes, por isso tem uma segurança de conexão maior em ambiente fechados, além do fato de evitar problemas com possível interferência em aparelhos com sensibilidade eletromagnética nesse ambiente (PRANAV;

NEHA, 2017).

Comunicação com luz operando na faixa de luz visível, que incorpora centenas de Terahertz de largura de banda livre de licença, mostrada na Figura 2.1, pode correlacionar os sistemas de comunicação móvel baseados em RF na redes de dados móveis de alta capacidade. A luz visível não pode se infiltrar através de paredes e objetos. Isso permite gerar pequenas células de transmissores de LED sem problemas de interferência entre as células sobre as paredes e as parcelas. Assim, alimenta uma inerente segurança para comunicações de dados sem fio e também pode aumentar a capacidade do canal sem fio disponível.

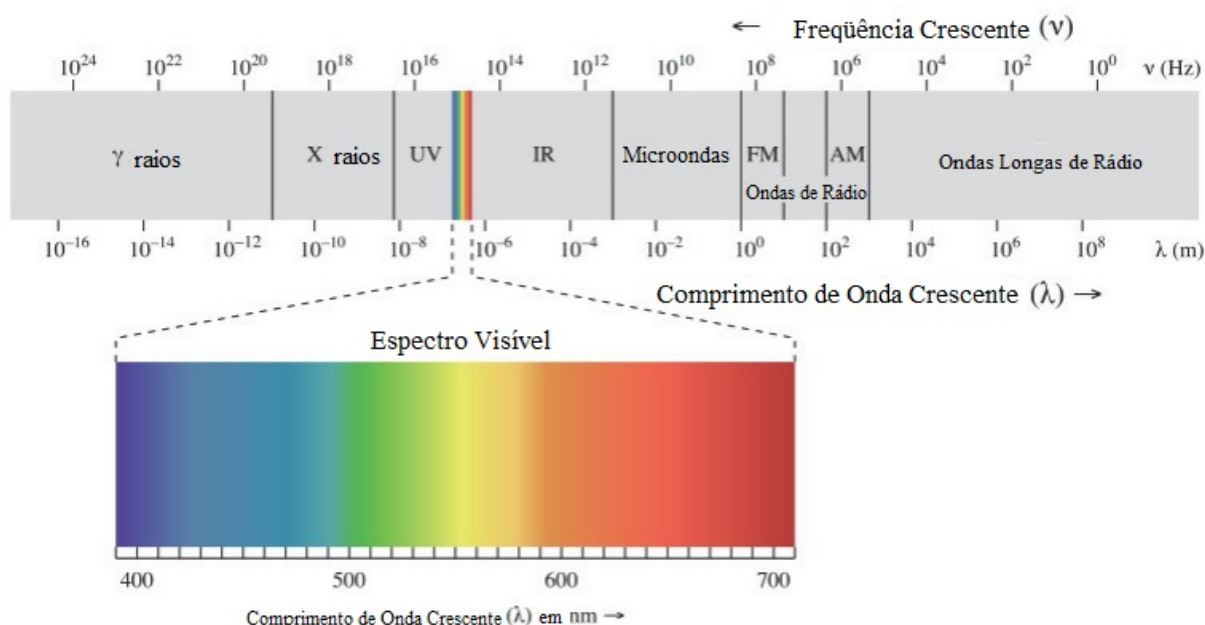


Figura 2.1: Faixa de Frequência de operação da Luz Vissível
Adaptado do original (PRANAV; NEHA, 2017)

2.5 Espectro de Frequências Detectável em Fotodetectores

Um diodo fotodetector é um dispositivo semicondutor otimizado para absolver fótons e converter em energia. Existe uma região no diodo onde ocorre o estabelecimento de uma corrente elétrica devido à incidência de fótons na região compreendida entre as junções PI e IN do diodo PIN. A banda de condução está compreendida entre um valor mínimo e um valor máximo de energia (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). O mesmo acontece com a banda de valência. O fóton, para ser absorvido, deve trans-

ferir toda a sua energia para o elétron. O valor desta energia é dado por

$$\Delta E = hf \quad (2.2)$$

Com este acréscimo exato de energia, o elétron se transfere de seu nível energético da banda de valência para um dos níveis energéticos da banda de condução. Vemos que a energia do fóton é proporcional à frequência da luz incidente. Vamos demonstrar a propriedade, que o fotodiodo possui, de detectar somente uma pequena faixa de frequências do espectro luminoso. Seja a banda de condução, de um certo semiconductor, limitada no extremo superior pela energia $(E_C)_{MAX}$ e no extremo inferior por $(E_C)_{MIN}$, observe a Figura 2.2. Seja a banda de valência, desse mesmo semiconductor limitada no extremo superior pela $(E_V)_{MAX}$ e no inferior por $(E_V)_{MIN}$. Neste caso a maior diferença de energia entre a banda de condução e a de valência é descrita por (SUN; DJORDJEVIC, 2016):

$$\Delta E_{MAX} = (E_C)_{MAX} - (E_V)_{MIN} \quad (2.3)$$

Um fóton que deslocar um elétron de $(E_V)_{MIN}$ para $(E_C)_{MAX}$ terá a energia dada por:

$$hf = h \times f_{MAX} = (E_C)_{MAX} - (E_V)_{MIN} \quad (2.4)$$

Da expressão mostrada na Figura 2.2 podemos determinar as frequências máximas e mínimas da luz que estão aptas a transferir elétrons para banda de condução onde teremos:

$$f_{MAX} = \frac{(E_C)_{MAX} - (E_V)_{MIN}}{h} \quad (2.5)$$

$$f_{MIN} = \frac{(E_C)_{MIN} - (E_V)_{MAX}}{h} \quad (2.6)$$

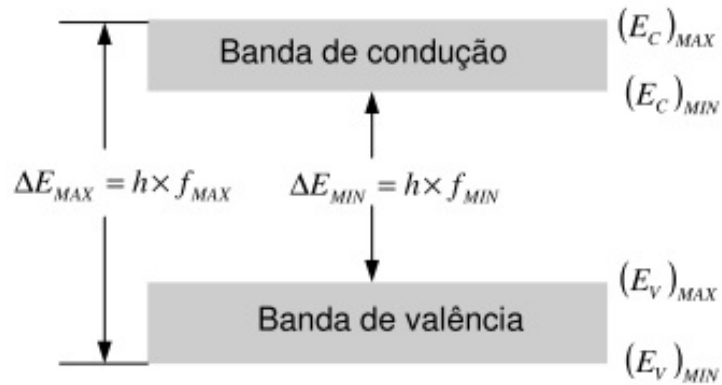


Figura 2.2: Determinando frequências máximas e mínimas da luz aptas a transferir elétrons para banda de condução (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

Como $\lambda = \frac{c}{f}$, podemos concluir (SUN; DJORDJEVIC, 2016): $\lambda_{MIN} = \frac{c}{f_{MAX}}$ e $\lambda_{MAX} = \frac{c}{f_{MIN}}$

Portanto,

$$\lambda_{MIN} = \frac{hc}{(E_C)_{MAX} - (E_V)_{MIN}} \quad (2.7)$$

$$\lambda_{MAX} = \frac{hc}{(E_C)_{MIN} - (E_V)_{MAX}} \quad (2.8)$$

Como $\lambda_{MIN} \leq \lambda \leq \lambda_{MAX}$

Resulta

$$\frac{hc}{(E_C)_{MAX} - (E_V)_{MIN}} \leq \lambda \leq \frac{hc}{(E_C)_{MIN} - (E_V)_{MAX}} \quad (2.9)$$

No caso do diodo PIN de silício tem-se aproximadamente (SUN; DJORDJEVIC, 2016):

$$0,1 \mu \leq \lambda \leq 1,1 \mu m \quad (2.10)$$

O comprimento de onda do pico da resposta:

$$\lambda = 0,80 \mu m \quad (2.11)$$

O fotodiodo de silício só funciona para a primeira janela de baixa atenuação da fibra óptica. Para a segunda janela, onde a atenuação é a menor de todas, temos duas soluções:

1- Diodo de germânio:

A detecção está na faixa $0,5 \mu \leq \lambda \leq 1,8 \mu m$, sendo que o comprimento de onda do pico da resposta é $\lambda = 1,35 \mu m$.

2- Diodo da liga termária InGaAs

A faixa de detecção é $1,0 \mu m \leq \lambda \leq 1,7 \mu m$. O comprimento de onda do pico da resposta é $\lambda = 1,3 \mu m$.

Relação entre a corrente produzida no diodo PIN e a potência de luz incidente nesse diodo é dada por

$$R_{PIN} = \frac{i_D}{P_D} \left[\frac{A}{W} \right] \quad (2.12)$$

esse parâmetro é chamado de responsividade do fotodetector. Podemos determinar quantitativamente o valor da responsividade por meio da expressão matemática (SUN; DJORDJEVIC, 2016):

$$R_{PIN} = \eta \frac{q\lambda}{hc} \quad (2.13)$$

em que η é eficiência quântica, q é a carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb), λ é comprimento de onda da luz recebida em metro, c é velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js).

A seguir temos o detalhamento da fórmula para cálculo de energia por fóton em um *link* de transmissão em espaço livre. Onde h consiste na constante de Planck, c se refere a velocidade da luz no vácuo e λ consiste no comprimento da onda.

$$E_p = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.14)$$

De acordo com a hipótese de Planck, todas as radiações eletromagnéticas são quantizadas e ocorrem em pacotes finitos de energia que chamamos fótons. O *quantum* de energia para um fóton não é a própria constante de Planck, mas o produto de h e a frequência. A quantificação implica que um fóton de luz azul de frequência ou comprimento de onda dada sempre terá o mesmo tamanho quântico de energia (EISBERG; RESNICK, 1986).

2.6 Direção ideal de *Eavesdropper*

Quando estabelecemos uma comunicação OWC entre um equipamento transmissor e um receptor chamamos o *link* de visada de direta de LOS (*line of sight*). O *Link* de sinal entre Tx e Ex é gerado por fuga de sinal do feixe LOS, chamamos esse *link* de entre Tx e Ex de NLOS (Não-LOS). A Figura 2.3 descreve o que acabamos de explicar.

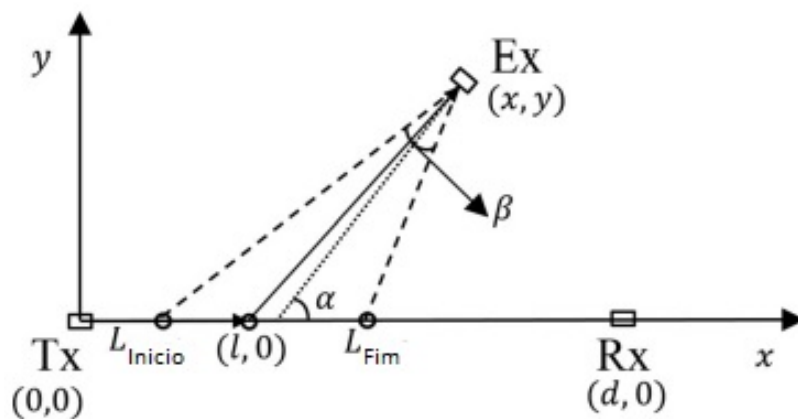


Figura 2.3: Coordenadas geométricas do link NLOS (SUN; DJORDJEVIC, 2016)

Seja P a potência de transmissão e $E_p = hc/\lambda$ seja a energia por fóton, onde λ denota o comprimento de onda do LED e G_L definir o ganho do *link* LOS e deixe η definir o valor da eficiência do receptor. O número de fotoelétrons detectados por segundo

em Rx, denotado como Λ_L é dado por

$$\Lambda_L = \frac{\eta G_L P}{E_P} \quad (2.15)$$

O *Eavesdropper* é um termo usado para um elemento que não pertence a uma rede, mas se beneficia da fuga de sinal LOS no enlace entre um Tx e Rx, roubando assim informações desse enlace sem ser detectado. Para Ex no canal de dispersão NLOS, G_N denota o ganho do canal NLOS. O número de fotoelétrons recebidos por segundo em Ex é dado por (SUN; DJORDJEVIC, 2016).

$$\Lambda_N = \frac{\eta G_N P}{E_P} \quad (2.16)$$

Um Ex busca receber sinais tão fortes quanto possível, ele precisa selecionar o melhor ângulo de orientação para maximizar o ganho link do NLOS. O mesmo pode ser obtido de G_N a seguir a seguir, que por sua vez se utiliza da teoria de Lorenz Mie Debye como podemos observar. A teoria de Mie como também é conhecida consiste em uma solução analítica completa das equações de Maxwell para a dispersão de radiação eletromagnética bem como dispersão de luz na atmosfera (SUN; DJORDJEVIC, 2016).

$$G_N = \int_{L_{inicial}}^{L_{final}} \Omega(I) p(\mu) e^{-k_s^{Mie} [I + \sqrt{(x-I)^2 + y^2}] dI} \quad (2.17)$$

A letra I indica o percurso de transmissão antes da primeira dispersão, e $\Omega(I)$, denota o ângulo concreto da área de recepção ao ponto de dispersão $(I, 0)$. É possível que o leitor encontre em outras fontes de pesquisa essa mesma equação de G_N onde no lugar do I perceba que a letra utilizada é i minúsculo, mantendo as mesmas características.

$$\Omega(I) = \frac{A}{[(x - I^2) + y^2]^{\frac{3}{2}}} \frac{(x - I) + y \tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} \quad (2.18)$$

Se a localização e o FOV do receptor espião é fixo, o ganho de ligação é determinado apenas pela direção que ele aponta em relação ao Tx. A função de fase Mie $P(\mu)$ diminui de forma estrita com respeito para o ângulo de dispersão θ_s para $\theta_s < \frac{\pi}{2}$. Assim, o espião tende a selecionar uma direção apontadora com pequeno ângulo de dispersão. No que se segue, mostraremos o ângulo de direção ideal α quando $\alpha < \frac{\pi}{2} \ominus \frac{\beta}{2}$. Para obter o ganho de ligação máxima G_N^* com NLOS na posição de *Eavesdropper* (x, y) e FOV temos que o ângulo cheio β pode ser alcançado selecionando o seguinte ângulo de direção ideal calculado por (SUN; DJORDJEVIC, 2016)

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} + \frac{\beta}{2} \quad (2.19)$$

Para o caso de $\alpha \geq \frac{\pi}{2} - \beta/2$, a derivação direta do ângulo de ponta ideal é difícil. Contudo, a função de fase de Mie $P(\mu)$ diminui drasticamente em relação à dispersão do ângulo para $\theta_s \leq \frac{\pi}{2}$ e apenas aumenta ligeiramente para $\theta_s \in [\frac{\pi}{2}, \pi]$, selecionamos $\alpha = \arctan \frac{y}{x} + \frac{\beta}{2}$ como o ângulo de direção ideal para toda a posição de espionagem (x, y) . De acordo com os cálculos feitos através da equação

$$G_N = \int_{\arctan \frac{y}{x}}^{\alpha + \frac{\beta}{2}} \frac{A \cos(\Theta' - \alpha)}{y^2} p(\mu) e^{-k_s^{Mie} [x + \frac{y(1 - \cos \Theta')}{\sin \Theta'}]} d\Theta' \quad (2.20)$$

pode-se ver a sua representação gráfica na Figura 2.3. Sendo G_N o ganho do *link* NLOS, (x, y) o *eavesdropper position*, $\alpha + \frac{\beta}{2}$ o ângulo de direcionamento ideal, $P(\mu)$ denota a função de fase de dispersão, ou seja ângulo de dispersão, finalmente, Mie é função de fase.

Na banda de ondas de comunicação infravermelha, consideramos a dispersão *Mie* como o fator dominante no cálculo da atenuação atmosférica. Seguindo o modelo de Kim, o coeficiente de dispersão de Mie dada a visibilidade da atmosfera e o comprimento de onda é dado por 2.21 (SUN; DJORDJEVIC, 2016):

$$K_S^{Mie} \approx \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda_{nm}}{500_{nm}} \right) \quad (2.21)$$

Seguiremos com a descrição dos procedimentos para simulação e medições de tal forma que possamos coletar dados reais. Uma vez de posse dos resultados vamos colocar em práticas as diversas fórmulas apresentadas uma vez que se façam neces-

sárias durante a análise dos dados.

2.7 Análise e Avaliação de Desempenho

Os profissionais que utilizam sistemas ou redes de comunicação de dados de algum tipo, têm um natural interesse em avaliação de desempenho, visto que esta tem como objetivo obter o melhor desempenho possível com o menor custo. Tal objetivo vem resultando em uma evolução contínua em redes de comunicação óptica, tornando o desempenho maior e com custo mais baixo, fazendo com que redes computadores pessoais, redes de telefonia fixa e celular, dentre outras redes, proliferem-se.

Com o amadurecimento do ramo de comunicação óptica, a indústria torna-se mais competitiva, novas redes e novas tecnologias fazem com que a relação entre custo, desempenho e segurança seja cada vez mais valorizada nas escolhas do tipo de tecnologia que se utiliza para comunicação da dados.

Diante desse cenário a avaliação de desempenho se faz necessária em todas as etapas do ciclo de vida de planejamento de rede ou mesmo em um sistema computacional. Um administrador e um designer, por exemplo, precisam avaliar entre várias alternativas de sistemas qual a que possui melhor design ou que possui melhores condições para um conjunto de aplicações. O sistema atual deve ser avaliado a fim de verificar quão bem ele está funcionando e quais melhorias têm de serem feitas.

O grande número de aplicações de computadores existentes impossibilita haver uma medida padrão de performance, bem como um ambiente padrão de medição ou uma técnica única. Entretanto, uma avaliação de desempenho necessita primeiramente que sejam selecionadas as medidas corretas, o ambiente a ser usado e a técnica adequada.

Como o desempenho é fundamental em todas as etapas desde a concepção da rede até o uso de um sistema, o objetivo principal de especialistas é extrair o melhor desempenho em um custo considerado. A seguir, são apresentados exemplos de problemas relacionados a avaliação de desempenho que os profissionais devem ser capazes de resolver (JAIN, 1991):

1. **Selecione as técnicas apropriadas de avaliação**, indicadores de desempenho e cargas de trabalho para um sistema. As técnicas utilizadas para avaliar

desempenho são simulação e modelagem. As métricas dizem respeito aos critérios usados para avaliar desempenho do sistema. Como por exemplo, resposta-demanda e tempo-resposta de um serviço podem ser usados como métrica na comparação de dois sistemas de *time sharing*. As solicitações que são feitas pelo usuário de um sistema recebem o nome de carga de trabalho.

2. **Realização de medições de desempenho corretamente.** A medição do desempenho de um sistema envolve pelo menos duas ferramentas: uma para carregar o sistema e outra para medir resultados. Essas recebem o nome de geradores de carga e monitores, respectivamente, e podem ser de vários tipos, os quais devem ser escolhidos de forma adequada.
3. **Use técnicas estatísticas adequadas para comparar várias alternativas.** Basicamente, o problema da avaliação de desempenho consiste em encontrar o melhor dentre várias alternativas. Com a repetição da medição em simulações, em geral se obtém resultados diferentes em cada uma das vezes. Quando a variedade dos resultados é alta, o simples cálculo da média não fornece conclusões corretas.
4. **O projeto de medição e de simulação de experimentos**, para fornecer o máximo de informações com o mínimo esforço é importante separar o efeito dos fatores individualmente. Isso envolve aspectos como técnicas de organização de experiências de forma a obter o máximo de informação com a quantidade mínima de experiências realizadas.
5. **Realizar simulações corretamente. Em um modelo de simulação**, é necessário escolher um roteiro para simulação, selecionar sistemas e algoritmos para a geração de números aleatórios, decidir a duração da simulação e fazer a análise dos resultados.

Basicamente, existem três técnicas de avaliação de desempenho: modelagem, simulação e medição. Cada técnica possui vantagens e desvantagens e devem ser escolhidas segundo alguns critérios que serão vistos a seguir, mas na prática o avaliador usa a técnica com a qual sente-se mais familiarizado. Para maior confiança nos dados avaliados é necessário utilizar duas ou mais técnicas para a verificação e avaliação dos resultados obtidos (JAIN, 1991).

- Modelagem: consiste em uma técnica de abstração de detalhes de baixo nível de uma rede ou sistema que ainda não foi construído. É um processo mais simples que outras técnicas de avaliação e permite identificar ou eliminar detalhes irrelevantes ao projeto.
- Simulação: é uma das técnicas de avaliação de desempenho mais usadas, por sua facilidade de aprendizado e de aplicação. Essas técnicas tanto podem prever o desempenho de um sistema que ainda não foi concebido como pode verificar o comportamento de sistemas já existentes em diferentes cenários de atuação.
- Medição: consiste em utilizar experimentação ou aferição, na captura de dados em uma rede que já existe. Dependendo do tipo de redes ópticas diversos parâmetros podem ser medidos, como tempo de resposta, perda de sinal, distância atingida entre Tx e Rx, segurança da informação entre outros.

2.8 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo abordamos o conceito de comunicação óptica, o que é eficiência quântica e como os diodos fotodetectores funcionam. Foram demonstrados conceitos e fórmulas matemáticas sobre: espectro de frequência, hipótese de Planck e função de Mie, que estão diretamente relacionados com a comunicação FSO. Foi explicado o funcionamento da técnica de *Eavesdropper* e conceituamos o que é para que se destina a análise e avaliação de desempenho em redes de comunicação de dados.

Capítulo 3

Proposta: Topologia Firefly B

3.1 Introdução

Neste capítulo descrevemos como identificar os pontos de *Eavesdropper*, como utilizar esses pontos como colaboradores da rede. A presentamos características e funcionamento da nova topologia, bem como diagrama de classe dessa topologia e diagrama de atividades dos testes de intensidade do sinal para diferentes pontos de *Eavesdropper*. Definimos as técnicas de medição e simulação para realização da avaliação de desempenho da topologia e descrevemos o aparato experimental utilizado durante a aplicação dessas técnicas. As simulações tem como objetivo entre outros recriar uma rede de transmissão ponto a ponto. Inserimos um receptor no ponto de *Eavesdropper*, para capturar o sinal do transmissor sem causar danos no fluxo de dados. Lembramos que a partir desse tópico passamos a chamar o *link* LOS de principal e o *link* NLOS de novo canal. Essa mudança de nomes ocorre para facilitar a compreensão do funcionamento da nova topologia. A priori quando nos referimos a topologia proposta nessa dissertação, adotamos o nome **Firefly B** para a mesma.

3.2 Direcionamento Eavesdropper

Observando que $\alpha + \frac{\beta}{2}$, referente ao ângulo de direcionamento, aumenta em relação a α , temos que G_N aumenta estritamente em relação a α quando $\arctan(y/x) + \frac{\beta}{2} \leq \alpha < \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}$. O ganho de ligação do novo canal G_N pode ser maximizado selecionando o α ideal.

em que,

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} + \frac{\beta}{2} \quad (3.1)$$

para,

$$\alpha < \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (3.2)$$

Para o caso de $\alpha \geq \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}$, a derivação direta do ângulo de direcionamento ideal é difícil. No entanto, observando que a função de fase Mie (μ) diminui drasticamente em relação ao ângulo de dispersão para $\theta_s > \frac{\pi}{2}$ e só aumenta ligeiramente para $\theta_s \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ selecionamos $\alpha = \arctan \frac{y}{x} + \frac{\beta}{2}$ como o ângulo de direcionamento ideal para toda a posição de espionagem (x, y) .

Definimos o valor de β sendo 15° e α pode assumir o valor de 60° observando

$$\alpha - \frac{\beta}{2} = t_g^{-1} \frac{y}{x} \rightarrow t_g \left(\alpha - \frac{\beta}{2} \right) = \frac{y}{x} \rightarrow t_g (60^\circ - 15^\circ) = \frac{y}{x} \rightarrow t_g 45^\circ = \frac{y}{x} = 1 \quad (3.3)$$

3.3 Nova topologia: Firefly B

Nosso foco nos experimentos reais foi mensurar a capacidade de transmissão de forma detalhada. Nossas intenções com esses experimentos foram:

- comprovar que é possível conseguir uma transmissão sem falhas entre Tx e Ex, usando LED como transmissor de baixo custo;
- definir a área e alcance onde é possível se utilizar Ex sem falhas;
- provar que é possível existir comunicação em uma rede P2P (*peer-to-peer*) com LED em ambientes fechados ou curta distância;
- transformar a forma como o sinal de *Eavesdropper* é visto de algo negativo em algo positivo.

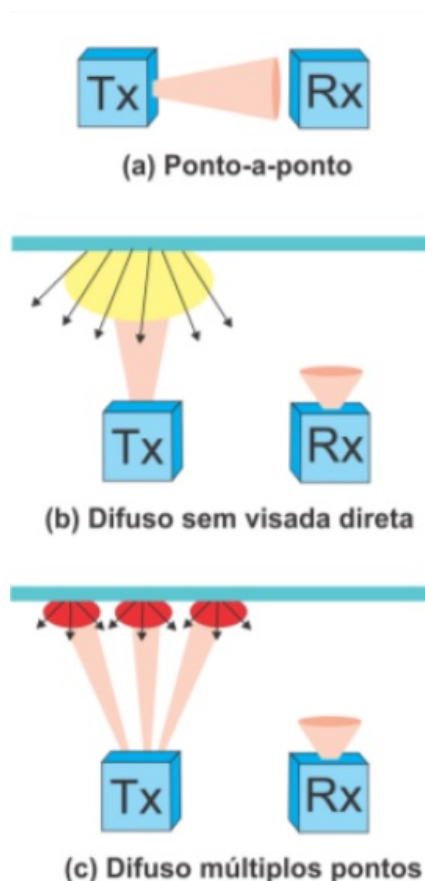


Figura 3.1: Topologia de Transmissão Óptica Sem Fio em Sistemas Internos (JUNIOR et al., 2015)

Uma vez que os objetivos listados anteriormente foram gradualmente atingidos no decorrer dos testes, o objetivo principal, a possibilidade de propor uma nova estrutura de rede baseada em Li-Fi (*Light Fidelity*), se provou viável. Essa estrutura de rede utiliza tecnologia OWC sendo baseada em Li-Fi, porém com características diferentes das redes já existentes. As redes OWC mais convencionais no mercado que se utilizam de comunicação LED são do tipo: ponto a ponto; comunicação de difusa sem visada direta e difusa com múltiplos pontos. Pode ver um exemplo dessas estruturas de comunicação na Figura 3.1, retirada do artigo "Comunicação por Luz Visível..." (JUNIOR et al., 2015).

Como foi visto no capítulo 2, o projeto de uma rede de comunicação necessita ser avaliado e acompanhado antes, durante e depois de sua implantação. O diagrama de classe que estrutura a topologia *Firefly B* pode ser visto na Figura 3.2. Esse diagrama de classe é uma representação estática da concepção da topologia *Firefly B*, composta por classes, subclasses que varia da composição da topologia a estrutura de subclasses que compõe a classe *Firefly B*.

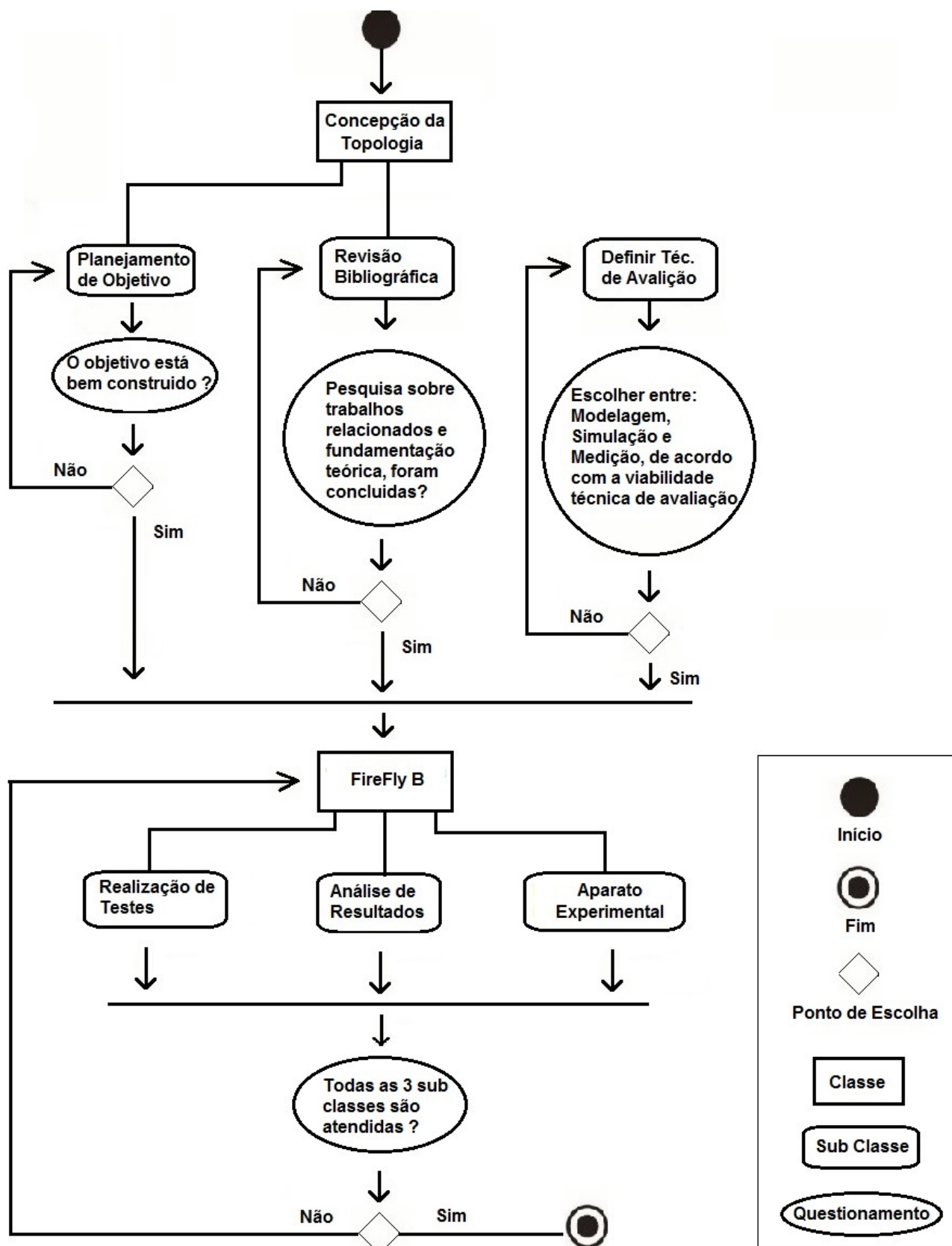


Figura 3.2: Diagrama de Classe da estruturação da topologia Firefly B

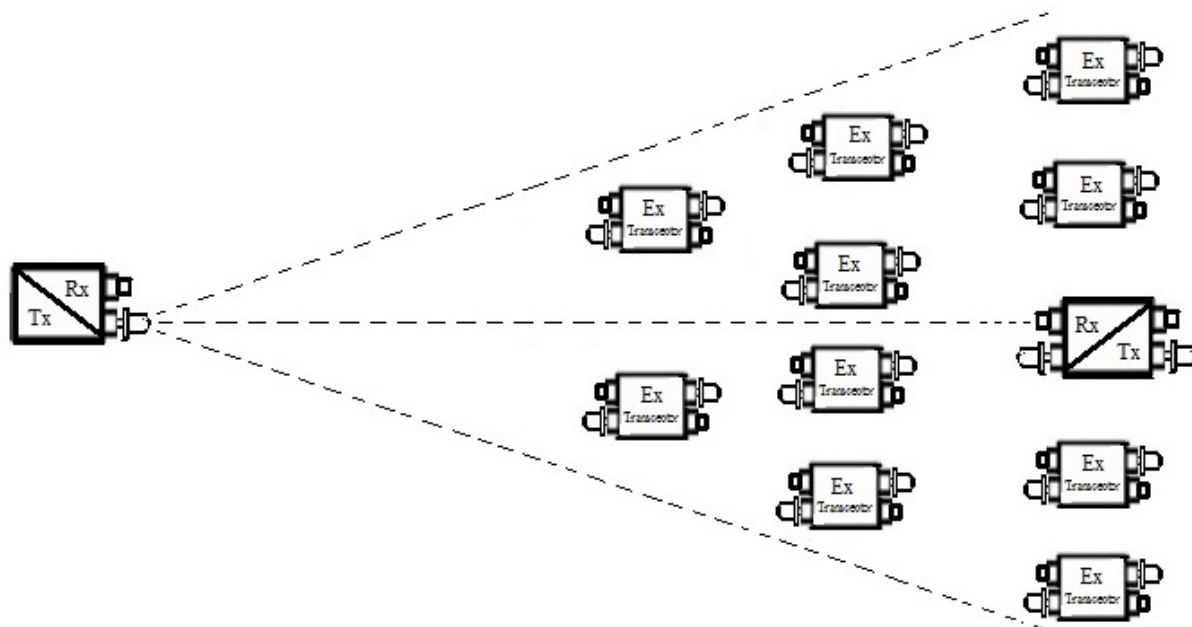


Figura 3.3: Estrutura da Topologia **Firefly B** baseada em OWC com LED

A Figura 3.3 e 3.4 representam a estrutura da rede **Firefly B** que se utiliza dos feixes de luz fora do canal principal de visada direta entre Tx e Rx qualquer. Como podemos ver através das figuras citadas anteriormente a proposta consiste em ao invés de inibir ou tentar impedir a fuga de sinal do feixe principal que possibilita o surgimento de *Eavesdropper*, vamos usar esses sinais ao nosso favor criando um modelo de rede P2P óptico passeada em FSO/OWC. Vale ressaltar que esse modelo de rede também é de baixo custo uma vez que os transmissores são LEDs.

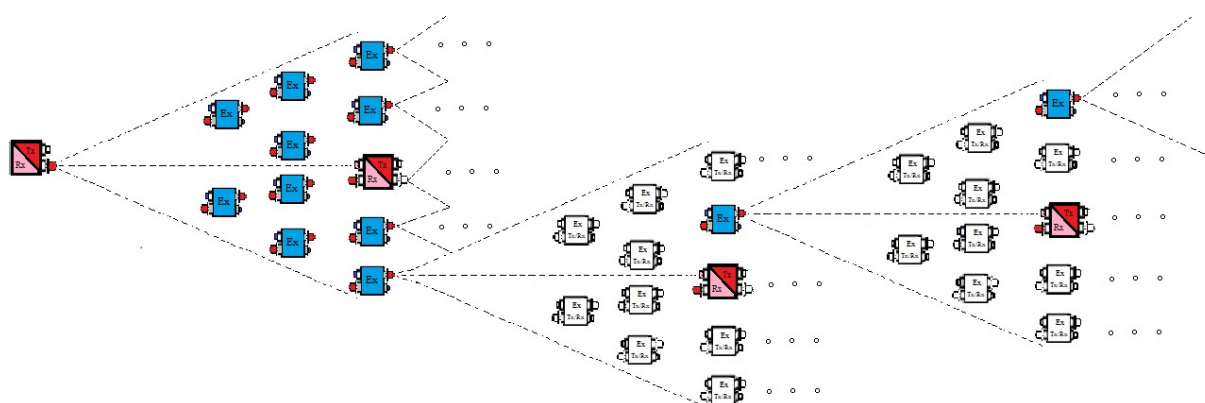


Figura 3.4: Estrutura da Topologia **Firefly B** baseada em OWC com LED

Sobre o funcionamento da topologia **Firefly B**, é similar a tecnologia P2P, porém sem fio e baseado em FSO. Dessa forma o leitor pode ver cada ponto de *Eavesdropper* é um possível ponto para um novo transceptor. Em um ambiente fechado como um carro ou um pequeno escritório, essa rede pode funcionar como alternativa para substituir a rede Wi-Fi existente. O fato da topologia **Firefly B** ser de baixo custo pode

ajudar na sua aplicação em ambientes pequenos além da possibilidade de se comunicar com outras tecnologias já existentes para trabalhar em conjunto. Como exemplo de tecnologias, podemos citar: sistemas de casa inteligente; rede de sensores; rede de câmeras de segurança; internet das coisas e a própria tecnologia Wi-Fi entre outras. Listamos as principais características da topologia **Firefly B** na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Detalhando das vantagens, desvantagens e características da topologia Firefly B

Topologia Firefly B		
Vantagens	Desvantagens	Caraterísticas (relevantes)
Não depende dos protocolos TCP e IP	Está em estágio experimental	Topologia do tipo ponto a ponto full duplex. Pode ser configurada como cliente servidor
Baixo consumo de energia	Depende da criptografia do sinal	Utilização dos pontos de Eavesdropper como pontos de expansão da rede
Baixo custo de implantação	Alcance entre dois pontos é curto	O alcance da rede pode variar entre curto e médio
Não depende que a luz fique acesa continuamente	A luz ambiente tem que ser levada em consideração quando implantado	Pouco suscetível a interferências
Facilidade de expansão de rede	Realizar estudo do plano cartesiano da área de implantação afim de identificar os pontos de Eavesdropper	O transmissor pode atender qualquer direção uma vez que exista possibilidade de link de comunicação
Eavesdropper não é um problema	Baixa taxa de transmissão	Trabalha com transmissor de LED

3.4 Comparando Tecnologias OWC

Na Tabela 3.2 comparamos duas tecnologias de comunicação óptica sem fio, uma de comunicação com sinal de luz em meio guiado e a tecnologia *Wi-Fi*. Detalhando essa tabela podemos observar que na segunda coluna temos a tecnologia de comunicação por luz visível da acesso a 320THz na faixa de 400 a 700nm. O VLC tipicamente uma tecnologia que trabalha em conjunto ondem temos a iluminação do ambiente modulando os dados nas luminárias LED para interconectar dispositivos.

Na terceira coluna temos as características gerais do Wi-Fi devido nossa intenção

Tabela 3.2: Tabela comparando tecnologia OWC, tecnologia Wi-Fi e topologia Firefly B

	Firefly B	VLC	Wi-Fi IEEE 802.11
Capacidade do usuário	Compartilhado; (em desenvolvimento)	Compartilhado; 9,5Gbit/s	Compartilhado; 802.11n (2,4GHz): <600Mbit/s; 802.11ac (5GHz): <6,93Gbit/s; 802.11ad (60GHz): <7Gbit/s
Alcance	Curto - Médio (alguns m); Faz uso de eavesdropper	Curto - Médio (alguns m); Necessita de LOS	Medio; Não necessita de LOS; <60GHz
Consumo de energia	Baixo (por feixe. < 4mW); Somente sob demanda	Alta (Watts); iluminação precisa estar ligada	Estação base; >100mW
Frequência de portadora / Largura de banda	700 - 2500 nm; Largura 1MHz; (Em desenvolvimento)	400 - 700 nm; Largura 320THz	2,4GHz banda; Largura 83,5MHz; Canais 20 ou 40MHz; 5GHz Banda; Largura 575MHz; Canais 20 ou 40 ou 80MHz; 60GHz banda; Largura 7GHz
Aspectos de segurança	(Em desenvolvimento)	A luz penetra o olho se direcionada; << 1mW;	Problemas de hipersensibilidade eletromagnética
Privacidade	Moderado; Precisa de criptografia	Moderado; Precisa de criptografia	Aberto; Precisa de criptografia
Infraestrutura	(Em desenvolvimento)	Compartilha Iluminação LED	Cabo elétrico (Cat5) infra;
Estandarização	—	Primeiros Passos realizados pelo grupo de estudo IEEE 802.11 LC	Extenso, maduro, continua evoluindo Backwards compatível;
Utilização	—	Primeiros produtos disponibilizados para comercialização	Amplamente utilizado; >50% do tráfego de internet é através de Wi-Fi

Adaptado do original (KOONEN, 2018), (CORREIA et al., 2017)

de criamos um comparativo entre tecnologias Li-Fi, FO e Wi-Fi.

Observando as três primeiras colunas da Figura ??, concluímos que todas possuem vantagens e desvantagens. Na primeira coluna temos uma tecnologia proposta **Firefly B** se utilizando de comunicação com LED que pode ser tanto ponto á ponto, como ponto multiponto. Destacamos algumas vantagens ao comparar nossa proposta de topologia com a tecnologia VLC:

- a quantidade de LEDs necessário para realizar uma comunicação ponto a ponto, é menor, por conseguinte economiza mais energia;
- só gasta energia quando existe transmissão;
- regiões de fuga de sinal **Eavesdropper**, deixam de ser um problema e passam

a ser uma vantagem para expansão da rede;

- a comunicação pode ser tanto ponto a ponto como ponto multiponto;
- com o uso correto de transceptores e explorando corretamente os pontos de *Eavesdropper* o alcance é superior ao oferecido do VLC.

Quando comparamos nossa proposta de topologia com a tecnologia BS-ILC, a principal vantagem é custo de implantação e manutenção. Como informado no capítulo de Fundamentação a utilização de tecnologia em LED tem tido um grande aumento e o custo do mesmo está caindo.

Ainda sobre a tecnologia de comunicação **Firefly B** vale ressaltar que a mesma ainda está em desenvolvimento o que nos leva a uma lista de pontos fracos e ao mesmo tempo de possibilidades que podem ser vista a seguir:

- protocolo de segurança de dados é indispensável para garantir sigilo na comunicação tal como em uma rede Wi-Fi;
- não depende do uso de protocolos TCP/IP, isso pode ser uma vantagem ou desvantagem dependendo do ponto de vista;
- capacidade máxima de transmissão em bits ainda não definida, atualmente está limitada por software em 320bits simultaneamente;
- não funciona a longas distâncias entre os pontos de cada enlace.

As redes sem fio locais do futuro podem ser baseadas em luz ao invés de RF. Em princípio, não existe a pretensão de substituir os padrões em RF existentes (como WI-FI, Bluetooth, WiMax, etc), mas que seja empregada em locais onde não for desejado o uso de RF (de hospitais a aviões, onde RF possa interferir em equipamentos de missão crítica). Outra possibilidade são nas redes de curtíssima distância, Personal Area Networks (PANs), na interligação de dispositivos multimídia próximos em altíssimas taxas.

3.5 Modelo Experimental Proposto

As redes sem fio locais do futuro podem ser baseadas em luz ao invés de RF. Em princípio, não existe a pretensão de substituir os padrões em RF existentes (como WI-FI, Bluetooth, WiMax, etc), mas que seja empregada em locais onde não for desejado

o uso de RF (de hospitais a aviões, onde RF possa interferir em equipamentos de missão crítica). Outra possibilidade são nas redes de curtíssima distância, Personal Area Networks (PANs), na interligação de dispositivos multimídia próximos em altíssimas taxas.

3.5.1 Transmissor / Receptor

Uma das tecnologias que trabalhamos é a FSO, ou seja a conexão é sem fio e se utiliza de um transmissor de LED e um fotodiodo para fazer a recepção ambos em pontos de Tx e Rx são fixos. Um segundo fotodiodo é utilizado em um receptor móvel que já definimos como Ex, Para montar os transceptores e fazer toda a lógica de programação de interface homem maquina optamos por usar a tecnologia Arduino. As placas utilizadas são do modelo Genuíno Uno, essa é uma placa de micro controlador baseada no *ATmega328P*. Entre suas características podemos ressaltar que dispõe de 14 pinos digitais (entrada / saída), 6 entradas analógicas, um cristal de quartzo 16 MHz, a conexão USB, e um botão de reset. A Figura 3.5 mostra o modelo das placas utilizadas.

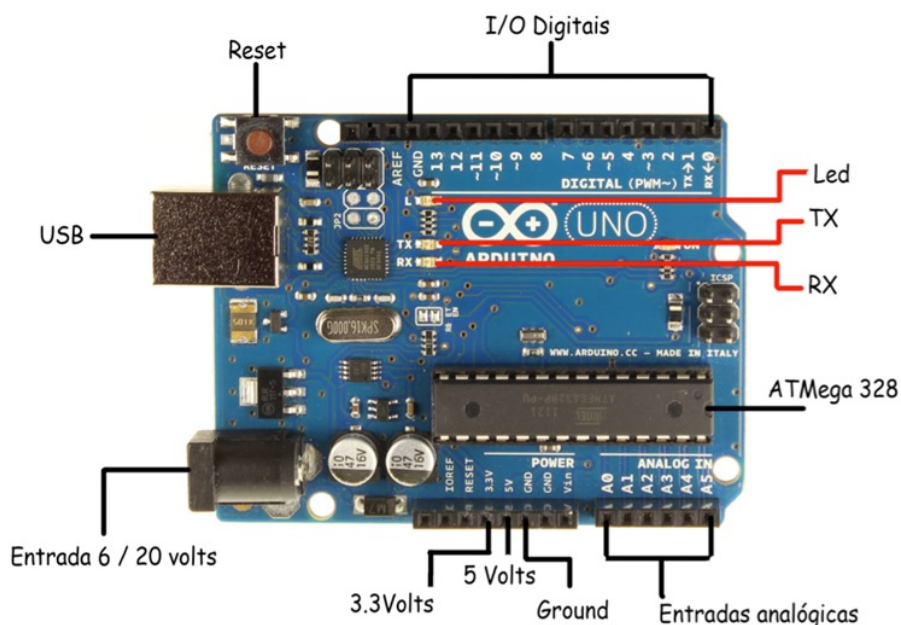


Figura 3.5: Imagem de uma das placas de tecnologia Arduino - modelo Genuíno Uno
Adaptado do original ([ARDUINOUNO](#),)

No total utilizamos três placas de Arduino, sendo uma como transmissor, uma como receptor e outra como receptor *Eavesdropper*, sendo esse o elemento externo à rede.

Os computadores foram utilizados para alimentação das placas de Arduino e gerenciamento de dados entre transmissor e receptor. A Figura 3.6 mostra a estrutura

da rede que foi montada.



Figura 3.6: *Estrutura de rede de comunicação FSO ponto a ponto com tx de Led*

A Figura 3.7 mostram detalhes dos componentes que estruturam a placa *protoboard* com o circuito receptor.

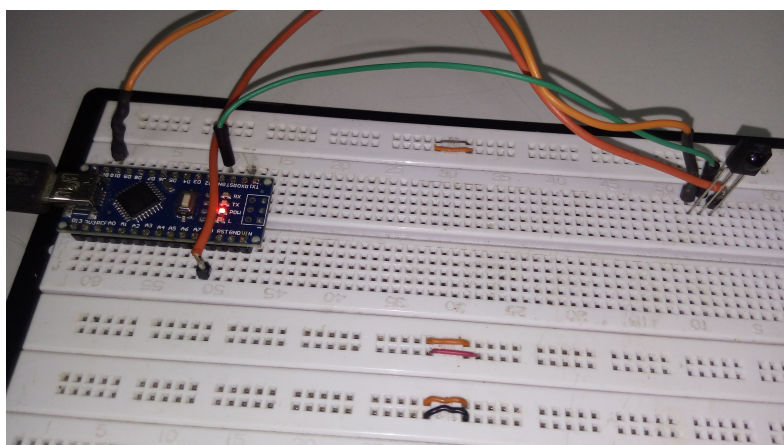


Figura 3.7: *Detalhamento da placa protoboard com circuito receptor*

3.5.2 Técnica de Medição e Modelagem

A Figura 3.8 mostra um diagrama de atividade que modela todo o processo de simulação. Um diagrama de atividades é um caso particular de um diagrama de estados, no qual todos ou a maioria dos estados são estados de atividades e todas ou a maioria das transições são desencadeadas pela conclusão das atividades dos estados anteriores; Uma atividade corresponde a uma execução não atômica dentro de uma máquina de estados, ou de outra forma, corresponde à execução de um conjunto de ações.

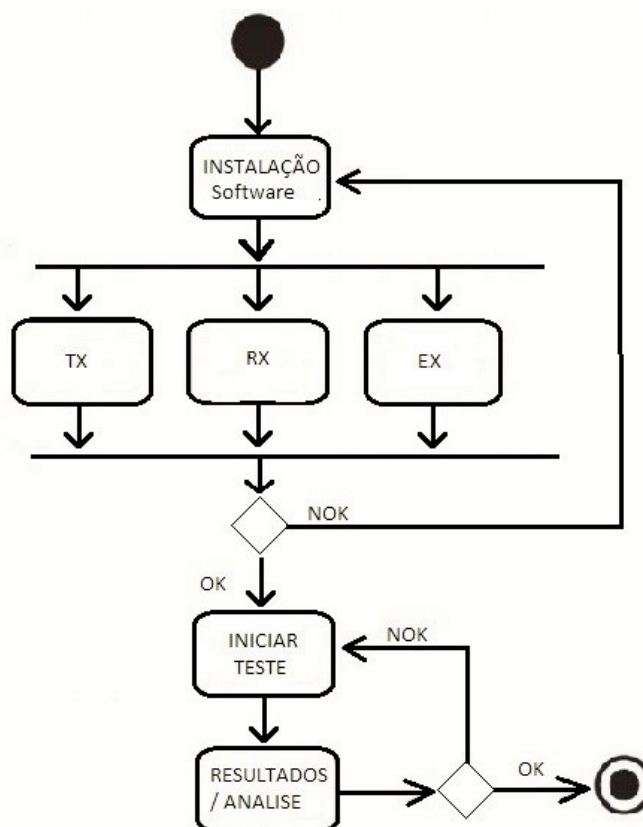


Figura 3.8: Diagrama de atividades para análise de experiências realizadas

Antes de iniciarmos qualquer experiência definimos o **objetivo**, **tecnologia(s)**, **técnica de medição** e **modelagem**, qualquer mudança em alguns desses pontos citados impacta diretamente nos resultados obtidos durante as experiências. Para melhor análise dos resultados bem como gerenciamento dos testes de captura de dados enviados, foi desenvolvido um software em Arduino. O software é responsável pela transmissão de texto entre o tx e o rx, foi feito dessa forma para facilitar a visualização de transmissão e recepção de caracteres corrompidos. No apêndice I mostramos parte do código de software do Tx.

O *software* utilizado passou por diversas etapas de adaptação até chegar aos dois programas que utilizados atualmente, sendo um instalado no equipamento responsável pela Tx e outro instalado no equipamento responsável pela Rx. Em versões anteriores chegamos a desenvolver um terceiro software que ficava instalado tanto no Rx quanto no Tx e era responsável pela calibração de transmissão e detecção de erros bit a bit. Como será explicado melhor no Capítulo 4 sobre estudo dos resultados esse terceiro software teve sua utilidade ao iniciarmos os testes, contudo no decorrer do processo se tornou dispensável. No apêndice II temos o código do *software* utilizado para testar o sincronismo entre transmissor e receptor, bem como intensidade do sinal.

Ainda sobre o software do transceptor óptico, ressaltamos que algumas linhas de comandos foram baseadas no mesmo modelo usado para desenvolver o sistema de transmissão e recepção de um controle remoto. Uma vez a rede estava fisicamente montada e era possível se transmitir texto de uma ponta a outra, foi definido que a experiência seria dividida em três momentos:

- são feitas transmissões entre Tx e Rx, tendo sua localização fixa na rede (sempre usando LED infravermelho);
- são feitas transmissões entre Tx e Rx mas com a presença de um elemento externo, esse por sua vez seria volátil no sentido de não ter uma posição fixa, mas se locomoveria para atingir o melhor ponto de recepção possível (sem interromper a comunicação Tx/Rx);
- tudo ocorreria como no segundo momento porem com a diferença de utilizamos um osciloscópio para monitorar o comportamento do Tx, Rx e elemento externo, em diferentes etapas da comunicação.

3.6 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo abordamos aplicação de técnicas de análise e avaliação de desempenho, apresentamos uma proposta de estrutura de rede FSO para simulação real, através de um aparato experimental. Detalhamos as tecnologias que são utilizadas na estruturação da nossa rede de comunicação, além de estudar um diagrama de atividade que descreve o passo a passo do processo de simulação.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo abordamos os resultados que foram obtidos de forma experimental. Baseado nesses resultados consolidamos: a proposta da topologia *Firefly B* e a redefinição do papel do *Eavesdropper* na rede. Para melhor compreensão dos testes realizados lembramos que foi definido que o enlace inicial entre Tx e Rx ponto a ponto, correspondem ao enlace entre os pontos A e B, onde tanto o ponto A como o ponto B, são definidos dentro de um plano cartesiano por valores de X e Y. Dito isso podemos iniciar o estudo dos resultados obtidos nos testes.

4.2 Descrevendo a Simulação

Para entendermos as experiências realizadas vamos considerar uma comunicação FSO ponto-a-ponto em curta distância em uma distância máxima de 2m. O transmissor (Tx) enviar informações de texto, para o receptor (Rx) através do canal principal de comunicação. Inserimos nesse cenário um intruso também capaz de receber ou enviar informações. Esse nosso dispositivo está agindo como *Eavesdropper* pois não pertencente a rede e está se aproveitando da fuga de sinal do transmissor para receber informações. O termo *Eavesdropper* se refere a um conceito de uma técnica de *hacking* que se baseia na violação da confidencialidade, podendo ser interpretado como "escutar atrás da porta"na maior parte dos casos. Com a presença do equipamento agindo como Ex surgiu um novo canal de comunicação independente do canal principal. Assim o outro *link* originado a partir da inserção de um *Eavesdropper* na rede ponto a ponto passa a ser conhecido como novo canal. Como é possível a existência de diversos pontos de *Eavesdropper* entre Tx e Rx, podemos concluir que também se torna possível a existência de diversos novos *links* do novo canal. Na Figura 4.1 vemos

a situação que acabamos de descrever. Importante observa que um único transmissor passou a atender duas máquinas diferentes nesse cenário proposto. Também é possível observa que a existência de *Eavesdropper* não interrompe a comunicação do canal principal.

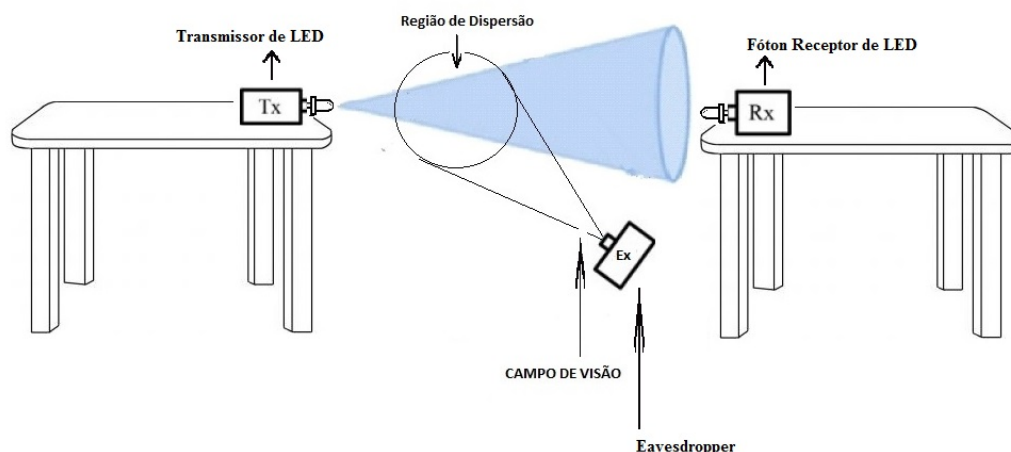


Figura 4.1: Sistema de transmissão FSO com a presença de *Eavesdropper*.
Adaptado do original (SUN; DJORDJEVIC, 2016)

No sistema proposto, a posição de Rx é fixa e a posição de Ex pode variar, mas está fora do feixe convergente do LED no canal principal. O receptor Ex como sendo um elemento externo tem como objetivo receber sinais tão fortes quanto possível, nós assumimos que ele tenta otimizar a direção de foco para maximizar o ganho de ligação do novo canal quanto a sua posição e o ângulo completo do *field-of-view* (FOV - campo de visão).

Devido à atenuação do ar, somada a dispersão luminosa e a baixa potência do transmissor de LED, a intensidade do sinal recebido torna-se fraca. A forma de onda contínua não pode ser obtida por um receptor óptico normal, em vez disso, um LED fotorreceptor é adotado para registrar o número de fotoelétrons recebidos. Um fotorreceptor consiste em um mecanismo capaz de convergir a energia óptica que incide em uma superfície sensora em energia elétrica.

Ainda sobre a intensidade do sinal a Figura 4.2 mostra a caixa de poliacetal, utilizada para conter e mensurar potência emitida pelo LED usado como transmissor. A Figura 4.3 mostra o LED sendo introduzido dentro da caixa para iniciar os testes realizados com o auxílio de um medidor de potência óptica (*power meter* PM100D - THORLABS). As medições feitas concordam com os parâmetros do *datasheet* do LED transmissor (verificar informações no Anexo I). O valor obtido para a potência máxima foi de aproximadamente 2,32 mW.

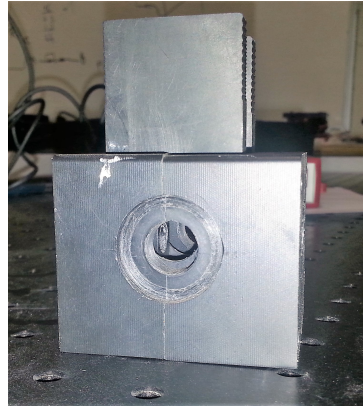


Figura 4.2: Caixa de Poliacetal vedada para conter o sinal luminoso

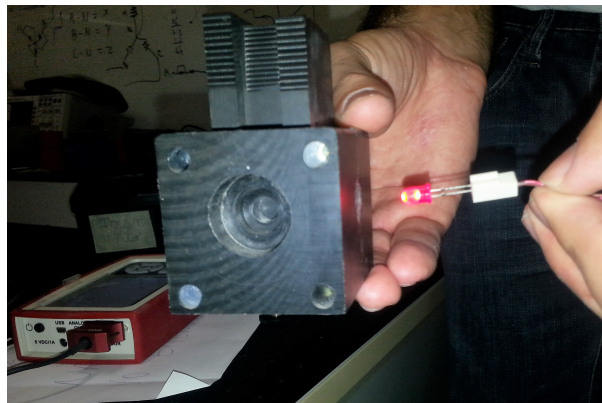


Figura 4.3: Teste de intensidade luminosa do LED de Tx em caixa de poliacetal

O circuito equivalente elétrico do detector de luz indicado na Figura 4.1 está esquematizado na Figura 4.4. O elemento C_D é a capacitância que está presente no diodo, quando polarizado inversamente. Nos experimentos que trabalharemos assumimos o valor do capacitor como sendo de 100 nF no circuito do transceptor com LED, vinculado ao arduino UNO. O capacitor assume a função de filtro de sinal, afim de minimizar e/ou isolar possíveis interferências causadas pela presença de luz ambiente. No domínio da transformada de Laplace, a impedância do capacitor é $\frac{1}{C_D s}$, calculando a V_0 , temos

$$\frac{V_0 s}{V_i s} = \frac{-R_L}{R_L - R_1} \cdot \frac{1}{C_s + 1} \quad (4.1)$$

onde, $V_0 s$ é a tensão de saída, $V_i s$ é a tensão de entrada, R_1 é o resistor, R_L é o resistor regulável usado como divisor de tensão e C_s é o capacitor que funciona como

filtro de sinal.

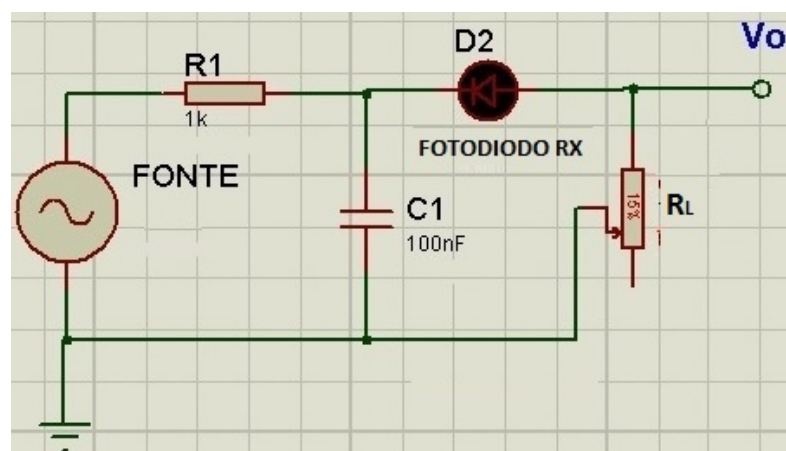


Figura 4.4: *Cicuito Elétrico com Fotodiodo receptor*

O intuito ao realizarmos uma análise do circuito elétrico que atende ao fotodiodo, é o de determinar os valores de tensão de saída no mesmo, possibilitando um comparativo dos valores de tensão e corrente elétrica com os valores de potência no sinal de luz recebido. Processo importante para compreender a conversão eletro-óptica durante o tráfego de informação. Iniciamos a seguir uma análise do canal principal e possíveis pontos de *Eavesdropper* para criação de novos *links*.

4.3 Teste de Intensidade do Sinal

Delimitar a área de propagação do feixe de luz do transmissor de LED não se resume em saber o alcance do sinal, mas saber o alcance do sinal com informação íntegra. Sabendo que a perda de potência naturalmente vai interferir na integridade do sinal além de possíveis agentes externos que causam a perda de visada ou retorno do sinal, um plano de medição se faz necessário. Nesse caso delimitamos um plano cartesiano com comprimento variando de 50cm á 2m. Posicionando o Tx e RX em pontos fixos foram feitas medições em diferentes pontos EX localizados dentro do plano cartesiano entre Tx e Rx durante a transmissão de sinal. Cada um desses pontos foi definido por **x** e **y**, assim identificamos a localização do Ex específico em relação ao Tx. Também se torna possível com esse teste definir se determinado ponto de Ex é capaz ou não de receber o sinal do Tx com integridade. Foi utilizado um plano cartesiano de 50cm de largura por 70cm de altura para restringir a área de estudo dos resultados práticos obtidos pelo nosso aparato experimental. Foi evidenciado durante os testes que a intensidade do sinal luminoso de Tx reduzia ao se dispersar com o aumento da distância. Contudo foi identificado toda uma área entre Tx e Rx que está

fora do eixo de visada direta que é capaz de criar um link de comunicação com o transmissor.

A Tabela 4.1 contém os valores obtidos nos testes realizados com distância de 5cm entre pontos de Ex. Definimos o valor de potência luminosa máxima de 1000 (mil) e 0 (zero) representa a ausência total de luz. Assumindo **X** como sendo a coluna dos valores verticais e **Y** os valores horizontais, referente a posição de Tx. Podemos ver de vermelho na tabela a posição do eixo de visada direta entre Tx e Rx, representada na coluna 25 do eixo y. Esses valores não podem ser assumidos por Ex uma vez que nesse caso bloqueia a comunicação e impedindo a visada direta entre Tx e Rx que são fixos. É fácil observar na tabela o espalhamento do espectro luminoso formando um desenho em **V** no plano cartesiano, a medida que o sinal do transmissor se propaga até o receptor.

Tabela 4.1: Tabela de Intensidade de sinal disperso a cada 5cm

(x,y)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	0	0	0	0	0	765	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	6	497	6	0	0	0	0
10	0	0	0	0	35	245	35	0	0	0	0
15	0	0	0	0	30	134	30	0	0	0	0
20	0	0	0	1	26	80	26	1	0	0	0
25	0	0	1	6	13	55	13	6	1	0	0
30	0	1	1	6	13	39	13	6	1	1	0
35	0	1	1	6	9	28	9	6	1	1	0
40	0	1	5	6	8	25	8	6	5	1	0
45	0	1	5	6	8	18	8	6	5	1	0
50	0	1	5	6	8	18	8	6	5	1	0
55	0	1	5	6	7	16	7	6	5	1	0
60	0	1	4	6	7	12	7	6	4	1	0
65	0	1	2	6	6	8	6	6	2	1	0

Após realizamos esse teste repetidas vezes com sucesso de transmissão, constatamos que as informações captadas com intensidade de sinal nos pontos de Ex, quando: ≥ 6 não vai apresenta falha; ≥ 5 pode ou não apresentar falha; ≤ 4 vai apresenta falha. Afim de confirmar esses resultados refizemos os teste porem com distân-

cia entre pontos de amostragem de $2cm$ com pode ser visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tabela de Intensidade de sinal disperso a cada $2cm$, entre os pontos de amostragem

(x,y)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	765	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	745	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	6	8	30	630	30	8	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	7	40	316	500	316	40	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	16	30	41	244	340	244	41	30	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	7	22	35	81	140	245	140	81	35	22	7	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	1	7	21	37	70	129	190	129	70	37	21	7	1	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1	6	6	21	37	63	101	150	101	63	37	21	6	6	1	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	1	6	6	20	35	41	80	134	80	41	35	20	6	6	1	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	1	2	6	6	16	35	37	65	110	65	37	35	16	6	6	2	1	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	2	5	6	6	16	26	36	60	80	60	36	26	16	6	6	5	1	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	1	6	6	6	6	15	24	33	60	69	60	33	24	15	6	6	6	6	1	0	0	0	0
24	0	0	0	0	5	5	6	6	6	12	18	22	60	62	60	22	18	12	6	6	6	5	5	0	0	0	0
26	0	0	0	0	5	5	6	6	6	12	15	22	50	56	50	22	15	12	6	6	6	5	5	0	0	0	0
28	0	0	0	1	5	5	6	6	6	9	13	22	45	50	45	22	13	9	6	6	6	5	5	1	0	0	0
30	0	0	0	1	4	5	6	6	6	9	13	20	38	39	38	20	13	9	6	6	6	5	4	1	0	0	0
32	0	0	0	1	3	5	5	6	6	9	10	16	38	39	38	16	10	9	6	6	5	5	3	1	0	0	0
34	0	0	0	1	3	5	5	6	6	9	9	10	36	38	36	10	9	9	6	6	5	5	3	1	0	0	0
36	0	0	0	1	3	5	5	6	6	9	9	10	33	35	33	10	9	9	6	6	5	5	3	1	0	0	0
38	0	0	0	1	3	5	5	6	6	9	9	10	28	30	28	9	9	6	6	6	5	5	3	1	0	0	0
40	0	0	0	1	2	5	5	6	6	8	8	9	23	25	23	9	8	7	6	6	5	5	2	1	0	0	0
42	0	0	0	1	2	5	5	6	6	7	8	9	23	24	23	9	8	7	6	6	5	5	2	1	0	0	0
44	0	0	0	1	1	5	5	6	6	7	8	9	22	24	22	9	8	7	6	6	5	5	1	1	0	0	0
46	0	0	0	1	1	5	5	6	6	7	8	10	20	23	20	9	8	7	6	6	5	5	1	1	0	0	0
48	0	0	0	1	1	5	5	6	6	7	8	9	20	21	20	9	8	7	6	6	5	5	1	1	0	0	0
50	0	0	0	1	1	4	5	6	6	7	8	9	18	18	18	9	8	7	6	6	5	4	1	1	0	0	0
52	0	0	0	1	1	3	5	6	6	7	8	9	18	18	18	8	8	7	6	6	5	3	1	1	0	0	0
54	0	0	0	1	1	3	5	6	6	7	7	12	16	17	16	12	7	7	6	6	5	3	1	1	0	0	0
56	0	0	0	1	1	3	4	6	6	6	7	12	15	16	15	12	7	6	6	6	4	3	1	1	0	0	0
58	0	0	0	1	1	3	4	6	6	6	7	11	15	15	15	11	7	6	6	6	4	3	1	1	0	0	0
60	0	0	0	1	1	2	4	6	6	6	7	9	9	12	9	9	7	6	6	6	4	2	1	1	0	0	0
62	0	0	0	1	1	2	4	6	6	6	6	8	8	11	8	8	6	6	6	6	4	2	1	1	0	0	0
64	0	0	0	1	1	2	4	6	6	6	6	8	8	10	8	8	6	6	6	6	4	2	1	1	0	0	0
66	0	0	0	1	1	2	4	6	6	6	6	8	8	9	8	8	6	6	6	6	4	2	1	1	0	0	0
68	0	0	0	1	1	2	4	6	6	6	6	8	8	8	8	8	6	6	6	6	4	2	1	1	0	0	0

A Tabela 4.3 representa a de relação BER (bit error rate) ou taxa de erro de bit, onde se avalia a quantidade de bits com erro dentro de determinado fluxo de informações transmitidas, e no caso desses experimentos a taxa de informação variou de 50 bits á 100 bits, para cada um dos pontos de Ex.

A Tabela 4.2 e a Tabela 4.3, estão relacionadas de forma a completar as informações uma da outra. Sem as informações da Tabela 4.2 seria difícil definir os pontos de maior ou menor intensidade de sinal. Foi possível realizar uma experiência prática para mensurar a taxa de erro em pontos específicos dentro do plano cartesiano. É baseado nessa informação que a identificação dos pontos de *Eavesdropper* e concepção da ideia para topologia *Firefly B* se tornou viável.

Tabela 4.3: Tabela de relação entre taxa de bit erro e intensidade do sinal transmitido

Taxa de Erro de Bit (BER)			
Intensidade Sinal - Valor Mensurado <i>In loco</i> *	Nº de Caracteres perdidos **	Taxa de erro em bits ***	Taxa de erro em % Máxima*
Valor de Intensidade do Sinal - ≥ 6	0	0	0
Valor de Intensidade do Sinal $4 \leq 5$	0 a 2	0 a 10	20%
Valor de Intensidade do Sinal $3 \leq 4$	2 a 4	10 a 20	40%
Valor de Intensidade do Sinal $2 \leq 3$	4 a 6	20 a 30	60%
Valor de Intensidade do Sinal $1 \leq 2$	6 a 8	30 a 40	80%
Valor de Intensidade do Sinal $0 \leq 1$	8 a 10	40 a 50	100%

* Todo valor a parti da intensidade 6 (ou maior), não apresentou falha ou perda de informação transmitida durante dos testes realizados

** Cada caractere equivale a 32 bits

*** Para cara 320 bits transmitidos

4.4 Testes com Osciloscópio e Plotagem

Durante a transmissão utilizamos um osciloscópio a fim de mensurar os valores no fotodiodo do Receptor. Nas Figuras 4.5 e 4.6 a seguir podemos observar os valores obtidos durante esse teste realizado no momento em que recebemos os dados em diferentes pontos de EX.

A Figura 4.7 mostra dois gráficos plotados no software Scilab com os valores das medições ópticas nas Tabelas 4.1 e 4.2 com distância de 5cm e 2cm respectivamente, entre os pontos de intensidade de sinal captados dentro na área do feixe do LED transmissor.

4.5 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo realizamos medidas experimentais empregando condições reais, fotorreceptores e transmissores com LED. O transmissor não operou em modo contínuo mas intermitente de acordo com o fluxo de tráfego, e tanto o transmissor (ponto A) como o receptor (ponto B) do enlace da rede ficaram fixos durante os testes. Referente ao elemento externo a rede que realiza o *Eavesdropper*, esse executava frequentes mudanças de posição (x e y) dentro de um plano cartesiano pré-determinado. Com intenção de identificar os melhores pontos para ângulo de alinhamento possível entre Tx e Ex. A medida que mapeamos a área de atuação do LED com igual sucesso na captura do sinal transmitido, podemos definir onde posicionar os transceptores para

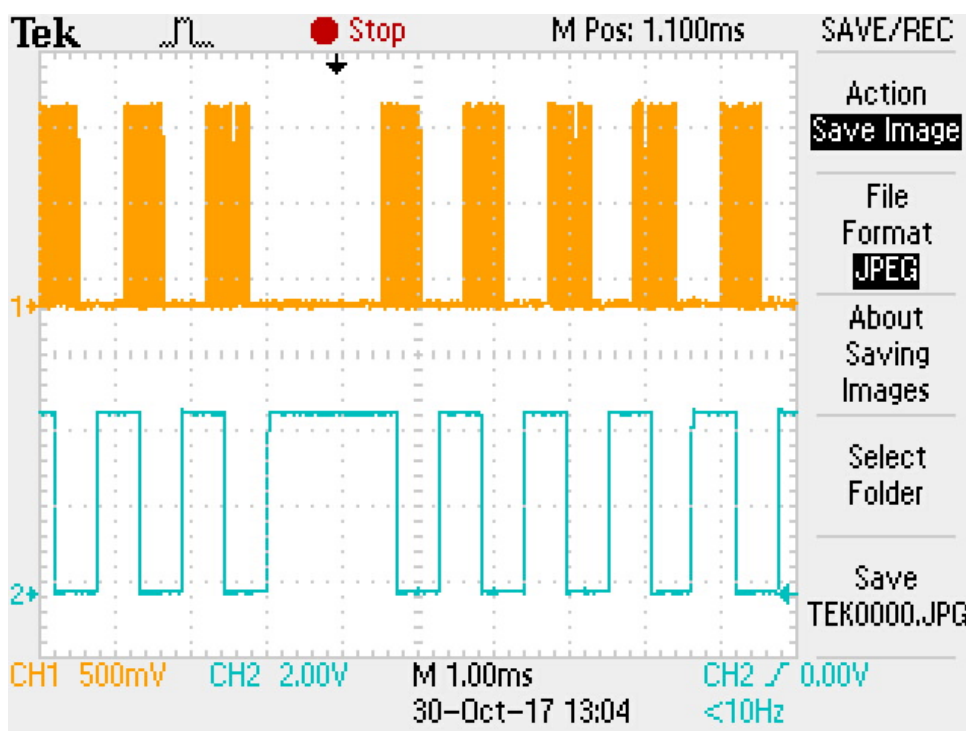


Figura 4.5: Medições no fotodetector (Ex) realizado com auxílio de Osciloscópio durante transmissão de dados

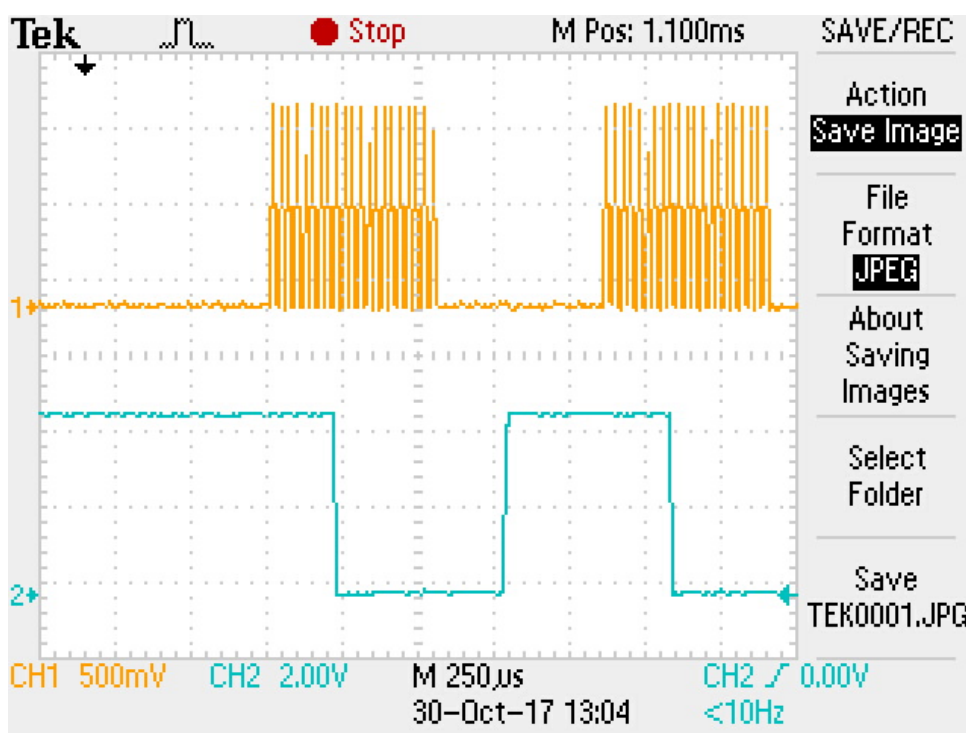


Figura 4.6: Medições no fotodetector (Ex) realizado com auxílio de Osciloscópio durante transmissão de dados

aumentar o alcance do enlace A e B inicial, tendo outras possibilidades de enlaces interconectados em cascata ao enlace A e B inicial. Vale ressaltar que as medidas de potência coletadas pelo fotodiodo são pontuais. Isso significa que em determinado

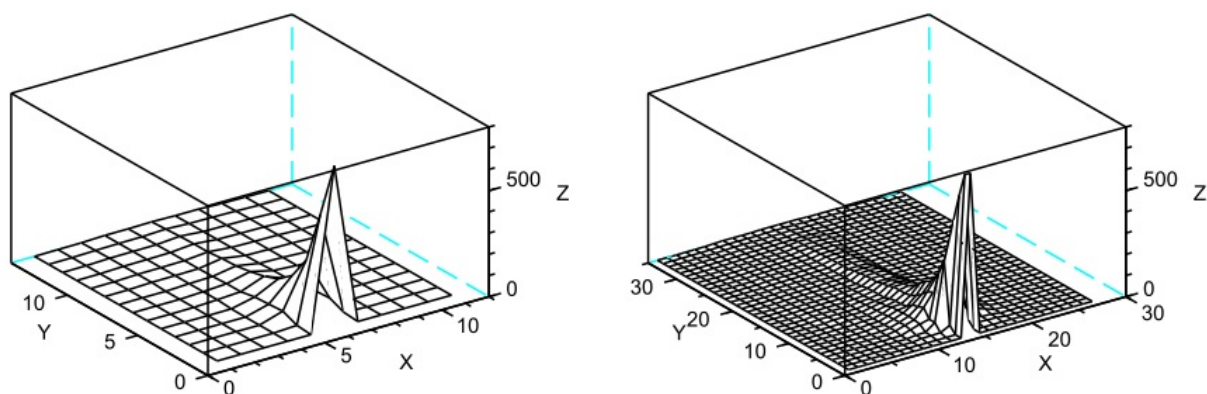


Figura 4.7: *Plotagem dos valores obtidos nas tabelas de medição de intensidade para distância de 5cm e 2cm entre pontos de Ex*

ponto x e y seja no ponto A (Tx) ou no ponto B (Rx), do enlace de comunicação para cada Ex apresentado esses valores de x e y bem como o valor de intensidade do sinal variam.

Podemos concluir tem por base os primeiros experimentos reais que a topologia **Firefly B** que foi proposta, tem potencial tecnológico e comercial. Provamos nesse capítulo que ao deixarmos de tratar a questão do *Eavesdropper* como um problema e identificar dentro de um enlace os pontos de Ex para alocar transceptores foi benéfico. Dessa forma, começamos a constituir uma rede comunicação de baixo custo, baseada e em luz com um funcionamento similar as redes P2P já existentes. Um dos diferenciais da topologia **Firefly B** é criar uma nova opção para deixar de trabalhar com sinal Wi-Fi ou seja dedicação por frequência e passar a trabalhar com Li-Fi. Enquanto em RF temos cerca de 300 GHz disponíveis, na faixa de luz do visível ou infravermelho temos 300 THz, e possui a vantagem de não causar interferências eletromagnéticas em sistemas já existentes.

Capítulo 5

Conclusões

No decorrer deste trabalho analisamos o comportamento da luz usada como sinal de comunicação. Inicialmente foi feito um embasamento sobre em que consiste a comunicação óptica e como trabalham as tecnologias FSO/CWO. Definimos o que é eficiência quântica e como os diodos fotodetectores funcionam. Foram demonstrados conceitos e formulas matemáticos sobre: espectro de frequência, hipótese de Planck e função de Mie, que estão diretamente relacionados com a comunicação FSO/CWO. Também descrevemos o que vem a ser um canal LOS e como através desse surge o canal NLOS, principalmente em transmissores de LED. Realizamos testes de intensidade de sinal dentro de um plano cartesiano o que tornou possível definir o maior alcance para um transmissor de LED obter sucesso na transmissão de dados.

Explicamos no que consiste a técnica de Eavesdropper, como ela surgiu através da fuga de feixes de sinal transmitidos em uma enlace ponto a ponto. Provamos que é possível trabalhar com Eavesdropper de forma a beneficiar a rede. Vimos que os testes de intensidade de sinal ajudaram a definir dentro da área do feixe de transmissor os possíveis pontos de *Eavesdropper*.

Nessa dissertação foi explicado o conceito de análise e avaliação de desempenho em redes de comunicação de dados, esse conceito foi usado na construção de diagramas de classe e de atividade vinculados a nova topologia proposta *Firefly B*.

Detalhamos as tecnologias que são utilizadas na estruturação da *Firefly B*, além de apresentar uma comparação com redes OWC já utilizadas no mercado como por exemplo a VLC. Baseados nos primeiros experimentos reais que a topologia *Firefly B* é viável tecnologicamente falando. Ela é única uma vez que durante nossas pesquisas até a presente data não soubemos de nenhuma outra tecnologia FSO/OWC, destinada a comunicação de dados com uso de LED que se utiliza de Eavesdropper. O que encontramos em nossas pesquisas como citado no decorrer da dissertação

foram tecnologias desenvolvendo técnicas para prevenir ou evitar a ocorrência de *Eavesdropper* vendo o mesmo como ponto negativo.

Podemos concluir que atingimos os objetivos propostos no início dessa dissertação, propondo uma topologia de baixo custo capaz de prover comunicação de dados em ambientes fechados ou abertos, interligando dispositivos com possibilidade de se interligar a outras redes de comunicação e tudo com baixo custo de produção. Podemos afirmar que com essa dissertação damos um passo a mais para o avanço das comunicações *Li-Fi*.

5.1 Sugestões para Pesquisas Futuras

Apesar de tudo que foi apresentado o como fruto das primeiras simulações muitas outras perguntas surgem abrindo espaço para diversas sugestões de temas para trabalhos futuros:

- definir um protocolo de funcionamento do ***Firefly B***;
- reescrever o código do *software* de comunicação afim de definir a maior taxa de transmissão viável para comunicações bem sucedidas entre pontos A e B do mesmo enlace de comunicação;
- restar novas placas de comunicação para trabalhar como transceptores por exemplo placas de comunicação com processadores ARM;
- criar um ambiente atendido somente por ***Firefly B*** com diversos equipamentos interligados e aplicar testes sobre: controle de congestionamento, controle de fluxo, taxa de erro e segurança;
- desenvolver uma ferramenta de *software* que calcule automaticamente os pontos ideais de *Eavesdropper*;
- realizar um estudo para definir quantos enlaces de *Eavesdropper* sem impactar no funcionamento da rede ***Firefly B***.

Referências Bibliográficas

AGRAWAL, G. P. *Lightwave technology: telecommunication systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. 12

ARDUINOUNO. <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUnoSMD>>. Accessed: 2018-05-07. 37

BOYLESTAD, R. J.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. [S.l.]: 11a. Ed, Sao Paulo, 2013. 19, 21

CORREIA, M. M. et al. Desenvolvimento de acionadores de corrente de leds para enlaces com fibras ópticas plásticas. Simposio Brasileiro de Telecomunicacoes e Processamento - SBrT, 2017. 12, 35

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica*. [S.l.]: Editora Campus, 1986. 23

GASPARINI, T. M. *APERFEICOAMENTO DE UM DETECTOR DE ESPALHAMENTO DE LUZ LASER EM BAIXO ÂNGULO (LALLS IN-LINE) PARA ACOMPANHAMENTO EM TEMPO REAL DO PROCESSO DE EXTRUSÃO*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2015. 17

JAIN, R. *Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques For Experimental Design Measurements Simulation And Modeling*. [S.l.]: John Willey Sons, Inc, 1991. 26, 27

JUNIOR, P. R. L. et al. Comunicação por luz visível: Características e oportunidades de pesquisa e desenvolvimento. *REVISTA DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO*, IFPB, v. 05, n. 2, p. 33–38, 2015. 31

KOONEN, T. Indoor optical wireless systems: Technology, trends, and applications. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, Fellow, OSA, v. 36, n. 8, 2018. 35

KUMAR, N. et al. Visible light communication systems conception and vidas. *IETE Technical Review*, Taylor Francis, v. 25, n. 6, p. 359–367, 2008. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.4103/0256-4602.45428>>. 18

MALINA, L. et al. Security solution with signal propagation measurement for gigabit passive optical networks. *Elsevier*, Department of Telecommunications, Brno University of Technology, 2016. 12

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. *J. Braz Chem. Soc.*, Universidade Estadual de Campinas, v. 14, n. 2, 2003. 15, 16

PRANAV, K. J.; NEHA, M. Challenges and potentials for visible light communications: State of the art. *American Institute of Physics*, IFPB, 2017. 18, 19

SANTOS, A. P. d. *Espectroscopia de Infravermelho Próximo em Análises de Solos e Plantas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2011. 16

SINGHAL, P.; GUPTA, P.; RANA, P. Basic concept of free space optics communication (fso): An overview. In: *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 0439–0442. 16, 17

SUN, X.; DJORDJEVIC, I. B. Physical-layer security in orbital angular momentum multiplexing free-space optical communications. *IEEE Photonics*, IEEE Photonics Journal, 2016. 13, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 42

Apêndice I

```
//programa para transmissão de dados Tx
```

```
int ledf = 9;  
int led = 10;  
//int next = LOW;  
int recep =A0;
```

```
//memoria  
boolean b1;  
boolean b2;  
boolean b3;  
boolean b4;  
boolean b5;  
int bt;
```

```
//texto  
char txt;
```

```
//transmissão  
int um;  
int zero;
```

```
//discionario
```

```
// a 0 0 0 0 1  
// b 0 0 0 1 0  
// c 0 0 0 1 1  
// d 0 0 1 0 0  
// e 0 0 1 0 1  
.  
.
```

```

.
// y 1 1 0 0 1
// z 1 1 0 1 0
// 0 1 1 0 1 1
// 1 1 1 1 0 0
// 2 1 1 1 0 1
// 3 1 1 1 1 0
// f 1 1 1 1 1

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(led,OUTPUT);
  pinMode(ledf,OUTPUT);
  pinMode(recep, INPUT);
}

void loop() {

  //lapis
  //um = digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
  digitalWrite(led,LOW);delay(x);
  //zero = digitalWrite(ledf,HIGH); delay(x);
  digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);

  //timer
  int x = 10; //enviar
  int y = 2; //receber

  //transformação do texto em binario
  if (Serial.available()) {
    txt = Serial.read();
    if (txt == 'a'){
      digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
      digitalWrite(led,LOW); delay (x);
      digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
      digitalWrite(led,LOW); delay (x);
      digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
      digitalWrite(led,LOW); delay (x);
    }
  }
}

```

```

digitalWrite(ledf,HIGH); delay(x);
digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);
digitalWrite(ledf,HIGH); delay(x);
digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);
digitalWrite(ledf,HIGH); delay(x);
digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);
digitalWrite(ledf,HIGH); delay(x);
digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);
digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
    digitalWrite(led,LOW);delay(x);
}

```

```

if (txt == 'b'){
digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
digitalWrite(led,LOW); delay (x);
digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
digitalWrite(led,LOW); delay (x);
digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
digitalWrite(led,LOW); delay (x);
}

```

```

digitalWrite(ledf,HIGH); delay(x);
digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);
digitalWrite(ledf,HIGH); delay(x);
digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);
digitalWrite(ledf,HIGH); delay(x);
digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);
digitalWrite(led,HIGH); delay(x);
digitalWrite(led,LOW);delay(x);
digitalWrite(ledf,HIGH) ;delay(x);
digitalWrite(ledf,LOW);delay(x);}

```

```

.
.
.

```

```
//alinhamento de transmissão
```

```

recep = analogRead(A0);
if (recep >= 50){delay (y);recep = analogRead(A0);
if (recep >= 50){delay (y);recep = analogRead(A0);

```

```

if (recep >= 50){delay(y);

//armazenador de bits
recep = analogRead(A0);
if (recep >= 50){b1 = 1;}
if (recep <= 10) {b1 = 0;}
delay(y);
.
.
.
//sistema de chaveamento
if(b1 == 0){if(b2 == 0){if(b3 == 0){if(b4 == 0)
{if(b5 == 1){Serial.print("a");}}}}}}
if(b1 == 0){if(b2 == 0){if(b3 == 0){if(b4 == 1)
{if(b5 == 0){Serial.print("b");}}}}}}
.
.
.
}
}
} //executado
executado = 0;
}

```

Apêndice II

```
//Teste para mensurar sensibilidade do Sinal
de LED Rx(fotodetector)
//Teste de intensidade de sinal de LED de Tx
const int led = 7;
const int botao = 10;
const int sensor = A0;

int diferenca;
int intensidade;
int soma;
int total;

int vezes = 20000;
int executado = 0;

int vezes2 = 5;
int executado2 = 0;
int valido;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(led, OUTPUT);
  pinMode(botao, INPUT);
  digitalWrite(botao, HIGH); // Ativa resistor pull-up
}
void loop()
{
  int valor = digitalRead(botao);
  if (valor == LOW) {
    digitalWrite(led, LOW);
```

```
delay(10);
Serial.println("iniciando calibragem");
diferenca = analogRead(A0);
delay(10);
//analogWrite(led, 180);
digitalWrite(led, HIGH);

//iniciando leitura
for(executado; executado < vezes; executado++){
  intensidade = analogRead(A0);
  soma = ((intensidade-diferenca));
  total += soma;
  Serial.println(soma);
  //Serial.println(total);
  delay(10);
}

//Serial.println(total/20);
executado = 0;
total = 0;

executado2 = 0;
}
//else {delay(500);}
}
```

Anexo A

EVERLIGHT

Technical Data Sheet

5mm Infrared LED , T-1 3/4

Features

- High reliability
- High radiant intensity
- Peak wavelength $\lambda_p=940\text{nm}$
- 2.54mm Lead spacing
- Low forward voltage
- Pb free
- The product itself will remain within RoHS compliant version.

Descriptions

- EVERLIGHT'S Infrared Emitting Diode(IR333-A) is a high intensity diode , molded in a blue transparent plastic package.
- The device is spectrally matched with phototransistor , photodiode and infrared receiver module.

Applications

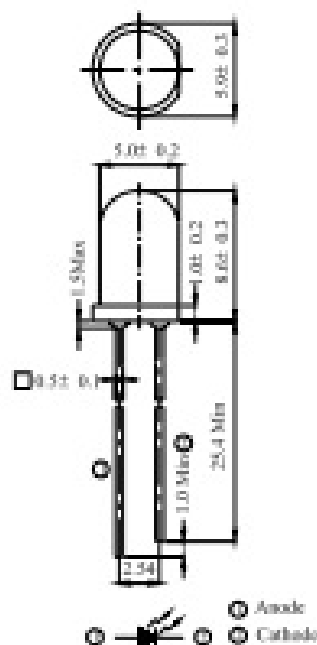
- Free air transmission system
- Infrared remote control units with high power requirement
- Smoke detector
- Infrared applied system

IR333-A



Device Selection Guide

LED Part No.	Chip	Lens Color
	Material	
IR	GaAlAs	Blue

IR333-A**Package Dimensions**

- Notes:** 1.All dimensions are in millimeters
 2.Tolerances unless dimensions ± 0.25 mm

Absolute Maximum Ratings (Ta=25℃)

Parameter	Symbol	Rating	Units
Continuous Forward Current	I_F	100	mA
Peak Forward Current	I_{FP}	1.0	A
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{op}	-40 ~ +85	℃
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +85	℃
Soldering Temperature	T_{sol}	260	℃
Power Dissipation at(or below) 25℃ Free Air Temperature	P_d	150	mW

Notes: *1: I_{FP} Conditions--Pulse Width $\leq 100 \mu s$ and Duty $\leq 1\%$.

*2:Soldering time ≤ 5 seconds.

Anexo B



TSOP48..

Vishay Semiconductors

IR Receiver Modules for Remote Control Systems

Description

The TSOP48.. - series are miniaturized receivers for infrared remote control systems. PIN diode and preamplifier are assembled on lead frame, the epoxy package is designed as IR filter.

The demodulated output signal can directly be decoded by a microprocessor. TSOP48.. is the standard IR remote control receiver series, supporting all major transmission codes.



Features

- Photo detector and preamplifier in one package
- Internal filter for PCM frequency
- Improved shielding against electrical field disturbance
- TTL and CMOS compatibility
- Output active low
- Low power consumption

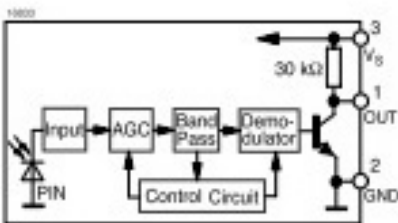
Special Features

- Improved immunity against ambient light
- Suitable burst length ≥ 10 cycles/burst

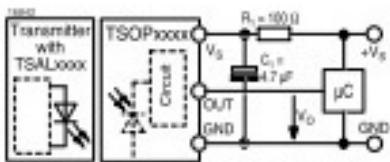
Parts Table

Part	Carrier Frequency
TSOP4830	30 kHz
TSOP4833	33 kHz
TSOP4836	36 kHz
TSOP4837	36.7 kHz
TSOP4838	38 kHz
TSOP4840	40 kHz
TSOP4856	56 kHz

Block Diagram



Application Circuit



$R_1 + C_1$ recommended to suppress power supply disturbances.

The output voltage should not be held continuously at a voltage below $V_O = 3.3$ V by the external circuit.

TSOP48..

Vishay Semiconductors



Absolute Maximum Ratings

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	(Pin 3)	V_S	- 0.3 to + 6.0	V
Supply Current	(Pin 3)	I_S	5	mA
Output Voltage	(Pin 1)	V_O	- 0.3 to + 6.0	V
Output Current	(Pin 1)	I_O	5	mA
Junction Temperature		T_J	100	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range		T_{stg}	- 25 to + 85	$^{\circ}\text{C}$
Operating Temperature Range		T_{amb}	- 25 to + 85	$^{\circ}\text{C}$
Power Consumption	($T_{amb} < 85\text{ }^{\circ}\text{C}$)	P_{tot}	50	mW
Soldering Temperature	$t \leq 10\text{ s}$, 1 mm from case	T_{sol}	260	$^{\circ}\text{C}$

Electrical and Optical Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Supply Current (Pin 3)	$V_S = 5\text{ V}$, $E_a = 0$	I_{SP}	0.8	1.2	1.5	mA
	$V_S = 5\text{ V}$, $E_a = 40\text{ klx}$, sunlight	I_{SPH}		1.5		mA
Supply Voltage		V_S	4.5		5.5	V
Transmission Distance	$E_a = 0$, test signal see fig. 1, IR diode TSAL6200, $I_P = 250\text{ mA}$	d		35		m
Output Voltage Low (Pin 1)	$I_{OHL} = 0.5\text{ mA}$, $E_a = 0.7\text{ mW/m}^2$, test signal see fig. 1	V_{OHL}			250	mV
Irradiance (56 kHz)	Pulse width tolerance: $t_{PW} - 5t_r < t_{PW} \leq t_{PW} + 6t_r$, test signal see fig. 1	$E_{a, min}$		0.3	0.5	mW/m^2
Irradiance (30–40 kHz)	Pulse width tolerance: $t_{PW} - 5t_r < t_{PW} \leq t_{PW} + 6t_r$, test signal see fig. 1	$E_{a, min}$		0.2	0.4	mW/m^2
Irradiance	$t_{PW} - 5t_r < t_{PW} \leq t_{PW} + 6t_r$, test signal see fig. 1	$E_{a, max}$	30			W/m^2
Directivity	Angle of half transmission distance	$\theta_{1/2}$		± 45		deg