

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Eletrônica

**Título: VLC - Comunicação Óptica por Luz  
Visível**

**Autor: Vilmey Francisco Romano Filho**  
**Orientador: Dr. Leonardo Aguayo**

**Brasília, DF**  
**2015**





Vilmey Francisco Romano Filho

## **Título: VLC - Comunicação Óptica por Luz Visível**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Leonardo Aguayo

Brasília, DF

2015

---

Vilmey Francisco Romano Filho

Título: VLC - Comunicação Óptica por Luz Visível/ Vilmey Francisco Romano  
Filho. – Brasília, DF, 2015-

53 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Leonardo Aguayo

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2015.

1. Visual Light Communication. 2. Comunicação Óptica por Luz Visível. I.  
Dr. Leonardo Aguayo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama.  
IV. Título: VLC - Comunicação Óptica por Luz Visível

CDU 02:141:005.6

---

Vilmey Francisco Romano Filho

## **Título: VLC - Comunicação Óptica por Luz Visível**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 01 de junho de 2015:

---

**Dr. Leonardo Aguayo**  
Orientador

---

**Dr. Wellington Avelino do Amaral**  
Convidado 1

---

**Titulação e Nome do Professor**  
**Convidado 02**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2015



*Dedico este trabalho de conclusão de curso aos amigos e familiares que sempre me apoiaram na minha caminhada rumo a graduação, e especialmente aos meu avós , Emi e Josefa .*





# Agradecimentos

*Agradeço a todo o suporte dado pelos meus pais, Vilmey Pai e Gardênia, que sempre me incentivaram nesta caminhada, e aos meus amilos de longa data que fizeram desse processo menos doloroso e mais divertido em especial aos meus roomates Thiago, Yan e Bruno, e a minha namorada Min. .*



*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,  
mas transformai-vos pela renovação da mente,  
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:  
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.  
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*



# Resumo

A comunicação óptica se encontra atualmente concentrada em transmissão de dados via meio confinado em especial a fibra óptica. E atualmente estamos desenvolvendo tecnologias para termos os mesmos benefícios desta comunicação em meios não confinados. A tecnologia OWC (Optical Wireless Communication), comunicação óptica sem fio se encontra ainda em desenvolvimento, porem apresentam muitas vantagens em relação a comunicação via radio e outras comunicação cabeadas. Este trabalho traz a elaboração de um protótipo de comunicação óptica para transmissão de dados com o uso de luz visível ao olho humano. Com o uso de microcontroladores para comunicação entre maquinas, transmissor e receptor, e computadores para comunicação humano - maquina. Os resultados obtidos mostram que a tecnologia, que ainda de encontra em desenvolvimento, tem muito potencial de crescimento nos próximos anos.

**Palavras-chaves:** Comunicação óptica por luz visível, Transmissão de dados, Optical Wireless Communication, Visual Light Communication, VLC.



# Abstract

**Key-words:** Optical Wireless Communication, Visual Light Communication, Microcontrollers.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Desenho do fofone por Alexander Graham Bell e Charles Tainter (HRANILOVIC, 2009) . . . . .	29
Figura 2 – Espectro de luz visível ao ser humano. . . . .	32
Figura 3 – Categorias de comunicação óptica baseado no alcance de transmissão. . . . .	33
Figura 4 – Ilustração de um sistema de comunicação de pequeno alcance. . . . .	33
Figura 5 – Simulação de um teste de estresse cardíaco com base em um VLC. LEDs conectados aos transmissores enviam dados ao receptor localizado na barra de apoio do equipamento. . . . .	34
Figura 6 – Um hot spot VLC, onde a luminária funciona como um transmissor e o dispositivo USB como um receptor do sinal. . . . .	35
Figura 7 – Rede VLC veicular, veículos se comunicam entre si e com a infraestrutura. . . . .	35
Figura 8 – Conexão entre prédios. . . . .	36
Figura 9 – FSO podem ser utilizados na comunicação aérea. . . . .	36
Figura 10 – Esquema simplificado da transmissão de dados. . . . .	41



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Frequências utilizadas pelos dispositivos de comunicação padrão (ENCYCLOPEDIA, ) . . . . .	30
Tabela 2 – Comparação entre transmissão via rádio e óptico . . . . .	32



# Lista de abreviaturas e siglas

OWC	Optical Wireless Communication
VLC	Visual Light Communication
LED	Diodo emissor de luz
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexer
USB	Universal Serial Bus
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Hz	Hertz
s	Segundos
m	Metros



# Lista de símbolos

$\eta$	Nano ( $10^{-9}$ )
$\mu$	Micro ( $10^{-6}$ )
$m$	Mili ( $10^{-3}$ )
$M$	Mega ( $10^6$ )
$G$	Giga ( $10^9$ )





# Sumário

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
Motivação	25
Objetivos	26
Estrutura do texto	26
<b>I FUNDAMENTOS DA COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL</b>	<b>27</b>
<b>1 HISTÓRICO</b>	<b>29</b>
<b>1.1 Meios de Comunicação sem Fio</b>	<b>30</b>
1.1.1 VLC vs. Radiofrequência	31
1.1.2 Aplicações	32
1.1.2.1 Ultra-Short Range	33
1.1.2.2 Short Range	33
1.1.2.3 Medium Range	34
1.1.2.4 Long Range	35
1.1.2.5 Ultra-Long Range	36
1.1.2.6 INDOOR VLC SYSTEMS	36
<b>II MONTAGEM DE HARDWARE</b>	<b>39</b>
<b>2 DESIGN DO SISTEMA</b>	<b>41</b>
<b>2.1 Transmissor Óptico</b>	<b>42</b>
2.1.1 Emissor de fóton	43
2.1.1.1 Light Emitting Diodes (LEDs)	43
2.1.1.2 Laser Diodes (LDs)	44
2.1.2 Escolha do Dispositivo Óptico	44
2.1.3 Driver do LED	45
2.1.4 Mensagem	45
2.1.5 Teste do emissor	45
2.1.6 Futuros aprimoramentos do emissor	46
<b>2.2 Receptor Óptico</b>	<b>46</b>
2.2.1 Detector de fóton	46
2.2.1.1 p-n Fotodiodo	46
2.2.2 Processamento do sinal	47

2.2.2.1	Conversor de Corrente - Tensão . . . . .	47
2.2.2.2	Decodificação . . . . .	48
2.2.3	Teste do receptor . . . . .	48
2.2.4	Futuros aprimoramentos do receptor . . . . .	48

III INTRODUÇÃO TEÓRICA 49

<b>3</b>	<b>TESTES DO SISTEMA</b>	<b>51</b>
<b>3.1</b>	<b>Montagem</b>	<b>51</b>
3.1.1	Transmissor	51
3.1.2	Receptor	51
3.1.3	Alinhamento	51
<b>3.2</b>	<b>Testes</b>	<b>51</b>
<b>3.3</b>	<b>Resultados</b>	<b>51</b>

**REFERÊNCIAS** ..... 53

# Introdução

## Motivação

Recentemente, houve a migração da força computacional dos computadores de mesa para dispositivos móveis. Dispositivos como câmeras e celulares podem adquirir e processar uma vasta quantidade de informação em curto intervalo de tempo. Apesar de conveniente, a troca de informações entre estes dispositivos se mantém um desafio devido ao seu pequeno tamanho e portabilidade. Conexões de alta velocidade são necessárias para permitir que a informação possa ser transferida de maneira eficaz e menos sofrível entre estes dispositivos portáteis a rede de computadores, servidores de armazenamento ou internet.

Uma possível solução para a transferência de dados é uma conexão direta elétrica entre o dispositivo móvel e o servidor. Essa conexão elétrica por cabo e conectores nas duas extremidades oferece muitas desvantagens, pois os conectores podem ser caros devido ao pequeno tamanho do dispositivo, e mesmo assim esses cabos são propensos a falha e a quebra com o uso contínuo. Para o usuário esta solução apresenta o inconveniente de ter que utilizar cabos que limitam a mobilidade do dispositivo. E um dos meios de solucionar tal problema de transferência de dados se encontra na comunicação óptica sem fio.

A comunicação óptica sem fio é uma tecnologia que ainda se encontra em desenvolvimento, porém nos últimos cinquenta anos apresentou um avanço muito grande. Existem muitas vantagens neste tipo de comunicação em relação a comunicação via rádio e a sistemas de comunicação cabeados. A comunicação óptica sem fio oferece maior largura de banda e potencialmente maiores taxas de transmissão de dados se comparados com a comunicação via rádio convencional. O espectro de luz em que a comunicação óptica trabalha não é regulada, oferecendo maior flexibilidade quando comparada as frequências de rádio, as quais são regulamentadas. Não somente o espectro utilizado não é regulado, como a faixa de luz enxergada pelos humanos esta contida, permitindo que os dispositivos utilizados para transmissão, também possam ser utilizados para promover luz virtualmente constante ao ambiente enquanto transmite informações em alta frequência.([HRANILOVIC, 2009](#))

Este método de comunicação que ainda esta! em fase de desenvolvimento apresenta possibilidades de aplicação em diversas áreas da engenharia, facilitando a comunicação em localidades em que o uso de rádio frequência e! restrita ou inviável. Como por exemplo em bases aéreas, hospitais, laboratórios e demais locais que deseja-se evitar a interferência das ondas de rádio em circuitos e equipamentos. As aplicações do VLC variam de acordo

com a distancia de transmissão, podendo transmitir informações a distancias da ordem de nanômetros dentro de circuitos integrados e ate! mesmo realizar a comunicação entre estações base e satélites.

Não obstante a tecnologia comunicação óptica simplifica os circuitos de transmissão e recepção visto que não é necessário o dispendioso trabalho de projetar circuitos imunes a interferências das ondas eletromagnéticas.([HRANILOVIC, 2009](#))

## Objetivos

Neste trabalho é apresentado uma alternativa aos sistemas de radiofrequência, utilizando a faixa de luz visível ao olho humano para realizar a transferência de dados. O nome dados a esse tipo de comunicação é VLC. Sera! confeccionado um protótipo funcional. E este dispositivo deve realizar a comunicação entre dois pontos, o transmissor e o receptor. O protótipo deve ser capaz de transmitir informações a um distancia de curto e médio alcance, utilizando a tecnologia óptica.

## Estrutura do texto

**ADICIONAR ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

## Parte I

# Fundamentos da Comunicação por Luz Visível



# 1 História do VLC

Existem relatos da luz sendo utilizada com a finalidade de comunicação sem fio antes dos anos 800 A.C. Fogueiras eram acesas e utilizadas como um farol para sinalizar, assim como sinais de fumaça para realizar comunicações a longa distância. A luz do sol foi utilizada combinada com espelhos para enviar luz direcionada a um local específico. Nos século 19 lampadas eram usadas para comunicação entre barcos e faróis para alertar as embarcações de perigos, condições das águas e até mesmo bancos de areia.

O uso da luz para transmitir informações tem sido usada desde a antiguidade. Faróis de fogo eram acesos no alto de montanhas para transmitir mensagens a longas distâncias. Contudo o sistema de comunicação era capaz de transmitir apenas um único bit de informação, e isso era de longe o meio mais rápido de transmitir informações sobre eventos importantes a localidades distantes.

Nos começo do anos 1790, Claude Chappe inventou o telégrafo óptico, o qual era capaz de enviar mensagens a longas distâncias mudando a orientação do “braço” sinalizador provido de espelhos em uma torre. Um livro com orientações de sinalização foi criado para codificar letras do alfabeto, numerais e palavras comuns. Essas mensagens podiam ser enviadas a distâncias da ordem de quilômetros em questão de minutos.([STANDAGE, 1998](#))

Um dos primeiros sistemas de comunicação óptica a utilizar detectores eletrônicos foi o fotofone criado por Graham Bell e Charles Tainter, este dispositivo foi patenteado em 14 de dezembro de 1880, nos Estados Unidos da América.([AL-AZZAWI, 2007](#))

A figura [1] apresenta o desenho do dispositivo feito pelos criadores. O sistema foi

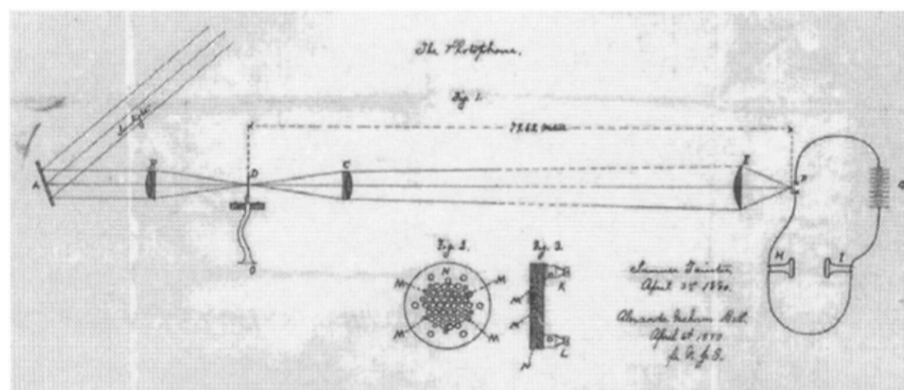


Figura 1: Desenho do fotofone por Alexander Graham Bell e Charles Tainter ([HRANILOVIC, 2009](#))

projetado para transmitir a voz do operador a uma distancia, modulando a luz do sol que refletia em um diafragma. Do outro lado o receptor consiste de um cristal de selênio que converte o sinal óptico em corrente elétrica. Com este aparato, os criadores eram capazes de transmitir sinais de áudio a uma distancia de 213 metros. ([BELL, 1880](#))

A era moderna de comunicação óptica indoor iniciou em 1979 por F.R. Gfeller e U. Bapst com o uso de transmissões difusas na faixa de infravermelho para comunicação óptica de médio alcance. ([GFELLER; BAPST, 1979](#))

## 1.1 Meios de Comunicação sem Fio

A banda ISM compõe parte do espectro de radio que pode ser utilizada para basicamente qualquer proposito sem a necessidade de requerer licença na maioria dos países. Nos Estados Unidos da América as faixas de banda 902-928 MHz, 2.4 GHz e 5.7-5.8 GHz eram inicialmente utilizadas para maquinário que emitiam radio frequência como fornos micro-ondas e maquinas de solda, mais não para comunicação via rádio. Com o passar dos anos as regulamentações mudaram e as faixas de RF que antes eram desperdiçadas agora fazem parte das frequências utilizadas para comunicação.

<b>Bandas ISM</b>	<b>Limite de Potencia (Watts)</b>
<b>902 - 928 Mhz</b>	
Telefone sem Fio	1 W
Forno microondas	750 W
Aquecedores Industriais	100 kW
Radares Militares	1000 kW
<b>2.4 - 2.4835 Ghz</b>	
Bluetooth	100 mW
Wi-Fi - 802.11b/g	1 W
Forno microondas	900 W
<b>5 GHz</b>	
5.725 - 5.825 GHz	4 W
Wi-Fi - 802.11a/n/ac	4 W

Tabela 1: Frequências utilizadas pelos dispositivos de comunicação padrão ([ENCYCLOPEDIA, \)](#)

Na tabela [1] são apresentadas os protocolos e dispositivos que usufruem da bada ISM. Estão presentes na lista dispositivos militares e industriais, e também dispositivos muito utilizados no nosso dia a dia como e! o caso da tecnologia Bluetooth, IEEE 802.15, e do Wi-Fi, IEEE 802.11. O Bluetooth é um das tecnologias mais populares de WPAN, Wireless Personal Area Network, e pode ser encontrado na maioria dos telefones portáteis atuais. Sendo uma tecnologia que atua em na área pessoal, a tecnologia bluetooth substitui conexoes fisicas de diversas maneiras, como por exemplo telefone celular e head-



sets e monitores cardíacos e equipamento médico.([MCDERMOTT-WELLS, 2005](#)) Hoje a distância de cobertura pode alcançar os 50 metros com a tecnologia Bluetooth 4.0. ([C.BISDIKIAN, 2001](#))

Já o protocolo de comunicação Wi-Fi é destinado ao uso em WLAN, Wireless Local Area Network. Como a área de cobertura do Wi-Fi é maior é utilizado em escritórios, escolas e laboratórios podendo conectar dois ou mais dispositivos dentro da área de cobertura.

### 1.1.1 VLC vs. Radiofrequência

O número de usuários que utilizam comunicações por radiofrequência aumentou consideravelmente nos últimos anos, graças ao crescimento e avanço na tecnologia dos celulares e popularização das redes Wi-Fi. Os serviços de comunicação sem fio se tornaram indispensáveis, porém este sistema ainda possui desvantagens.

Um dos grandes problemas é a capacidade. O espectro de rádio é relativamente pequeno, e seu uso é limitado e ainda o seu licenciamento é caro. A comunicação Wi-Fi disputa parte da banda ISM, apresentado na tabela [1], com outros dispositivos eletrônicos como telefones sem fio e fornos microondas. Por este fato podemos contatar que a banda dedicada a esta comunicação está congestionada.([BOUCHET, 2006](#)) Como possível solução, podemos utilizar o espectro de luz visível. O VLC é uma modalidade de comunicação sem fio onde os dados são modulados na porção de luz visível do espectro eletromagnético, que compreende a faixa de comprimento de onda dos 380 nm aos 780 nm aproximadamente apresentado na figura[2]. Com o VLC problemas de interferência por radiofrequência são minimizados. Se comparado o tamanho do espectro de luz visível com o espectro de ondas de rádio, percebemos que o espectro de trabalho do VLC é! muito maior. Fato que garante maior largura de banda de transmissão.

O VLC é! o tipo de tecnologia verde, pois concilia a economia de energia com o uso de lâmpadas LED, que são mais energeticamente eficiente, com a transmissão de dados, fora o fato de que o custo de investimento no design de um sistema VLC é! muito menor quando comparado aos sistemas de RF.

Existe o problema de disponibilidade, pois em certas situações não é recomendado utilizar ondas de rádio, como em voos e hospitais, devido a possibilidade de interferência em outros aparelhos. Podemos usar o VLC onde há luz e não haverá interferência com sistemas baseados em radiofrequência. Há também o fator de segurança, já que ondas de rádio atravessam paredes e podem ser detectadas. Com o VLC, transmitimos dados até onde a luz alcança, se o sistema de comunicação estiver confinado em uma sala, a sala vizinha não terá se que informação da existência da rede.

A utilização da radiofrequência permite a comunicação indoor e conexões de pe-

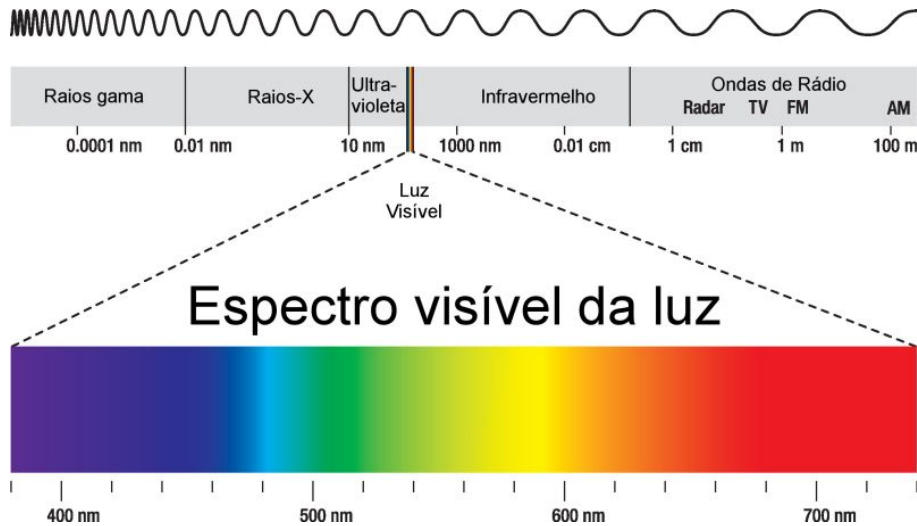


Figura 2: Espectro de luz visível ao ser humano.

quena distancia sem a necessidade de cabos. Contudo essa solução continua relativamente cara e permite medias taxas de transmissão. As faixas de frequência utilizadas pelas conexões de radiofrequência são regulamentadas, e essas regulamentação variam de pais para pais, fazendo com que estabelecer um padrão seja difícil. Adicionalmente, a natureza das comunicações RF permitem conexão movel, porem cria problemas de interferencia entre dispositivos proximos ao transmissor. A contenção de energia eletromagnética em frequencia RF é difícil, e se feito impropriamente pode impedir a performance do sistema.

Propriedade	Óptico	Rádio
Custo	\$	\$\$
Design de circuito RF 2	Não	Sim
Faixa regulamentada	Não	Sim
Taxa de transmissão	100 Mbps	10 Mbps
Segurança	Alta	Baixa
Passa através de paredes ?	Não	Sim

Tabela 2: Comparação entre transmissão via rádio e óptico

### 1.1.2 Aplicações

As aplicações do sistema de comunicação óptico sem fio são as mais variadas. Nesta seção foram organizadas as aplicações de um VLC de acordo com o alcance da transmissão. Para mostrar a versatilidade desse sistema podemos aplicá-lo na comunicação entre circuitos integrados, CIs na ordem de milímetros, e até mesmo na comunicação entre satélites, na ordem de centenas de quilômetros como mostramos na figura[3].

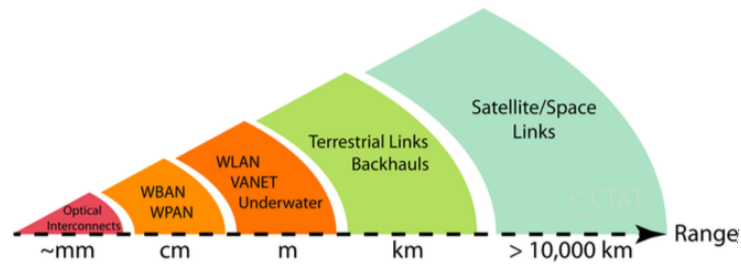


Figura 3: Categorias de comunicação óptica baseado no alcance de transmissão.

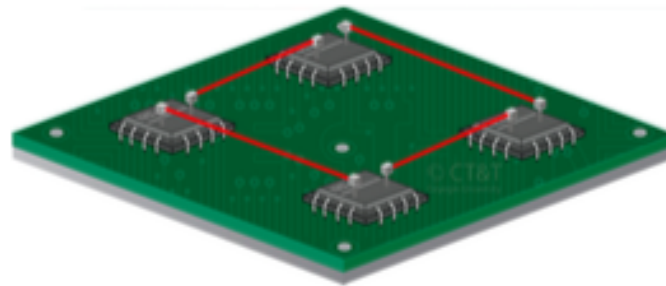


Figura 4: Ilustração de um sistema de comunicação de pequeno alcance.

#### 1.1.2.1 Ultra-Short Range

Atualmente estão sendo estudados meios de facilitar a transferência de dados dentro de circuitos integrados e circuitos impressos. Diante da grande complexidade dos circuitos e necessidade cada vez maiores de altas taxas de transmissões em barramentos, cientistas buscam fazer comunicação de barramentos via transmissores ópticos que reduzam a complexidade das vias e aumentam a eficiência na troca de dados. Esta tecnologia trabalha na ordem dos milímetros, e esse tipo de sistema geralmente é encontrado no nível de chip e é utilizado para comunicação entre circuitos figura[4] ou dentro do mesmo chip. Com o uso deste meio de transmissão rápida conexões de cobre serão substituídas, este processo oferece benefícios na redução da latência dos dispositivos, ou seja o tempo de resposta do circuito será reduzido. Sistemas nesse nível podem ser guiados ou não. Sistemas guiados promovem um link direto de luz entre o transmissor e o receptor enquanto nos sistemas não guiados o feixe de luz é exposto ao ambiente, o que pode causar ruídos e interferências na comunicação.(KEREN; TOMKOS, 2013)

#### 1.1.2.2 Short Range

Sistemas de curto alcance operam na ordem de centímetros e menores que um metro. Este tipo de comunicação pode ser comparada com o Bluetooth, pois atua na mesma faixa de alcance. Uma situação comum de uso desse tipo de comunicação seria em uma rede Wireless Personal Access Networks (WPAN) assim como em uma rede Wireless

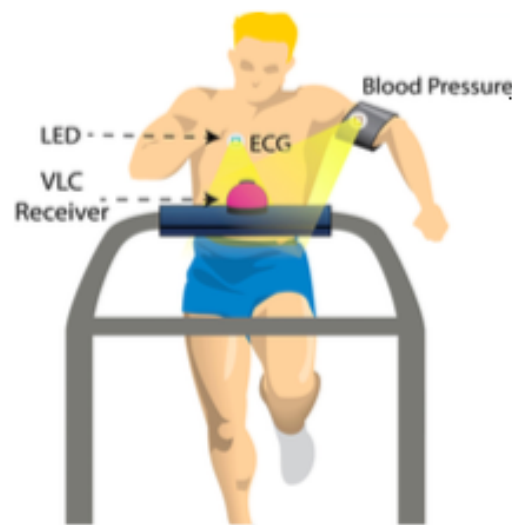


Figura 5: Simulação de um teste de estresse cardíaco com base em um VLC. LEDs conectados aos transmissores enviam dados ao receptor localizado na barra de apoio do equipamento.

Body Access Networks (WBAN). É importante ressaltar que a tecnologia infravermelho geralmente é usada nesse caso, o que não exclui a possibilidade de utilizar a tecnologia VLC. Um exemplo de aplicação desse tipo de sistema se dá em WBAN para hospitais. Hospitais podem eliminar todos os fios que são conectados ao paciente com o uso da tecnologia de comunicação sem fio de aparelhos como medidores de pressão arterial, sensores de glicose, frequência cardíaca dentre outros sensores de aquisição de dados figura[5].

Pesquisas recentes nesta área incluem o uso da câmera de celulares para recepção de dados, onde a câmera integrada, que é um sensor de imagem, é utilizado como detector óptico. O que permite vários tipos de comunicação como entre celulares, entre celular e televisão, celular e máquinas de auto-atendimento dentre outros.([UNDERWOOD; HAAS, 2012](#))

#### 1.1.2.3 Medium Range

A comunicação indoor, WLAN assim como o Wi-Fi, se encontra dentro do sistema de comunicação de médio alcance. Esses sistemas estão sendo desenvolvidos para que possam ser utilizados no espectro de luz visível conhecido como Visual Light Optical Communication (VLC). Por alcance médio definimos sistemas de comunicação com transmissão na ordem de metros, porém geralmente menores que 10 metros. A tecnologia que está sendo desenvolvida nessa área é muito promissora devido aos benefícios que esse tipo de comunicação oferece como duração de longa vida, visto que a vida útil de um LED, alta tolerância à umidade, baixo consumo de energia devido ao grande avanço na tecnologia de fabricação dos diodos emissores de luz (LED). As novas gerações de LEDs devem substituir lâmpadas incandescentes e fluorescentes gradativamente devido à sua ca-



Figura 6: Um hot spot VLC, onde a luminária funciona como um transmissor e o dispositivo USB como um receptor do sinal.



Figura 7: Rede VLC veicular, veículos se comunicam entre si e com a infraestrutura.

pacidade de iluminação com baixo consumo de energia. A tecnologia VLC conta com a onipresença de infraestrutura iluminação baseadas em LED figura[6] para o seu sucesso.

Além de aplicações indoor, LEDs estão sendo vastamente utilizados em áreas abertas, para sinalização de tráfego, faróis e lanternas veiculares dentre outros. Isso favorece a implementação de comunicação entre veículos, assim como veículos e a infraestrutura de comunicação. (TSAI; ROBERTS, 2013) Veículos que possuem LEDs em sua frente e traseira podem se comunicar com os carros próximos a ele, e com a infraestrutura, fixa nas rodovias figura[7].

#### 1.1.2.4 Long Range

Sistemas de longo alcance operam na ordem dos quilômetros, porém não mais do que alguns quilômetros figura[8]. É utilizado em geral em redes Wireless Metropolitan Access Networks (WMAN) que estão sendo desenvolvidos usando Free Space Optical Communication, que nada mais é! que o não confinamento do luz. Em comparação com o RF, uma conexão óptica FSO, que possui maior largura de banda, pode chegar a taxas de transferência de dados de até Tbps. Sistemas FSO tem chamado a atenção como uma solução eficiente de conexão entre o usuário final e a infraestrutura de fibra óptica.

A comunicação wireless óptica de longo alcance também esta sendo projetada para que possa ser aplicada a aeronaves figura[9], e nesse quesito a maior diferença está no fato de que tanto o receptor quanto o transmissor podem estar em movimento. Para

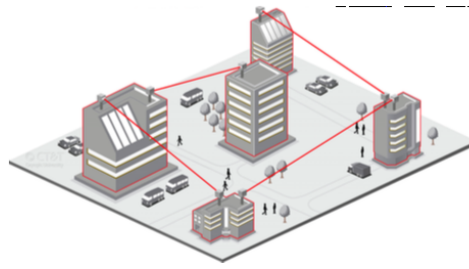


Figura 8: Conexão entre prédios.

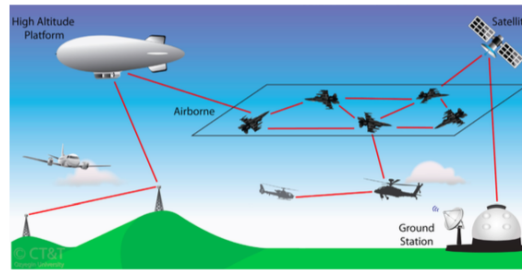


Figura 9: FSO podem ser utilizados na comunicação aérea.

que haja uma comunicação eficiente devem ser adicionadas aos sistemas dispositivos de trackeamento para localizar a desejada localização do receptor/receptor com o uso de algoritmos de posicionamento.

#### 1.1.2.5 Ultra-Long Range

Ultra-Long Range Optical Wireless Communications (OWC) faz o maior salto dentre diferentes classificações de alcance. Esses sistemas são projetados para operar de uma estação radio base para um satélite, satélite para satélite ou até mesmo de planeta a planeta ! Na ordem das dezenas milhares de quilômetros, assim são implementadas as Free Space Optical Communication. Em outubro de 2013, a agência espacial norte americana NASA com seu Lunar Laser Communication alcançou uma taxa de transmissão de 622 Mbps entre a Terra e a Lua que tem distância de 384 600 quilômetros.([SN, 2014](#))

#### 1.1.2.6 INDOOR VLC SYSTEMS

Até o final dos anos 90, a maioria dos Óptical Wireless Communication era feita através da comunicação no espaço livre Free Space Communication (FSO) a qual era operada essencialmente no espectro Infravermelho das ondas eletromagnéticas. Até que finalmente nos anos 2000 foi desenvolvida e implementada a tecnologia VLC, comunicação por luz visível. A faixa de luz visível ao ser humano fica entre os comprimentos de onda de 375nm e 780nm. O maior benefício desse sistema é que estaremos resolvendo dois problemas em um, o primeiro é claro transmitir informação a uma alta taxa, e o segundo problema que será resolvido é a iluminação do ambiente em que se quer coletar a

informação. O objetivo desse sistema é produzir luz branca por meio de um diodo emissor de luz (LED), o qual pode ser alcançado combinando três canais de informação, um em cada uma das cores primárias vermelho, verde e azul. Outra alternativa seria a utilização de apenas um canal na faixa de luz branca.

**(Inserir figura da transmissão difusa)**

Existem diversas maneiras de implementar um VLC fisicamente, os principais tipos são listados abaixo com diferentes combinações para cada categoria. Em um sistema direcional, transmissores e receptores devem ser alinhados para permitir que a maior quantidade de potência seja transmitida, ou seja nesses sistemas temos uma elevada eficiência, quando comparada aos sistemas não direcionais pois a dispersão de luz é reduzida. Apesar de menos potência ser consumida não significa que o dispositivo será capaz de iluminar uma sala. Em comparação os sistemas de não direcionais tem um ângulo de transmissão mais aberto, e assim muito parecido com o que encontramos nos LED's encontrados comumente no mercado. Além de dispositivos direcionais e não direcionais, temos também receptores que trabalham dentro da linha de visão, e também o quis não trabalham dentro da linha de visão, ou seja o receptor não “enxerga” o transmissor. Para que essa comunicação se dê, é preciso contar com a reflexão e difusão da luz dentro do ambiente da sala. Conexões que trabalham fora da linha de visão (Non-Line of Sight) tem são mais robustos e fáceis de usar, permitindo que o link continue a operar mesmo com barreiras como pessoas ou moveis estejam entre o transmissor e o receptor. Quanto maior a robustez do sistema maior será a facilidade de uso, o que é alcançado pelo nondirected-non-LOS link que também é conhecido como link difuso.





## Parte II

### Montagem de Hardware



## 2 Design do Sistema

O diagrama de blocos do mecanismo de transmissão é apresentado baixo na figura(2).

O primeiro bloco representa a mensagem, a qual pode ser encontrada em diversos formatos como binário, áudio, vídeo dentre outros. Essa mensagem deve ser proveniente de algum local específico o que determinará as especificidades da mensagem a ser transmitida. Atualmente possuímos diversos meio de entrada em um sistema, porém iremos reduzir os nossos testes a três tipos: informações pre-programadas dentro do microcontrolador, entrada via standard input de teclado e finalmente sera testado o envio de arquivos de texto entre os dois pontos. De posse da mensagem a ser transmitida, temos que codificá-la de modo que a possa ser transmitida.

O transmissor estará exposto ao ambiente, especificamente o ar, que será o canal de transmissão por onde a luz deverá viajar.

Do lado do receptor teremos o sensor de detecção de luz, que receberá os fótons, assim quando a mensagem binária for recebida ativamos o algoritmo de decodificação que transforma os bytes recebidos na mensagem originalmente enviada. **Codificação de Canal**

O canal de comunicação no entanto é o responsável pela introdução de ruído, interferências e por corromper a mensagem. E esses erros podem ser devidos a diferentes fatores como por exemplo obstáculos, luz externa, e outras fontes de ruído. Desta maneira

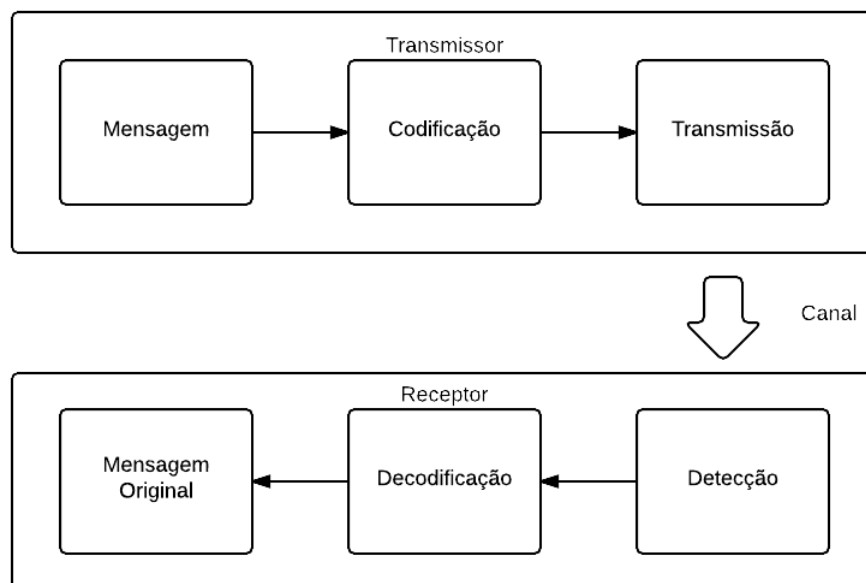


Figura 10: Esquema simplificado da transmissão de dados.

podem ocorrer uma discrepância nos bits recebidos com relação aos bits enviados. Uma das maneiras de garantir a integridade do sinal transmitido da interferência e do ruído, utilizam-se geralmente técnicas de Codificação de Canal. O principal objetivo dessa técnica é reduzir o SNR (Signal to Noise Ratio), aumentando a eficiência do canal de transmissão. A grande vantagem da codificação de canal é portanto melhorar o desempenho do sistema em relação a uma transmissão não codificada. As técnicas de codificação de canal consistem genericamente na introdução de bits redundantes na informação a transmitir. Os bits adicionais permitem, de um modo geral, a detecção e em alguns casos a correção de erros nos bits recebidos. O meio mais simples de se detectar erros na transmissão de uma mensagem é a adição de um bit de paridade. Existem dois tipos de códigos de paridade, o par e o ímpar. Na paridade par, é adicionado um bit '1' ou '0' ao início ou ao final da mensagem de forma a obter um número par de bits '1' na mesma, já na paridade ímpar, o bit é adicionado para se obter um número ímpar de bits '1'.

Contudo o uso das técnicas de codificação tem um preço, quando reduzimos o tamanho da informação útil para adicionar redundâncias estamos reduzindo a largura de banda da nossa comunicação em prol de um sistema de verificação de erros.

**Codificação de Linha** A codificação de linha consiste em representar sinais digitais por formas de onda banda base. Uma maneira simples de codificar bits em pulsos é o chaveamento On-Off (OOK), que representa o bit '1' pela presença de um nível DC e o bit '0' pela ausência dele, como mostrado na figura (incluir figura da codificação).

## 2.1 Transmissor Óptico

O transmissor óptico converte o sinal elétrico em luz, e projeta este sinal no canal de transmissão. Este sistema consiste em uma fonte de fótons, e sistemas auxiliares para operar a fonte de luz.

(Transmitter System Overview figure)

O primeiro passo no design do hardware de transmissão é decidir qual será a fonte de fótons a ser utilizada, pois todo hardware tem que ser projetado para que o possa ser suportada a fonte de luz escolhida.

A segunda parte do transmissor é composta por um software que é o responsável por captar os dados, converter para binário e encapsular toda a informação necessária ao pacote. A mensagem útil (payload) é encapsulada por vários bits. Estes bits sobressalentes a mensagem indicam o início do stream, o final e a codificação de linha que irá indicar erros nos pacotes recebidos.

(Encapsulamento da mensagem figura)

Para que o hardware e software funcionem bem é imprescindível que as limitações

de cada sistema seja conhecida, para que haja otimização das taxas de transferência de dados e redução do Bit Error Rate (BER).

### 2.1.1 Emissor de fóton

A escolha do emissor de fótons influencia em todo o projeto do transmissor, e a correta seleção do elemento emissor de luz é imprescindível para o sucesso da transmissão de dados. Existem duas tecnologias básicas sendo utilizadas na comunicação óptica hoje em dia, uma vertente faz o uso dos LEDs, e a outra de lasers (LDs). Os lasers são utilizados em longas linhas de transmissão em fibra óptica, devido ao seu espectro apresentar estreita largura de banda, sendo menos suscetível ao scattering. (Explicar melhor!!!!!!)

#### 2.1.1.1 Light Emitting Diodes (LEDs)

Os diodos emissores de luz ou mais popularmente LEDs são fontes ópticas formados por uma união p-n, quando polarizados com direta e funcionam apresentam emissão espontânea de luz. Podemos citar suas características como:

- Podem ser modulados em altas velocidades.
- Baixo custo.
- Circuito *driver* de baixa complexidade.
- Fácil aquisição no mercado.
- Seguro aos olhos humanos.
- Luz não coerente.

Ao aplicar tensão direta na junção p-n, os elétrons entram num estado de excitação que é instável. Quando os elétrons energizados retornam ao estado estável, eles liberam energia na forma de fóton. Os fótons podem ser da faixa infravermelha, visível ou ultravioleta de acordo com o espectro eletromagnético. Essa característica de comprimento de onda está relacionado com o gap de energia do material semiconductor. A energia do fóton emitido é aproximadamente igual a diferença entre a banda de condução e a banda de valência, isto é, o gap de energia. (falar da combinação de buracos e potadores !!!!!!!)

Adicionalmente, desde que os fótons são somente liberados quando os elétrons se combinam com buracos, se mais elétrons e buracos se recombinarem, mais fótons serão emitidos. Isso significa que a emissão de luz dos LEDs são linearmente proporcionais a corrente que é aplicada entre seus terminais.

LEDs possuem algumas características importantes como o comprimento de onda do fóton emitido, ou seja a cor da luz emitida, é determinada pela banda de valência

do semiconductor. A largura do espectro de saída pode variar até 50 nm ao redor do comprimento de onda central, que é ditado pela banda de valência.

A velocidade de chaveamento de um LED é determinado pela constante de tempo de recombinação. Dependendo do design, o tempo de subida, rise time, pode variar entre 1 e 100 ns (referencia 65034 - 21), o que significa que os LEDs podem alcançar frequências de até centenas de MHz.

#### 2.1.1.2 Laser Diodes (LDs)

Lasers são de uma certa maneira similares aos LEDs, pois são construídos em cima de junções p-n, porém eles são modificados para permitir que os fótons emitidos espontaneamente possam gerar a recombinação de outros pares elétron-buraco. Essa indução a recombinação emitem fótons com a mesma energia, comprimento e fase do fóton responsável pela estimulação. A este fenômeno é atribuído o nome de emissão estimulada e o seu resultado é uma luz coerente. Emissão estimulada somente ocorre depois de que a corrente de threshold é atingida. Os lasers tem mais recombinações por unidade de tempo que os diodos, o que implica que o tempo de subida (rise time) deste dispositivo é menor, e pode nos garantir frequências na ordem dos GHz (referencia 6503 - 21). Devido a sua natureza os dispositivos laser são dotados de alta potencia e espectro óptico estreito, por volta de 1nm (referencia 6503 - 19). Infelizmente, a emissão estimulada é um desafio a ser mantida, lasers são muito sensíveis a mudanças na temperatura e corrente, o comprimento de onda do laser pode mudar dramaticamente quando esses parâmetros são modificados 0.1nm/°C (referencia 6503 - 19) e a eficiência e corrente de threshold podem mudar significativamente devido a tempo de uso e temperatura (referencia 6503 - 20). Dificuldades ao uso desse dispositivo são adicionadas devido ao fato que lasers requerem um constante monitoramento da temperatura, corrente e emissões de fótons para prevenir danos ao dispositivo, o que adiciona complexidade e custo ao sistema. A sensibilidade do laser resulta em baixa vida útil e baixa confiança no dispositivo.

(Tabela de comparação - LED Laser)

### 2.1.2 Escolha do Dispositivo Óptico

A decisão feita levou em consideração o foco principal do projeto, que é poder conciliar a transmissão de dados a sistemas de iluminação existentes, sejam de carros, casas ou outros ecossistemas. O que pode ser atingido com o uso dos dispositivos baseados na tecnologia LED. Visto que a dispersão de luz assim como o comprimento de onda são mais abertos em relação ao laser. Outras características também contaram para a escolha deste dispositivo como:

- Disponibilidade;

- Circuito driver de menor complexidade;
- Seguro aos olhos;
- Necessidade de cuidados especiais.

### 2.1.3 Driver do LED

Uma vez escolhido o dispositivo fonte de luz, o próximo passo é determinar como será feita a modulação do sinal, ligar e desligar o LED, em relação a informação binária. Como os LEDs são dispositivos controlados por corrente o seu controle será feito por uma fonte de corrente contínua e resistores em série para limitar a corrente. A título de teste e prova de funcionalidade do sistema de comunicação VLC, o circuito abaixo foi montado (Inserir esquemático do circuito) para alimentar o diodo. Como o diodo utilizado é de baixa potencia, a corrente e tensão fornecidas pelo microcontrolador são suficientes para o correto funcionamento do LED.

(Figura esquemático do driver)

### 2.1.4 Mensagem

Agora o sistema carece de uma fonte de sinal para ser convertido em binário e consequentemente enviada ao driver responsável por estimular o LED. Para efeito de teste foram utilizados dois métodos de entrada para o sistema descrito na figura (Adicionar a figura esquemático de conexão), o primeiro se utiliza de uma mensagem pre compilada no microcontrolador, sem a necessidade de outros periféricos. Esta abordagem somente é útil para fins de teste, pois o usuário não pode intervir em nenhuma parte do processo. A segunda fase de testes contou com a aquisição de dados via computador, os quais podem ser tanto via a entrada padrão (STDIN) de teclado ou até mesmo qualquer tipo arquivo, como fotos, arquivos de texto, áudio ou vídeo. O arquivo então é transferido serialmente via USB do computador para o controlador utilizando o protocolo UART. O microprocessador é o dispositivo responsável por codificar e inserir os bits restantes de informação ao pacote de dados, como mostrado na figura (Figura do pacote). Para o teste foram utilizados dois controladores diferentes o Texas MSP430 e o Arduino ATmega 328, ambos com clock de 16Mhz.

(Inserir figura do pacote start, mensagem, paridade, stop) (Explicar Protocolo UART e USB nas siglas)

### 2.1.5 Teste do emissor

A figura (figura do computador+msp+led) mostra o sistema de transmissão. A informação é enviada pelo computador para o controlador via cabo USB, utilizando o

protocolo de comunicação UART. O controlador recebe um bloco de informações via serial e os armazena em um buffer interno. O pacote a ser transmitido é convertido em binário e transmitido ao LED driver que irá ligar e desligar o diodo. O circuito foi montado em uma protoboard mostrada na figura (figura transmissor).

### 2.1.6 Futuros aprimoramentos do emissor

O diodo emissor de luz utilizado nos testes possui baixa potência o que nos leva a escolher um novo LED capaz de realizar uma melhor iluminação do ambiente. Para drivear um LED de maior potência é necessário o design de um novo circuito de alimentação capaz de comutar rapidamente.

## 2.2 Receptor Óptico

O sistema de recepção óptica detecta o sinal óptico e o transforma em um sinal elétrico. Este sistema consiste de um detector de fótons, o qual converte um sinal óptico em corrente elétrica.

(Diagrama de recepção Fóton amp data)

Assim como no transmissor, o componente óptico determina o resto do receptor, neste caso o detector de fótons. A escolha do detector deve ser realizada antes do resto do receptor.

### 2.2.1 Detector de fóton

Existem muitos tipos diferentes de dispositivos opto-eletrônicos que podem ser utilizados como fotodetectores. Idealmente um fotodetector deve ser capaz de responder rapidamente a uma estimulação de fótons realizada pelo transmissor sem que seja adicionado ruído ao sinal. Adicionalmente este dispositivo deve ser pequeno, robusto e barato. Infelizmente o dispositivo real não cumprirá todos estes aspectos, para a nossa aplicação a velocidade de chaveamento é o quesito de maior importância para o detector, seguido pela sensibilidade à luz.

#### 2.2.1.1 p-n Fotodiodo

Fotodiodos convertem luz em corrente elétrica. Quando a luz incide no fotodiodo, uma corrente é gerada do catodo para o anodo (referencia 6503 - 19). Consistentes de duas camadas de semicondutores uma do tipo 'n' e outra 'p', os fotodiodos apresentam na camada do tipo 'p' excesso de buracos e na camada do tipo 'n' excesso de elétrons. Na região de junção dos dois substratos é criada uma região de depleção. Nesta região elétrons e buracos se recombinaem para equalizar o numero de portadores livres no semicondutor.



Este fenômeno produz carga positiva no material tipo n e carga negativa no material do tipo p, devido a redução do número de elétrons e buracos livres. A existência dessa carga previne que mais buracos atravessem a zona de depleção em direção a zona de elétrons livres no material tipo n (referencia 6403 - 38).

Quando um fóton passa através um diodo, esse fóton pode excitar um elétron, criando um par de elétron e um buraco. Se isto ocorrer perto da zona de depleção, o campo elétrico irá guiar buracos em direção ao anodo, lado p, e elétrons em direção ao lado n. Essa separação de cargas leva a uma diferença de potencial entre as junções pn. Esse potencial produz a chamada fotocorrente.(referencia 6403 - 19)

O campo elétrico resultante da zona de depleção é aumentado se aplicado campo elétrico na polarização reversa do diodo. E um campo elétrico maior produz uma zona de depleção maior, o que aumenta significativamente a eficiência quântica, o que significa que o dispositivo será mais sensível a luz (INSERIR EQUAÇÃO !!). Uma região de depleção maior implica em redução da capacitância da junção, porém também aumenta o tempo que pares de elétrons e buracos levam para atravessar a zona de depleção, reduzindo a largura de banda. (referencia 6503 38)

Como cada fóton somente pode excitar no máximo um elétron, e os fotodiodos não possuem nenhum tipo de ganho interno, isso conta como um ponto negativo. Em troca tais dispositivos incrível possuem linearidade, possuem tempo de subida (rise time) de até 10  $\mu$ s são relativamente imunes a ruído e possuem baixo custo. (referencia 6503 34)

(TABELA DE COMPARAÇÃO FOTODETECTORES)

## 2.2.2 Processamento do sinal

Escolhido o fotodiodo como detector de sinal, o próximo passo é fazer o design do circuito eletrônico responsável por condicionar o sinal recebido pelo detector óptico. A figura (INSERIR DIAGRAMA DO RECEPTOR) mostra os principais componentes utilizados no receptor. O primeiro passo é passar o sinal por um amplificador de transimpedância, que irá transformar o sinal de corrente do diodo em nível de tensão que possa ser lido pelo microcontrolador.

### 2.2.2.1 Conversor de Corrente - Tensão

Como discutido anteriormente os fotodiodos funcionam como fonte de corrente quando expostos a luz. Apesar do sinal de corrente ser praticamente linear, a maioria dos componentes eletrônicos trabalham baseados em diferença de tensão. Por este motivo, o sinal de corrente proveniente do diodo deve primeiramente ser convertido em voltagem. Porém existem diversas maneiras de atingir tal meta.

(DESCREVER PULL-UP RESISTOR UTILIZADO E AMPLIFICADORES QUE PODEM SER UTILIZADOS)

Para os testes, foi utilizado o circuito configurado mostrado na figura (ADICIONAR O CIRCUITO DO RECEPTOR)

#### 2.2.2.2 Decodificação

A etapa final é a conversão do sinal de tensão em informação útil. Para realizar tal tarefa foi utilizado o um conversor analógico digital de 10 bits para, presente no microcontrolador ATmega 328. Este conversor AD converte os níveis de tensão de entrada, de 0 a 5 volts, em 1023 faixas. Por ser uma entrada analógica devemos estabelecer um nível de threshold. O threshold funcionará como um parâmetro de nível que determina se a informação de entrada é um bit 1 ou um bit 0. Para valores abaixo do nível selecionado a informação será interpretada com um zero e níveis acima do selecionado são interpretados como o bit um.

De posse da mensagem binária podemos converter-la e enviar ao computador via cabo USB e protocolo UART.

#### 2.2.3 Teste do receptor

(APRESENTAR OS DADOS RECEBIDOS NO TERMINAL)

#### 2.2.4 Futuros aprimoramentos do receptor

Futuras melhorias serão realizadas no hardware de recepção, adicionando um circuito de amplificação de baixo ruído como o apresentado na seção (REFERENCIA A SEÇÃO DE AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDÂNCIA). Que permite a utilizar fotodiodos mais sensíveis e reduzir a taxa de erro devido a melhor amplificação do sinal detectado.

(FIGURA NOVO ESQUEMÁTICO)

## Parte III

### Introdução teórica



## 3 Testes do Sistema

### 3.1 Montagem

#### 3.1.1 Transmissor

#### 3.1.2 Receptor

#### 3.1.3 Alinhamento

### 3.2 Testes

### 3.3 Resultados



# Referências

- AL-AZZAWI, A. *Fiber optics: principles and practices*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor, 2007. Disponível em: <<https://cds.cern.ch/record/1019740>>. Citado na página 29.
- BELL, A. G. *Selenium and the photophone*. [S.l.], 1880. Citado na página 30.
- BOUCHET, O. *Free-Space Optics Propagation and Communication*. [S.l.]: ISTE Ltd, 2006. Citado na página 31.
- C.BISDIKIAN. An overview of the bluetooth wireless technology. *IEEE Communication Magazine*, v. 39, n. 12, p. 86–94, dec 2001. Citado na página 31.
- ENCYCLOPEDIA. Disponível em: <<http://www.pcmag.com/encyclopedia/term/65261/u-nii>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 30.
- GFELLER, F. R.; BAPST, U. Wireless in-house communication via diffuse infrared radiation. In: *Proceedings of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 1979. p. 1474–1486. Citado na página 30.
- HRANILOVIC, S. *Wireless Optical Communication Systems*. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2009. ISBN 1441919821, 9781441919823. Citado 4 vezes nas páginas 15, 25, 26 e 29.
- KEREN, C. K. K. B.; TOMKOS, I. *Optical Interconnects for Future Data Center Networks*. [S.l.]: Springer, 2013. Citado na página 33.
- MCDERMOTT-WELLS, P. What is bluetooth? *Potentials, IEEE*, v. 23, n. 5, p. 33–35, Dec 2005. ISSN 0278-6648. Citado na página 31.
- SN. 2014. (<http://esc.gsfc.nasa.gov/267/271.html>). Citado na página 36.
- STANDAGE, T. *The Victorian internet: The remarkable story of the telegraph and the nineteenth century's on-line pioneers*. New York: Walker, 1998. ix, 227 p. Citado na página 29.
- TSAI, S.-H. Y. O. S. H.-M.; ROBERTS, R. *Smart automotive lighting for vehicle safety*. [S.l.], 2013. Citado na página 35.
- UNDERWOOD, C. D. M. A. G. P. I.; HAAS, H. Using a cmos camera sensor for visible light communication. In: *IEEE Globecom Workshop on OWC*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 34.