



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

VLC - Comunicação Óptica por Luz Visível

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

Brasília, DF
2015



Vilmey Francisco Romano Filho

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

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

66 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. VLC - Comunicação Óptica por Luz Visível

CDU 02:141:005.6

Vilmey Francisco Romano Filho

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, 26 de novembro de 2015:

Dr. Leonardo Aguayo
Orientador

Dr. Wellington Avelino do Amaral
Convidado 1

Dr. Diogo Caetano Garcia
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 e Gardênia, e minhas irmãs Luana, Luiza e Luciana. Aos meus amigos de longa data que fizeram desse processo uma diversão, em especial aos meus roomates e companheiros Thiago, Igor, Yan e Bruno. E a colaboradora especial 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. Atualmente estamos desenvolvendo tecnologias para termos os mesmos benefícios de alta transferência de dados da fibra óptica em meios não confinados. A tecnologia OWC (*Optical Wireless Communication*), do inglês comunicação óptica sem fio se encontra ainda em desenvolvimento, porém apresentam muitas vantagens em relação a comunicação via rádio 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 máquinas, transmissor e receptor, e computadores para comunicação humano - máquina. Os resultados obtidos mostram que a tecnologia, que ainda se 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

The optical communication is currently focused on data transmission by means confined, in particular optical fiber. We are currently developing technologies to bring the same benefits of high data transfer optical fiber in unconfined means. The OWC technology (Optical Wireless Communication) is still under development, but have many advantages over communication via radio and other wired communications. This paper presents the development of a prototype of optical communication for transmitting data using visible light to the human eye. Using microcontrollers for communication between machines, transmitter and receiver, and computers to communicate humans with machine. The results show that this technology, which is still in development, has a lot of potential for growth in coming years.

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

Listas de ilustrações

Figura 1 – Desenho do fotofone por Alexander Graham Bell e Charles Tainter (HRANILOVIC, 2009)	27
Figura 2 – Espectro de luz visível ao ser humano.	30
Figura 3 – Categorias de comunicação óptica baseado no alcance de transmissão. .	31
Figura 4 – Ilustração de um sistema de comunicação de pequeno alcance.	32
Figura 5 – Simulação de um teste de estresse cardíaco com base em um VLC. LEDs conectados as transmissores enviam dados ao receptor localizado na barra de apoio do equipamento.	32
Figura 6 – Um <i>hotspot</i> VLC, onde a luminária funciona como um transmissor e o dispositivo USB como um receptor do sinal.	33
Figura 7 – Rede VLC veicular, veículos se comunicam entre si e com a infraestrutura fixa na rodovia.	34
Figura 8 – Conexão entre prédios.	34
Figura 9 – FSO podem ser utilizados na comunicação aérea.	34
Figura 10 – Tipos de transmissão e recepção dos dados.	35
Figura 11 – Configuração da rede de comunicação ponto a ponto.	37
Figura 12 – Esquema simplificado da transmissão de dados.	38
Figura 13 – Codificação <i>On-Off Keying</i>	39
Figura 14 – Pacote de dados enviados.	39
Figura 15 – Junção p-n de um diodo.(RAZAVI, 2011)	40
Figura 16 – Sistema de transmissão com microcontrolador alimentando o LED de baixa potência.	42
Figura 17 – Sistema de transmissão com conversor digital analógico e circuito cha- veador de LED de alta potência.	43
Figura 18 – Luz provoca agitação das cargas livres no fotodiodo que geram a re- combinação de pares elétrons lacuna.	44
Figura 19 – Processo de reconstrução da mensagem original.	45
Figura 20 – Sistema de aquisição de dados ópticos.	46
Figura 21 – Receptor futuro.	47
Figura 22 – Montagem do <i>hardware</i> proposto, receptor a esquerda e transmissor a direita.	49
Figura 23 – Detecção dos dados a 100 Hz, sem erros.	51
Figura 24 – Dados apresentados na detecção a 400 Hz apresenta erros significativos. .	52
Figura 25 – Diagrama de dependências proposto para o Trabalho de Conclusão de Curso 2.	62
Figura 26 – Cronograma proposto para o Trabalho de Conclusão de Curso 2.	63

Lista de tabelas

Tabela 1 – Frequências utilizadas pelos dispositivos de comunicação RF <i>wireless</i> padrão (ENCYCLOPEDIA,)	28
Tabela 2 – Comparação entre transmissão via rádio e óptico (HRANILOVIC, 2009)	30
Tabela 3 – Características do fotodiodo utilizado. (SEMICONDUCTORS, 2014)	45

Lista de abreviaturas e siglas

A.C.	Antes de Cristo
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DC	Corrente Contínua
FSO	<i>Free Space Optics</i>
Hz	Hertz
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	Diodo emissor de luz
LD	Diodo Laser
m	Metros
Mbps	Mega bits por segundo
NASA	<i>The National Aeronautics and Space Administration</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>
RF	Rádio frequencia
Rx	Transmissor
s	Segundos
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
Tbps	Tera bits por segundo
TIA	Amplificador de Transimpedância

Tx	Receptor
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VLC	<i>Visual Light Communication</i>
VCCD	<i>Voltage Control Current Driver</i>
WBAN	<i>Wireless Body Area Networks</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>

Listas de símbolos

η Eficiência Quantica

λ Comprimento de onda

p Pico (10^{-12})

μ Micro (10^{-6})

m Mili (10^{-3})

M Mega (10^6)

G Giga (10^9)

W Watt

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Motivação	25
1.2	Objetivos	26
1.3	Estrutura do texto	26
2	HISTÓRICO	27
2.1	Meios de Comunicação sem Fio	28
2.1.1	VLC vs. Radiofrequência	29
2.1.2	Aplicações	31
2.1.2.1	Alcance Ultra Pequeno (<i>Ultra-Short Range</i>)	31
2.1.2.2	Pequeno Alcance (<i>Short Range</i>)	31
2.1.2.3	Médio Alcance (<i>Medium Range</i>)	33
2.1.2.4	Longo Alcance (<i>Long Range</i>)	33
2.1.2.5	Alcance Ultra Longo (<i>Ultra-Long Range</i>)	35
2.1.2.6	Sistema VLC <i>indoor</i>	35
3	DESIGN DO SISTEMA	37
3.1	Codificação do Canal	37
3.2	Codificação de Linha	38
3.3	Transmissor Óptico	39
3.3.1	Emissor de fóton	39
3.3.1.1	Diodos Emissores de Luz (LEDs)	40
3.3.2	Escolha do Dispositivo Óptico	41
3.3.3	<i>Driver</i> do LED	41
3.3.4	Mensagem	41
3.3.5	Teste do emissor	42
3.3.6	Futuros aprimoramentos do emissor	42
3.4	Receptor Óptico	43
3.4.1	Detector de fóton	43
3.4.1.1	p-n Fotodiodo	43
3.4.2	Processamento do sinal	45
3.4.2.1	Conversor de Corrente - Tensão	46
3.4.2.2	Decodificação	47
3.4.3	Futuros aprimoramentos do receptor	47
4	TESTES DO SISTEMA	49

4.1	Metodologia	49
4.2	Montagem	49
4.2.1	Transmissor	50
4.2.2	Receptor	50
4.2.3	Alinhamento e Área de cobertura	50
4.3	Resultados	51
 APÊNDICES		 53
APÊNDICE A – CÓDIGO DO TRANSMISSOR		55
APÊNDICE B – CÓDIGO DO RECEPTOR		59
APÊNDICE C – CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO TCC2		61
 REFERÊNCIAS		 65

1 Introdução

1.1 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 sofável entre estes dispositivos portáteis e 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 exagerada pelos humanos está 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 está em fase de desenvolvimento e apresenta possibilidades de aplicação em diversas áreas da engenharia, facilitando a comunicação em localidades em que o uso de RF é 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 distância de transmissão, podendo transmitir informações a distâncias da ordem de nanômetros dentro de circuitos integrados e até mesmo realizar a comunicação entre estações base e satélites.

Não obstante a tecnologia de 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](#))

1.2 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 dado a esse tipo de comunicação é VLC. Será 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 iluminar o ambiente e transmitir informações a um distância de curto e médio alcance, ordem de metros, utilizando a tecnologia óptica.

1.3 Estrutura do texto

Este trabalho encontra-se organizado em quatro capítulos. Cada capítulo é voltado a uma parte específica do trabalho, partindo da introdução ao tema, passando pelas referencias bibliográficos e conhecimentos prévios do sistema a ser montado, passando pela escolha de material e finalmente chegando ao teste do protótipo.

- Capítulo 1: Introdução ao sistema de comunicação óptico, composto pelas motivações e objetivos do trabalho.
- Capítulo 2: Apresenta o histórico e as possíveis aplicações da tecnologia óptica a ser desenvolvida.
- Capítulo 3: Tem como objetivo fornecer os dados necessários ao projeto de *hardware* físico tanto do transmissor como do receptor.
- Capítulo 4: É dedicada ao teste do sistema construído apresentando os dados teóricos obtidos.
- Apêndices: Esta seção inclui os códigos utilizados nos testes de transmissão e o cronograma proposto para a segunda parte do Trabalho de Conclusão de Curso.

2 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 já foi utilizada combinada com espelhos para enviar luz direcionada a um local específico, realizando sinalizações. Nos século XIX lâmpadas eram usadas para comunicação entre barcos e faróis para alertar as embarcações de perigos, condições das águas e até mesmo bancos de areia.

Apesar da luz ter sido utilizada desde a antiguidade para transmitir informações a longas distâncias, 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 afastadas.

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](#))

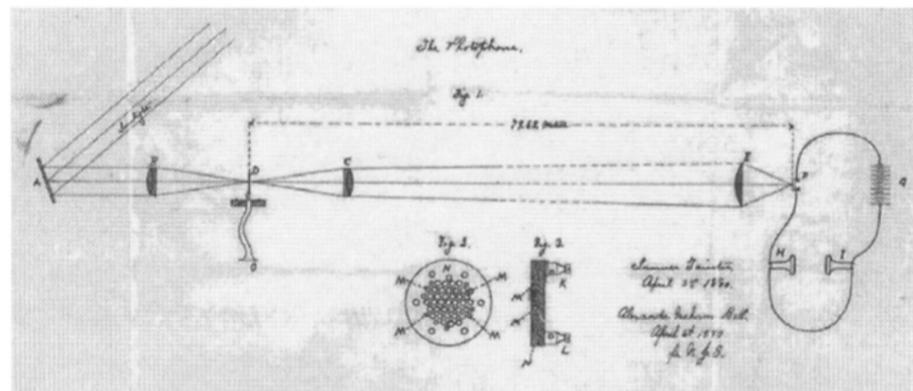


Figura 1 – Desenho do fotofone por Alexander Graham Bell e Charles Tainter ([HRANILOVIC, 2009](#))

A figura [2] apresenta o desenho do dispositivo feito pelos criadores. O sistema foi projetado para transmitir a voz do operador a distância pela modulação da 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 distância 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](#))

2.1 Meios de Comunicação sem Fio

Atualmente a maioria dos dispositivos wireless fazem o uso das faixas de frequência ISM. A banda ISM compõe parte do espectro de rádio que pode ser utilizada para basicamente qualquer propósito sem a necessidade de requerer licença na maioria dos países. 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 rádio frequência como fornos micro-ondas e máquinas 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 de uma das frequências mais utilizadas para na telecomunicação.

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

Tabela 1 – Frequências utilizadas pelos dispositivos de comunicação RF *wireless* padrão ([ENCYCLOPEDIA](#),)

Na tabela [1] são apresentadas os protocolos e dispositivos que usufruem da banda ISM. Estão presentes na lista dispositivos militares e industriais, e também dispositivos muito utilizados no nosso dia a dia como é 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 de comunicação ponto a ponto, a tecnologia bluetooth substitui conexões físicas de diversas maneiras, como por exemplo telefone celular e fones de ouvido além de monitores cardíacos e equipamento médico.([MCDERMOTT-WELLS, 2005](#)) Hoje a distância de cobertura pode alcançar os 50 metros com a tecnologia Bluetooth 4.0. ([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, dispositivos portadores desta tecnologia são utilizados em escritórios, escolas e laboratórios podendo conectar dois ou mais dispositivos dentro da área de cobertura.

Com o uso de tantos dispositivos sem fio a banda ISM se encontra congestionada. Em prédios residenciais e escritórios vários modems disputam por um dos canais de comunicação disponíveis, e quando não o encontram o resultado é a interferência dos sinais e impossibilidade da comunicação do *host* com o modem.

2.1.1 VLC vs. Radiofrequênciа

Como o número de usuários que utilizam comunicações por radiofrequência tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Isso 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 apresenta algumas 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 constatar 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 $380\text{ }\mu\text{m}$ aos $780\text{ }\mu\text{m}$ 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 do futuro, pois busca agregar em um só produto a economia de energia com o uso de lampadas LED, que são energeticamente eficientes, com o envio de dados em altas taxas de transmissão. Sem contar o fato de que o custo de investimento no design de um sistema VLC é muito menor quando comparado aos

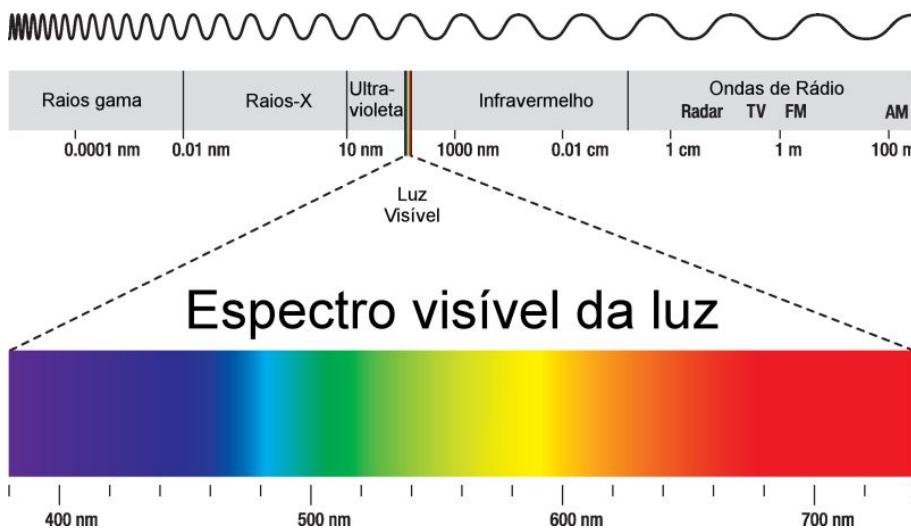


Figura 2 – Espectro de luz visível ao ser humano.

sistemas de RF.

É sabido que existe o problema de disponibilidade ao uso de faixas de ondas de RF. Visto que em certas situações não é recomendado utilizar ondas de rádio, como em voos e hospitais. Pois o mesmo pode gerar interferência em aparelhos de navegação e medicos. Nestes casos podemos usar o VLC onde é necessário que haja iluminação do ambiente e ainda a comunicação de aparelho sem que haja interferência com sistemas baseados em radiofrequênciia. Há também o fator de segurança, já que ondas de rádio atravessam paredes e podem ser detectadas em uma vasta área. O VLC transmite dados até onde a luz alcança, se o sistema de comunicação estiver confinado em uma sala, os arredores e salas vizinhas não terão qualquer informação sobre a rede VLC.

Propriedade	Óptico	Rádio
Custo	\$	\$\$
<i>Design</i> de circuito RF ?	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 ([HRANILOVIC, 2009](#))

Em suma a utilização da radiofrequênciia permite a comunicação *indoor* e conexões de pequena distância sem a necessidade de cabos. Contudo essa solução continua relativamente cara e permite apenas médias taxas de transmissão como mostrado na tabela [2]. As faixas de frequênciia utilizadas pelas conexões de RF são regulamentadas, e essas regulamentações variam de país para país, fazendo com que estabelecer um padrão seja difícil. Adicionalmente, a natureza das comunicações RF permitem conexão móvel, porém

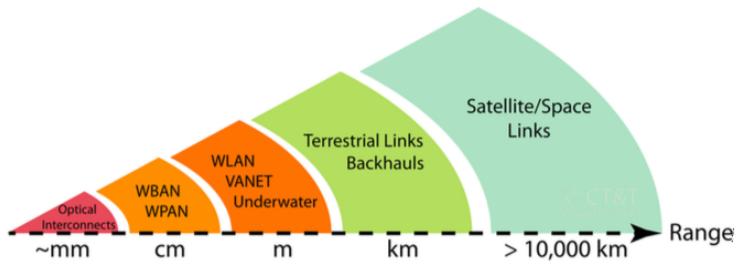


Figura 3 – Categorias de comunicação óptica baseado no alcance de transmissão.

cria problemas de interferência entre dispositivos próximos ao transmissor. A contenção de energia eletromagnética em frequência de rádio ainda é difícil, e se esta contenção for feita de maneira inapropriada pode impedir a performance do sistema.

2.1.2 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 dezenas de quilômetros como mostrado na figura [3].

2.1.2.1 Alcance Ultra Pequeno (*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 o que pode reduzir a complexidade das vias de cobre e aumentar 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*, utilizado para comunicar circuitos figura [4] ou fazer comunicação dentro de um mesmo *chip*. Com o uso deste meio de transmissão rápida, conexões baseadas em 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. Arquiteturas guiadas promovem um *link* direto de luz entre o transmissor e o receptor, confinando a luz em uma guia de onda. Enquanto nos sistemas não guiados o feixe de luz é exposto ao ambiente, o que pode causar ruídos e interferências na comunicação.(KACHRIS et al., 2013)

2.1.2.2 Pequeno Alcance (*Short Range*)

Sistemas de curto alcance operam na ordem de centímetros e em geral menos que um metro. Este tipo de comunicação pode ser comparada com o Bluetooth, pois atua

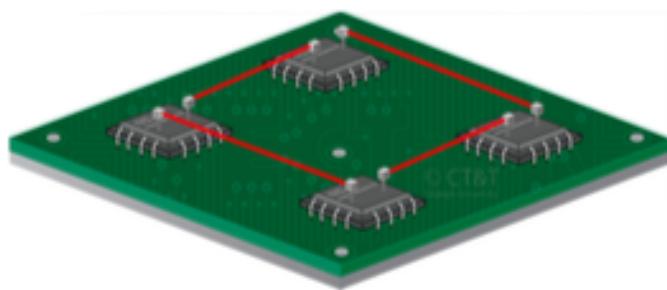


Figura 4 – Ilustração de um sistema de comunicação de pequeno alcance.

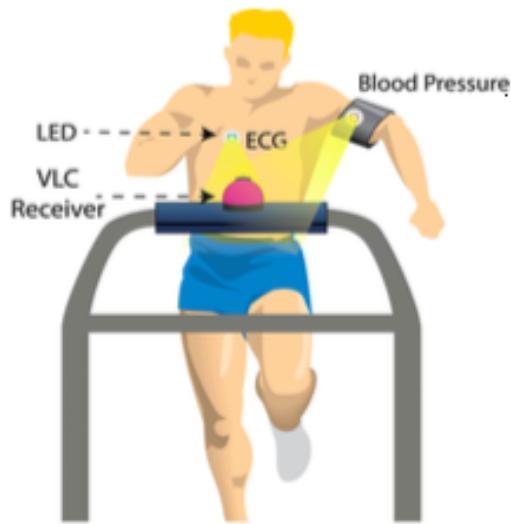


Figura 5 – Simulação de um teste de estresse cardíaco com base em um VLC. LEDs conectados as transmissores enviam dados ao receptor localizado na barra de apoio do equipamento.

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 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. Centros de saúde podem eliminar todos os fios que são conectados ao paciente com o uso da tecnologia de comunicação sem fio em aparelhos como medidores de pressão arterial, sensores de glicose, frequência cardíaca entre outros sensores de aquisição de dados figura[5].

Pesquisas recentes nesta área incluem aplicações que utilizam a câmera de celulares para recepção de dados, onde o sensor integrado, que é um sensor de imagem, é utilizado como detector óptico para a comunicação. O que permite vários tipos de transferência de dados, como exemplo entre celulares, entre celular e televisão, celular e máquinas de



Figura 6 – Um *hotspot* VLC, onde a luminária funciona como um transmissor e o dispositivo USB como um receptor do sinal.

auto-atendimento dentre outros.([DANAKIS et al., 2012](#))

2.1.2.3 Médio Alcance (*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 vindoura nessa área é muito promissora devido aos benefícios que esse tipo de comunicação oferece. Como exemplo longa vida de duração, visto a vida útil de um LED, alta tolerância a umidade, baixo consumo de energia devido ao grande avanço na tecnologia de fabricação dos diodos emissores de luz. As novas gerações de LEDs devem substituir lâmpadas incandescentes e fluorescentes gradativamente devido a sua capacidade de iluminação com baixo consumo de energia. A tecnologia VLC conta com a onipresença de infraestrutura de iluminação baseadas em LED para o seu sucesso.

A figura [6] apresenta um sistema fixo de VLC. A luminária de mesa funciona como um modem Tx e o dispositivo USB como um receptor.

Além de aplicações *indoor*, LEDs estão sendo vastamente utilizados em áreas abertas, para sinalização de tráfego, faróis e lanternas veiculares. Isso favorece a implementação de comunicação entre veículos, assim como automóveis e infraestrutura fixa de comunicação. ([YU et al., 2013](#))

Veículos que possuem LEDs em faróis e lanterna podem se comunicar com os carros próximos a ele, e com a infraestrutura, fixa nas rodovias como apresentado na figura [7].

2.1.2.4 Longo Alcance (*Long Range*)

Sistemas de longo alcance operam na ordem dos quilômetros, porém não mais do que 10 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 representa o não confinamento do luz utilizada na comunicação.

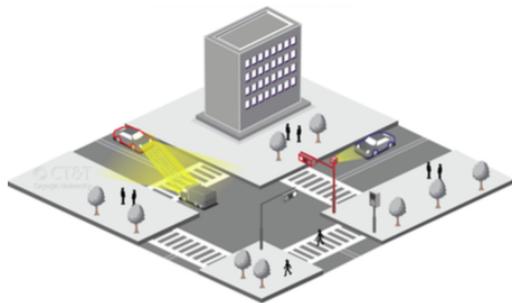


Figura 7 – Rede VLC veicular, veículos se comunicam entre si e com a infraestrutura fixa na rodovia.

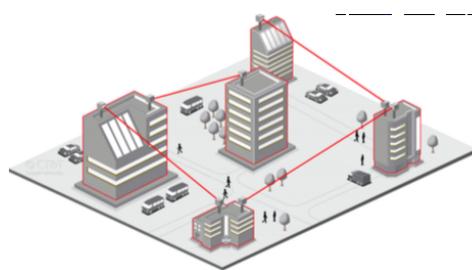


Figura 8 – Conexão entre prédios.

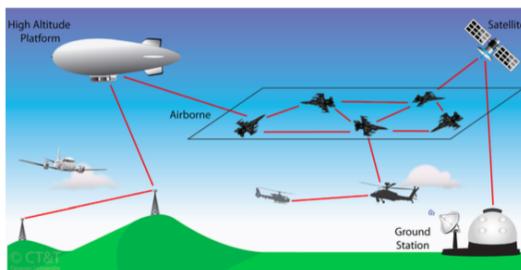


Figura 9 – FSO podem ser utilizados na comunicação aérea.

Em comparação com o RF, uma conexão óptica FSO, possui maior largura de banda, pode chegar a taxas de transferência de dados de até Tbps. (PARCA et al., 2008) Sistemas FSO tem chamado a atenção como uma solução eficiente de conexão entre o usuário final e a infraestrutura de fibra óptica dos provedores de internet.

A comunicação sem fio óptica de longo alcance também tem sido 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 que haja uma comunicação eficiente devem ser adicionadas ao sistemas dispositivos de rastreamento para localizar o destinatário desejado com o uso de algoritmos de posicionamento. (GERKEN; TAUSENDFREUND, 2012)

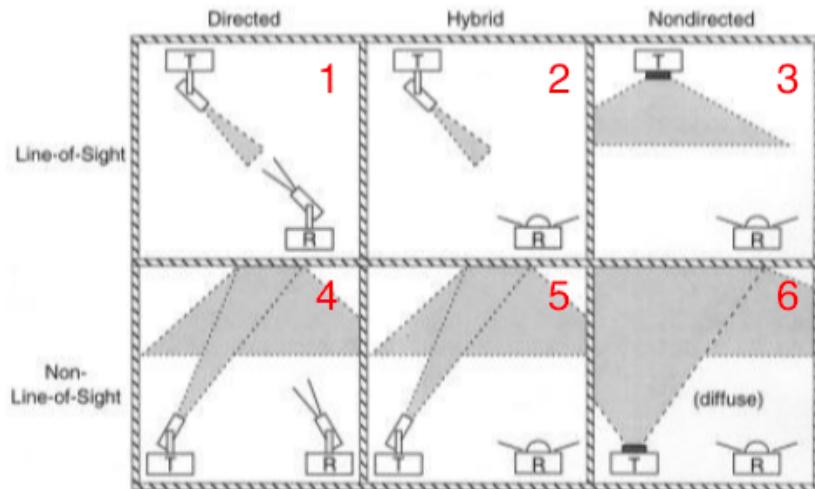


Figura 10 – Tipos de transmissão e recepção dos dados.

2.1.2.5 Alcance Ultra Longo (*Ultra-Long Range*)

O sistema de comunicação de alcance ultra longo, OWC, faz o maior salto dentre as diferentes classificações de alcance. Esses sistemas são projetados para comunicar entre uma estação base e um satélite, de satélite para satélite ou até mesmo de planeta a planeta! O FSO nesta classificação trabalha com distâncias na ordem das dezenas de milhares de quilômetros. Em outubro de 2013, a agência espacial Norte Americana NASA com seu *Lunar Laser Communication* alcançou a taxa de transmissão de 622 Mbps entre a Terra e a Lua. Ou seja atingimos a faixa de mega bits por segundo de transferencia a distância de 384 600 quilômetros entre o transmissor e o receptor. (SN, 2014)

2.1.2.6 Sistema VLC *indoor*

Até o final dos anos 90, a maioria da comunicação óptica sem fio era feita através da comunicação no espaço livre (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 como mostrado na figura[2]. O maior benefício desse sistema é que estaremos resolvendo dois problemas em um, o primeiro é claro transmitir informação a uma alta taxa de transferência, e o segundo problema que será resolvido é a iluminação do ambiente da área de cobertura do ponto de acesso. 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. (WON; SHIN; JUNG., 2008)

Existem diversas maneiras de implementar um VLC fisicamente, os principais tipos são listados abaixo com diferentes combinações para cada categoria. As transmissões

podem ocorrer na linha de visão (*Line-of-Sight*), como são os exemplos 1, 2 e 3 da figura [10]. Este tipo de comunicação não conta com a reflexão do sinal em objetos ou obstáculos, cortando o *link* assim que algo interrompe a linha de comunicação direta.

Já as transmissões que contam com a reflexão do sinal para alcançar o receptor são chamados de fora da linha visão (*Non-Line-of-Sight*) e mostrados nos quadros 4, 5 e 6 da figura [10]. Tal tipo de configuração confere maior robustez ao sistema pelo fato de garantir a transmissão independente de obstáculos. Permitir que o link continue a operar mesmo com barreiras como pessoas ou móveis presente entre o transmissor e o receptor. Isto torna o uso do sistema mais fácil.

Em um sistema direcional, exemplificado nos quadros 1 e 4 da figura[10]. Neste tipo de sistema o receptor Rx tem ângulo de recepção estreito, forçando que emissor e fotodetector tenham algum nível de alinhamento 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 isso não significa que o dispositivo será capaz de iluminar o ambiente por completo. Em comparação os sistemas de não direcionais, eles tem ângulo de transmissão e recepção abertos, muito parecido com os LEDs comuns de prateleira. (GHASSEMLOOY, 2003)

3 Design do Sistema

A rede de transmissão de dados terá a arquitetura apresentada na figura [11], sendo capaz de transmitir dados unidirecionalmente de um ponto a outro. O canal de comunicação é o meio aéreo.

O diagrama de blocos mais detalhado do mecanismo de transmissão é apresentado na figura [12]. O primeiro bloco representa a mensagem a ser transmitida. De posse da mensagem, temos que codificá-la de modo que a possa ser transmitida pelo canal de comunicação aéreo. Temos diversas maneiras de adquirir e armazenar a mensagem, e a mesma pode se encontrar em diversos formatos como binário, áudio, vídeo dentre outros.

Atualmente possuímos múltiplos meios de entrada em um sistema, porém iremos reduzir os nossos testes a três métodos de entrada, começando por informações pré-programadas dentro do microcontrolador, passando por entradas de usuário via teclado e finalmente será testado o envio de aquivos entre os dois pontos de comunicação.

O transmissor estará exposto ao ambiente interno, uma sala por exemplo. O ar será o canal de transmissão por onde a luz deverá viajar.

O receptor é composto pelo elemento de detecção de luz, que transformará os fótons em sinais elétricos. Estes sinais, por vez, devem ser decodificados em código binário que possibilita a reconstrução da mensagem original.

3.1 Codificação do Canal

O canal de comunicação, ar, no entanto é o responsável pela introdução de ruído, interferências e por corromper a mensagem. E esses erros podem ser devido a diferentes fatores como por exemplo obstáculos, luz externa e outras fontes de interferência. Desta maneira podem ocorrer uma série de discrepâncias nos bits recebidos com relação aos bits enviados. Uma das maneiras de garantir a integridade do sinal transmitido é o

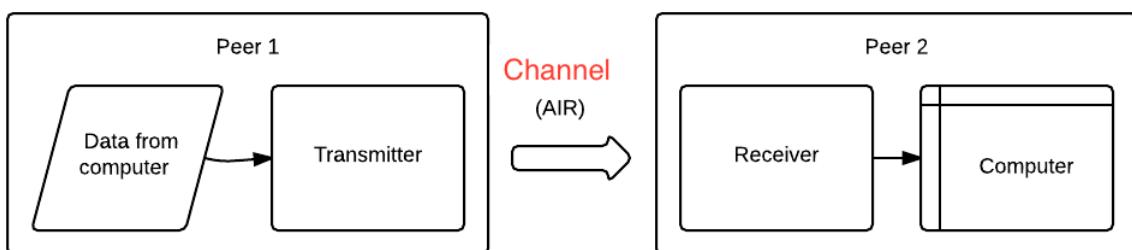


Figura 11 – Configuração da rede de comunicação ponto a ponto.

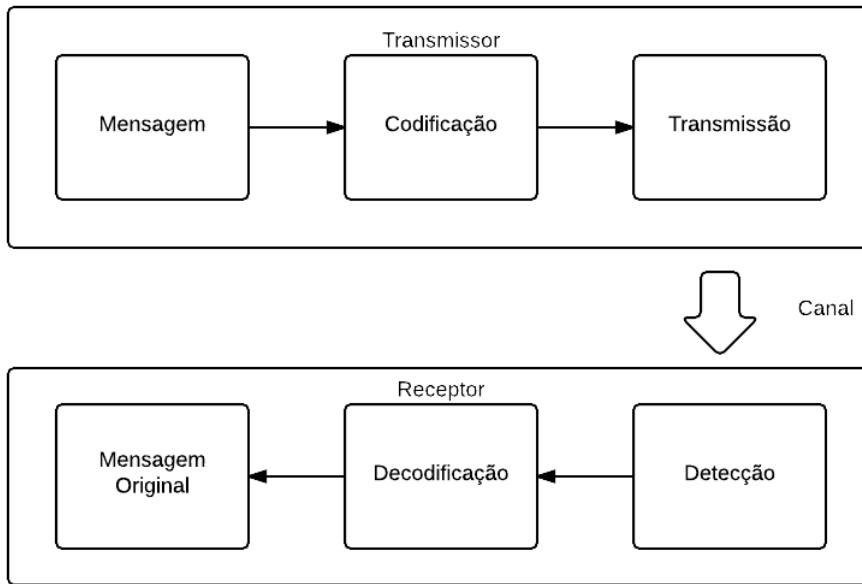


Figura 12 – Esquema simplificado da transmissão de dados.

uso de 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 inicio ou ao final da mensagem de forma a obter um numero par de bits ‘1s’ na mesma, já na paridade ímpar, o bit é adicionado para se obter um numero ímpar de bits ‘1s’.

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 mais seguro.

3.2 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 [13].

Por fim a mensagem enviada terá o formato do pacote figura[14].

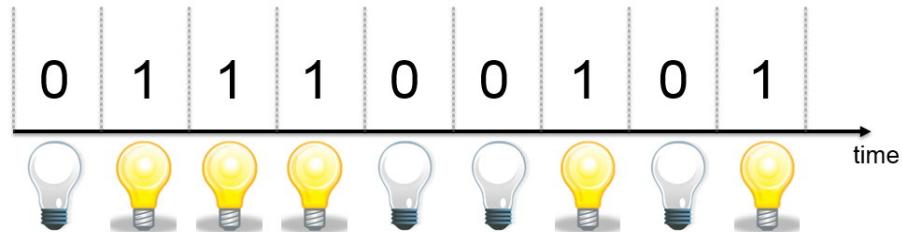
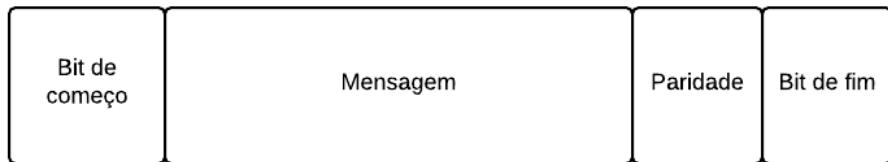
Figura 13 – Codificação *On-Off Keying*.

Figura 14 – Pacote de dados enviados.

3.3 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. 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 necessário 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 figura [14].

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 dos erros (BER).

3.3.1 Emissor de fóton

A escolha do emissor de fótons influênciaria em todo o projeto do transmissor, e a correta seleção do elemento emissor de luz é imprescindível para o sucesso do 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). É importante ressaltar que os lasers não podem ser utilizados para a finalidade de iluminação devido ao risco aos olhos. Fora detalhes que impedem que esta tecnologia seja utilizada na iluminação de ambientes como o fato de sua luz ser monocromática e seu feixe de luz ser estreito, não

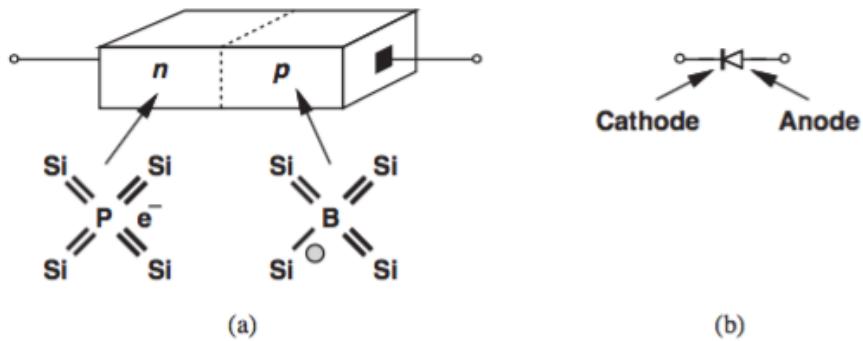


Figura 15 – Junção p-n de um diodo.(RAZAVI, 2011)

se qualificando para uso em VLCs.

3.3.1.1 Diodos Emissores de Luz (LEDs)

Os diodos emissores de luz ou mais popularmente LEDs são fontes ópticas formados por uma junção p-n. O semicondutor *p* tem falta de cargas negativas, que podem ser chamados de lacunas e o semicondutor *n* excesso de cargas negativas na forma de elétrons figura[15]. (RAZAVI, 2011)

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 material semicondutor utilizado. Essa característica de comprimento de onda está relacionado com o *gap* de energia do material semicondutor. 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.

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

LEDs possuem algumas características importantes como o comprimento de onda do fótons emitidos, ou seja a cor da luz emitida, é determinada pela banda de valência do semicondutor. 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 (FRIEDMAN; EDWARD; MILLER, 2004), o que significa que os LEDs podem alcançar frequências de chaveamento de até centenas de MHz.

3.3.2 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 ambientes. O que pode ser atingido com o uso dos dispositivos baseados na tecnologia LED. Visto que o 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:

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

3.3.3 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 com resistor em série para limitar a amperagem. A título de teste e prova de conceito do sistema de comunicação VLC, o circuito foi montado figura [16] para alimentar o diodo. Como o LED utilizado é de baixa potência, a corrente e tensão fornecidas pelo microcontrolador são suficientes para o correto funcionamento do emissor de luz.

3.3.4 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 [16], o primeiro se utiliza de uma mensagem pré compilada no microcontrolador, sem a necessidade de outros periféricos. Esta abordagem é muito útil para fins de teste, pois o usuário não pode intervir em nenhuma parte do processo, isolando fontes de erros. A segunda fase de testes contou com a aquisição de dados via computador, os quais podem ser tanto via a

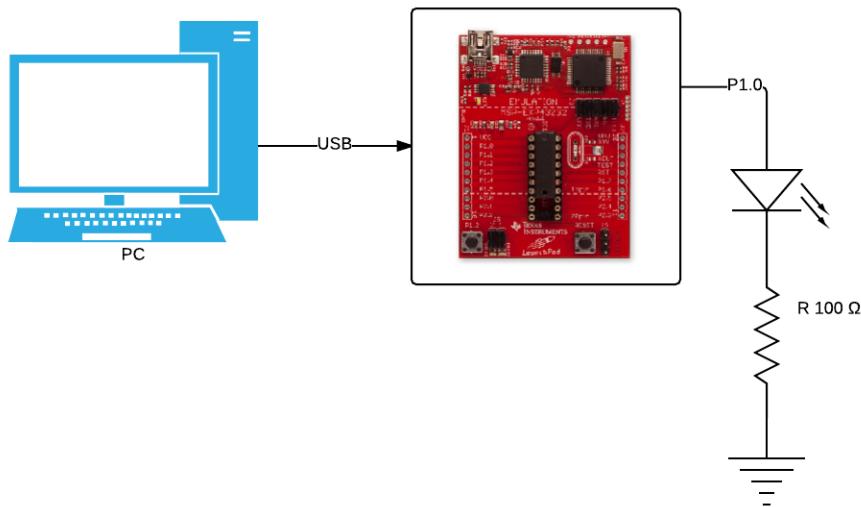


Figura 16 – Sistema de transmissão com microcontrolador alimentando o LED de baixa potência.

entrada padrão de teclado e até mesmo arquivos de qualquer tipo, 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 [14]. Para o teste foram utilizados dois controladores diferentes o Texas MSP430 e o Arduino ATmega 328, ambos com clock de 16 MHz.

3.3.5 Teste do emissor

A figura[16] 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 enviado ao circuito responsável por acionar o LED.

3.3.6 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 chegar a um LED de maior potência é necessário o *design* de um novo circuito de alimentação capaz de comutar rapidamente e fornecer níveis de corrente apropriados.

Tendo em vista a melhora da transmissão, e possibilidade de utilizar modulações avançadas a inclusão de um conversor DAC é indispensável, resultando em um novo

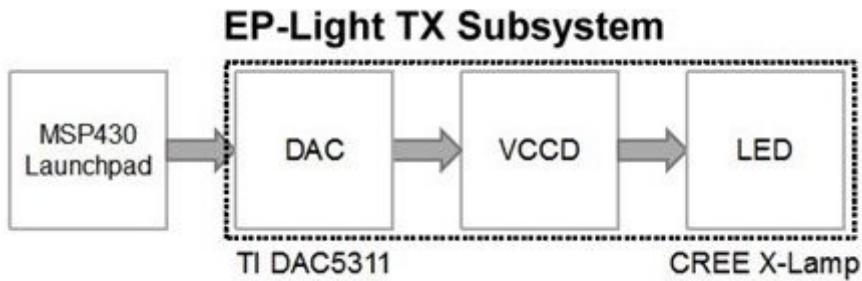


Figura 17 – Sistema de transmissão com conversor digital analógico e circuito chaveador de LED de alta potência.

diagrama de transmissão apresentado na figura [17].

O sinal convertido pelo DAC estimulará o driver VCCD, que é uma fonte de corrente controlada por tensão, responsável por ligar e desligar o diodo LED.

3.4 Receptor Óptico

O sistema de recepção 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, e hardware capaz de transformar os sinais elétricos captados em informação útil e que possa ser compreendida pelo usuário do sistema.

Assim como no transmissor, o componente óptico determina todo o sistema de recepção, neste caso o detector de fótons. Para a finalidade de transmissão de dados este componente óptico deve atender a alguns requisitos a serem explicados na próxima subseção.

3.4.1 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 estímulos 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 a escolha do detector, seguido pela sensibilidade a luz emitida.

3.4.1.1 p-n Fotodiodo

Fotodiodos convertem luz em corrente elétrica. A incidência de luz, em um semicondutor produz agitação térmica que liberam pares de elétrons e buracos em vários pontos no diodo, como ilustrado na figura [18]. Esses postadores se direcionam rumo a

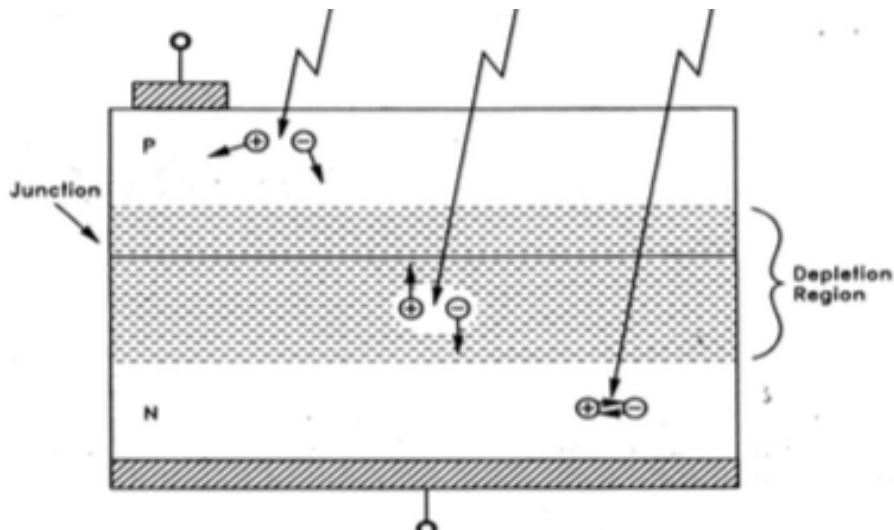


Figura 18 – Luz provoca agitação das cargas livres no fotodiode que geram a recombinação de pares elétrons lacuna.

extremos opostos do dispositivo sob a influência do campo aplicado. Em resumos quando a luz incide no fotodiode, uma corrente é gerada do cátodo para o ânodo. (RAZAVI, 2011)

Estes dispositivos, assim como os diodos, consistem de duas camadas de semicondutores uma do tipo ‘n’ e outra ‘p’. Fotodiodos apresentam na camada do tipo ‘p’ excesso de lacunas e na camada do tipo ‘n’ excesso de elétrons figura [15]. Na região de junção dos dois substratos é criada uma região de depleção. Nesta região elétrons e lacunas se recombinação para equalizar o número 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 lacunas 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’ . (ALEXANDER; B., 1997)

Quando a luz passa através um diodo, esse fóton pode excitar um elétron, criando um par de elétron e uma lacuna. Se isto ocorrer perto da zona de depleção, o campo elétrico irá guiar lacunas em direção ao ânodo, 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 photocorrente.(SCHERZ; PAUL, 2007)

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 de acordo com a equação [3.1]. Uma região de depleção maior implica em redução da capacidade da junção, porém também aumenta o tempo que pares de elétrons e lacunas levam para atravessar a zona de depleção, reduzindo a largura de banda. (ALEXANDER; B, 1997)

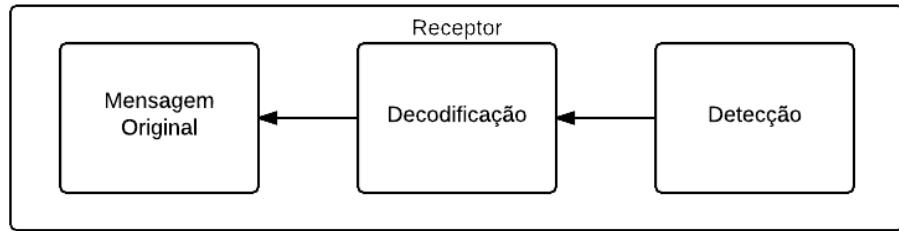


Figura 19 – Processo de reconstrução da mensagem original.

$$\eta = \frac{\text{número de portadores produzidos}}{\text{número de fótons incidentes}} \quad (3.1)$$

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 possuem incrível linearidade, e tempo de subida (*rise time*) de até $10\ \mu\text{s}$, são relativamente imunes a ruído e possuem baixo custo. (OPTOELECTRONICS, 1997)

Propriedades fotodiodo	Valores
λ máx. sensibilidade	850 nm
Sensibilidade	400 - 1100 nm
Meio ângulo φ	$\pm 10^\circ$
Tempo de subida e descida	$0,005\ \mu\text{s}$

Tabela 3 – Características do fotodiodo utilizado. (SEMICONDUCTORS, 2014)

O fotodiodo apresentado na tabela [3] se encaixa perfeitamente nos quesitos exigidos por um receptor. Tem sensibilidade que cobre a faixa de espectro visível pelo ser humano 400 - 700 nm , baixo tempo de subida, porém estreito ângulo de detecção. O tempo de subida apresentado viabiliza uma taxa de comunicação teórica na faixa das centenas de Mbps.

3.4.2 Processamento do sinal

O objetivo do receptor óptico é recuperar a mensagem original que foi enviada, e para isso temos que percorrer o caminho inverso do sistema de transmissão. Sabendo como o componente de detecção de luz funciona, podemos projetar o *hardware* eletrônico responsável por condicionar o sinal recebido pelo detector óptico. A figura [19] mostra os principais blocos utilizados no receptor.

O primeiro passo é detectar o sinal com o fotodiodo. Este dispositivo excita corrente entre os seus terminais, porém os controladores não são capazes de ler níveis de corrente, então por este motivo teremos um conversor corrente-tensão que irá converter a amperagem em níveis de tensão que podem ser lidos pelo processador. Por fim os sinais

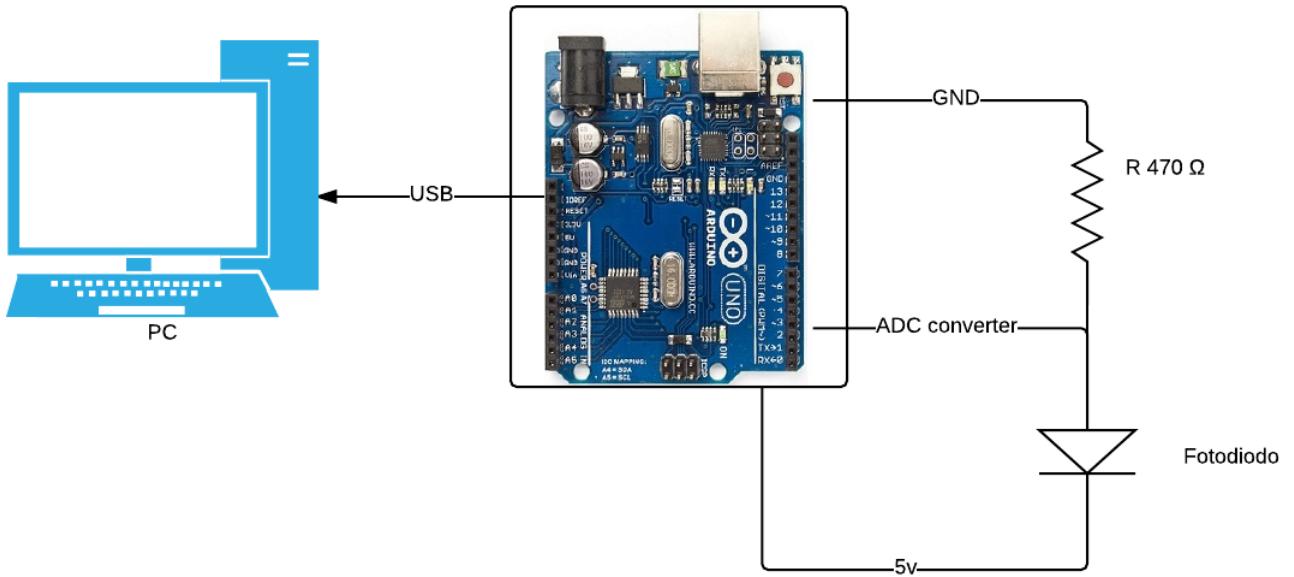


Figura 20 – Sistema de aquisição de dados ópticos.

sem muito significado inicialmente podem ser decodificados, o processo de decodificação consiste em extrair o bit de começo e final da mensagem e comparar a paridade do pacote em busca de erros. Se for verificado que não possuem erros na mensagem recebida a mensagem reconstruída deve apresentar o mesmo conteúdo do pacote enviado.

3.4.2.1 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.

Para o propósito de validação de conceito será montado um *hardware* sem muita complexidade, porém completamente funcional e que seja capaz de simular a comunicação utilizando a tecnologia emergente VLC.

O circuito da figura[20] foi utilizado nos testes. Quando a luz incide no diodo, uma corrente passa pelo resistor, e seguindo a lei de Ohm equação [3.2], esta corrente que atravessa o resistor será inversamente proporcional a tensão entre os seus terminais.

$$Voltagem [V] = \frac{Resist\acute{e}ncia [\Omega]}{Corrente [A]} \quad (3.2)$$

Temos então um circuito capaz de transformar corrente em sinais de tensão.

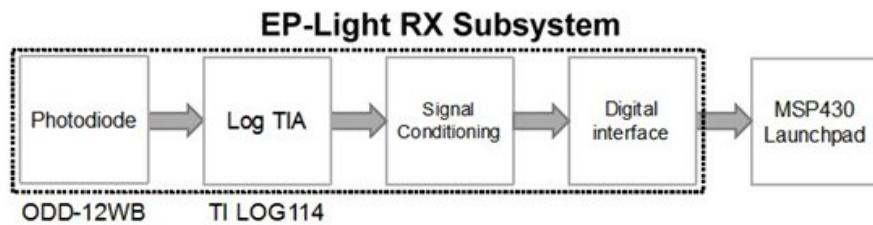


Figura 21 – Receptor futuro.

3.4.2.2 Decodificação

A etapa final é a conversão do sinal de tensão em informação útil ao usuário do sistema. Para realizar tal tarefa foi utilizado um conversor analógico digital de 10 bits para, presente no microcontrolador ATmega 328. Este ADC converte os níveis de tensão de entrada, de 0 a 5 volts, em 1024 faixas.

O sinal de entrada pode possuir 1023 diferentes níveis lógicos, porém a informação que queremos somente dois níveis, chamada informação binária. Com o objetivo de converter a entrada analógica de vários níveis em binário devemos estabelecer um nível de *threshold*. O *threshold* funcionará como um parâmetro 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’.

Ao utilizar um limiar para definir se o bit de entrada é um nível alto, ou um nível baixo conferimos maior robustez às falhas visto que mesmo com variações mínimas da luminosidade do sinal de entrada o bit ainda será reconhecido como zero ou um.

A pacote binário pode então ser processado pelo controlador e enviar ao computador via cabo USB.

3.4.3 Futuros aprimoramentos do receptor

São necessárias diversas melhorias no sistema de recepção de sinal óptico. O primeiro é a implementação de um sensor óptico com ângulo de detecção mais aberto o que não requer o perfeito alinhamento do receptor e transmissor. Da mesma maneira que foi utilizado um artifício elétrico para realizar a leitura da corrente gerada pelo fotodiodo, tem-se como objetivo implementar um TIA (*Transimpedance Amplifier*) que converte corrente em tensão, seguido pelo condicionamento da tensão do sinal de entrada e binarização da mensagem, como apresentado na figura[21].

Futuras melhorias serão realizadas a nível de hardware e software para conferir maior robustez ao sistema Rx e Tx.

4 Testes do Sistema

4.1 Metodologia

Os testes foram realizados seguindo as seguintes especificações:

- Sensores ópticos alinhados;
- Canal de comunicação aéreo;
- Distância de 7.5 cm entre os sensores;
- Ambiente fechado *Indoor*;
- Iluminação ambiente;
- Taxa de transmissão de 100 a 500 Hz.

4.2 Montagem

A montagem seguiu as especificações feitas nas seções anteriores, e é apresentado na figura[22]. Foi utilizado um artefato plástico rígido para manter o Tx e Rx alinhados.

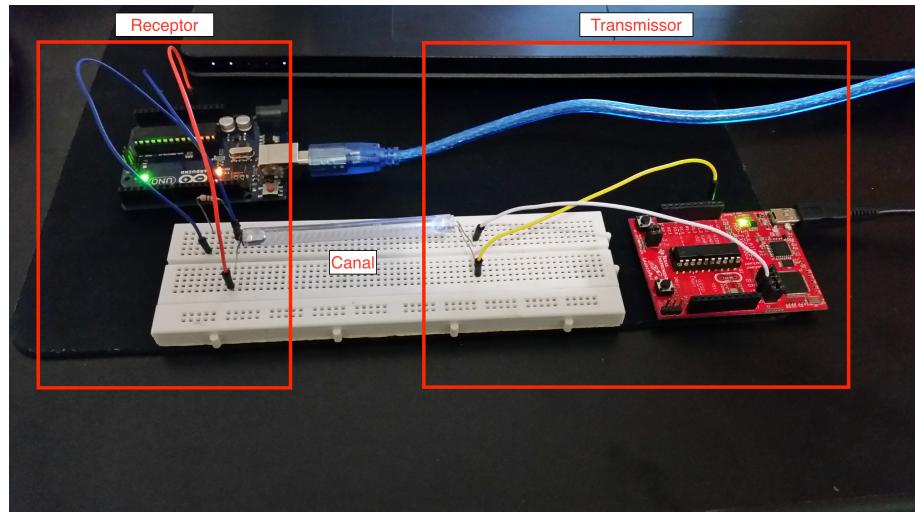


Figura 22 – Montagem do *hardware* proposto, receptor a esquerda e transmissor a direita.

4.2.1 Transmissor

O sistema de transmissão foi testado a priori visualmente, reduzindo a frequência de envio e comparando com a mensagem. Com a certeza de que a mensagem transmitida está correta, a taxa de transmissão foi expandida para ser testada juntamente ao receptor.

O resistor conectado em série com o diodo LED, foi dimensionado para que o mesmo emita alto brilho sem que o dispositivo queime com o excesso de corrente. Testes mais profundos foram realizados em conjunto com o receptor de dados.

4.2.2 Receptor

Foram realizados testes do receptor direcionado e alinhado com a fonte de fótons. Este experimento se deu em ambiente fechado e com iluminação ambiente e distância de 7,5 cm. Para excitar o componente óptico foi utilizada a fonte de luz apresentada na figura[22].

$$\frac{\text{Resolução ADC}}{\text{Voltagem do Sistema}} = \frac{\text{Leitura ADC}}{\text{Voltagem Medida}} \quad (4.1)$$

O controlador em uso no receptor trabalha com tensões de até 5v, e seu conversor AD possui 10 bits de resolução, o que significa que podemos dividir a voltagem do sistema em 1024 partes. As leituras realizadas com o LED transmissor ligado ficaram estáveis na faixa dos 875, o que implica que o controlador lê 4,28 v na entrada analógica equação[4.1]. Já com o LED Tx desligado as leituras ficaram nulas, implicando que a luz ambiente não excita tensão na entrada analógica do sistema.

Podemos tomar duas conclusões deste experimento a primeira é que estabelecemos um nível de *threshold* que define se a leitura é de um bit de nível alto ou de um bit de nível baixo, e a segunda conclusão é que o sensor mostrou eficiência na detecção de sinais altos e baixos, apresentando grande diferença entre eles, o que reduz o risco de troca de bits 1 por bits 0.

4.2.3 Alinhamento e Área de cobertura

O alinhamento do sistema é uma parte crucial na transmissão de dados. Visto que o receptor possui estreito ângulo com boa sensibilidade em torno de 10°. No limite destes 10° a potência que o receptor recebe representa 50% do sinal em comparação ao recebido utilizando o alinhamento axial. O fato reflete que um conjunto desalinhado torna impossível que haja comunicação entre os sistemas. Para a solucionar o problema, temos algumas alternativas, como adição de refletores e a aquisição de sensores específicos a comunicação não direcional.



Figura 23 – Detecção dos dados a 100 Hz, sem erros.

Já a área de cobertura, pode ser expandida significativamente com o uso de LED de alta potência presentes no mercado. Contudo os benefícios tem um custo, e sua viabilidade deve ser analisada.

4.3 Resultados

O sistema de comunicação VLC funcionou com sucesso, apresentando taxas de erro baixa para frequências menores que 400 Hz apresentado na figura [23]. Para frequências acima de 400 Hz há erros consideráveis como apresentado na figura [24]. A taxa de erro da transmissão aumenta exponencialmente entre os valores maiores que 300 Hz. Fato que pode ser atribuído a limitações de hardware tanto para excitar o led devidamente quanto para detectar o sinal óptico.

As propostas de implementação de *hardware* futuros visam sanar tais limitações e ainda abrir a possibilidade de ampliar a taxa de envio de dados.

Apesar do sistema proposto ser apenas para prova de conceito, e não a versão final, esta tecnologia mostra muito potencial na área de telecomunicações pelo fato de possuir várias áreas de aplicação, além de um grande salto nas taxas de transmissão.

Figura 24 – Dados apresentados na detecção a 400 Hz apresenta erros significativos.

Apêndices

APÊNDICE A – Código do Transmissor

O código do transmissor de dados é apresentado na citação [A.1]. Este código foi desenvolvido para o microcontrolador MSP430. Foi utilizado um clock de 1 MHz. O qual foi dividido para fornecer 100 Hz para sincronizar o transmissor e receptor. A mensagem a ser transmitida está contida dentro do código.

```

1
3 #include <msp430.h>
4 #include <stdint.h>
5 #include <stddef.h>
6
7 /* LED blinking frequency */
8 #define LED_BLINK_FREQ_HZ    500
9 /* Number of cycles to delay based on 1MHz MCLK */
10 #define LED_DELAY_CYCLES     (1000000 / (2*LED_BLINK_FREQ_HZ))
11
12 static int _verify_cal_data(void);
13
14 int main(int argc, char *argv[])
15 {
16     /* Hold the watchdog */
17     WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD;
18
19     if (_verify_cal_data() != 0) {
20         /* Calibration data is corrupted...hang */
21         while(1);
22     }
23
24     /* Configure the clock module - MCLK = 1MHz */
25     DCOCTL = 0;
26     BCSCTL1 = CALBC1_1MHZ;
27     DCOCTL = CALDCO_1MHZ;
28
29     /* Configure P1.0 as digital output */
30     P1SEL |= ~0x01;
31     P1DIR |= 0x01;
32
33     /* Set P1.0 output high */
34     P1OUT |= 0x01;
35
36     /* Configure P1.3 to digital input */
37     P1SEL |= ~0x08;

```

```

P1DIR &= ~0x08;

/* Pull-up required for rev 1.5 Launchpad */
P1REN |= 0x08;
P1OUT |= 0x08;

/* Wait forever until the button is pressed */

int b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9, b10, start, stop, count = 0;
unsigned int tx = 0b0110101001; /* Message */

/* Passing the bits */
b1 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 9) & BIT0;
b2 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 8) & BIT0;
b3 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 7) & BIT0;
b4 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 6) & BIT0;
b5 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 5) & BIT0;
b6 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 4) & BIT0;
b7 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 3) & BIT0;
b8 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 2) & BIT0;
b9 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 1) & BIT0;
b10 = (P1OUT & (~BIT0)) + (tx >> 0) & BIT0;
/* Start and stop bits */
start = P1OUT&(~BIT0);
stop = P1OUT|BIT0;

while (1)
{
    /* Sending data */
    if ((P1IN & 0x08) == 0)
    {
        P1OUT = start; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b1; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b2; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b3; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b4; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b5; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b6; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b7; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b8; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b9; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = b10; __delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
        P1OUT = stop;
    }
    while (count != 100)

```

```
85     {
86         ___delay_cycles(LED_DELAY_CYCLES);
87         count++;
88     }
89     count = 0;
90 }
91
92 static int _verify_cal_data(void)
93 {
94     size_t len = 62 / 2;
95     uint16_t *data = (uint16_t *) 0x10c2;
96     uint16_t crc = 0;
97
98     while (len-- > 0) {
99         crc ^= *(data++);
100    }
101
102    return (TLV_CHECKSUM + crc);
103}
104 }
```

Listing A.1 – Código do transmissor MSP430.

APÊNDICE B – Código Do Receptor

Este código foi projetado para rodar no microcontrolador Atmega 328, e está configurado para receber pacote de mensagens de 12bits. O controlador colhe um novo bit a cada 5 ms como apresentado no código [B.1].

```

1  /* Variables */
2  int data = 0;
3  int count = 0;
4  int p_diode = A0;
5  int threshold = 700;
6  int freq = 500;
7  int delay_freq = (500/freq)*1000;

8  String recebido;

11 void setup() {
12     /*Set the serial output */
13     Serial.begin(9600);
14 }

15 void loop() {
16     /* Read data from ADC */
17     data = analogRead(p_diode);
18     // Serial.println(data);

21     /*Begin of the stream */
22     if (data < threshold)
23     {
24         /*Wait for all the 11 remaining bits */
25         while (count < 11)
26         {
27             /* 5 miliseconds delay (100Hz) */
28             delayMicroseconds(delay_freq);
29             data = analogRead(p_diode);
30             if (data > threshold)
31                 recebido += '1';

33             if (data < threshold)
34                 recebido += '0';
35
36             count++;
37     }
38     /* Print data */
39     Serial.println(recebido);

```

```
41     recebido = " ";
41     count = 0;
41 }
43 }
```

Listing B.1 – Código do Receptor Arduino.

APÊNDICE C – Cronograma de execução Tcc2

Os cronogramas apresentados abaixo nas figuras [25 e 26] explicita o trabalho a ser desenvolvido no TCC 2. A segunda versão deste trabalho terá como foco um melhor desenvolvimento de *hardware* que possibilite maiores taxas de transmissão assim como maior área de cobertura da rede. Por este motivo busca-se aprimorar os *hardwares* de detecção e transmissão. E como resultado o *software* de suporte deverá ser adaptado as novas configurações do sistema.

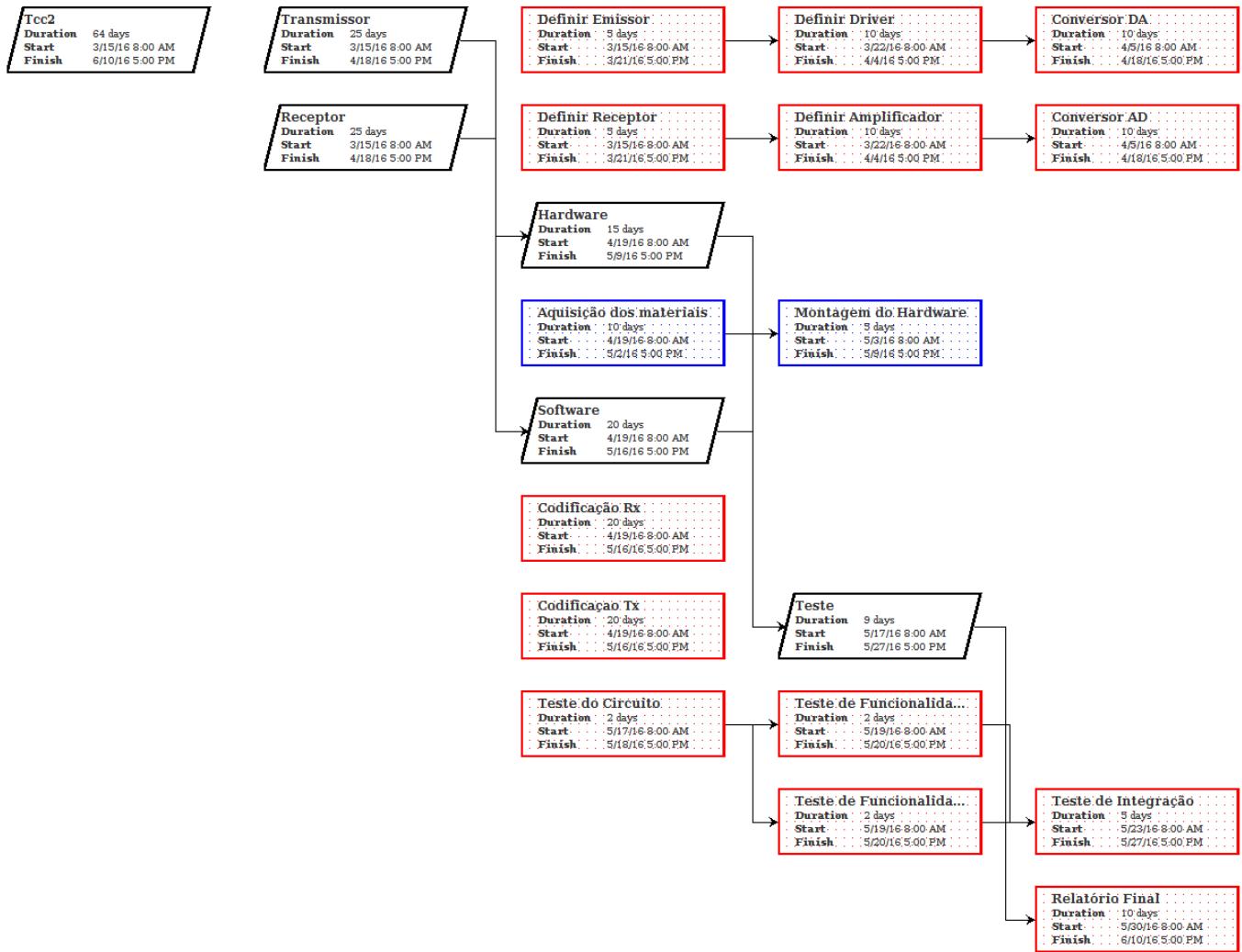


Figura 25 – Diagrama de dependências proposto para o Trabalho de Conclusão de Curso 2.

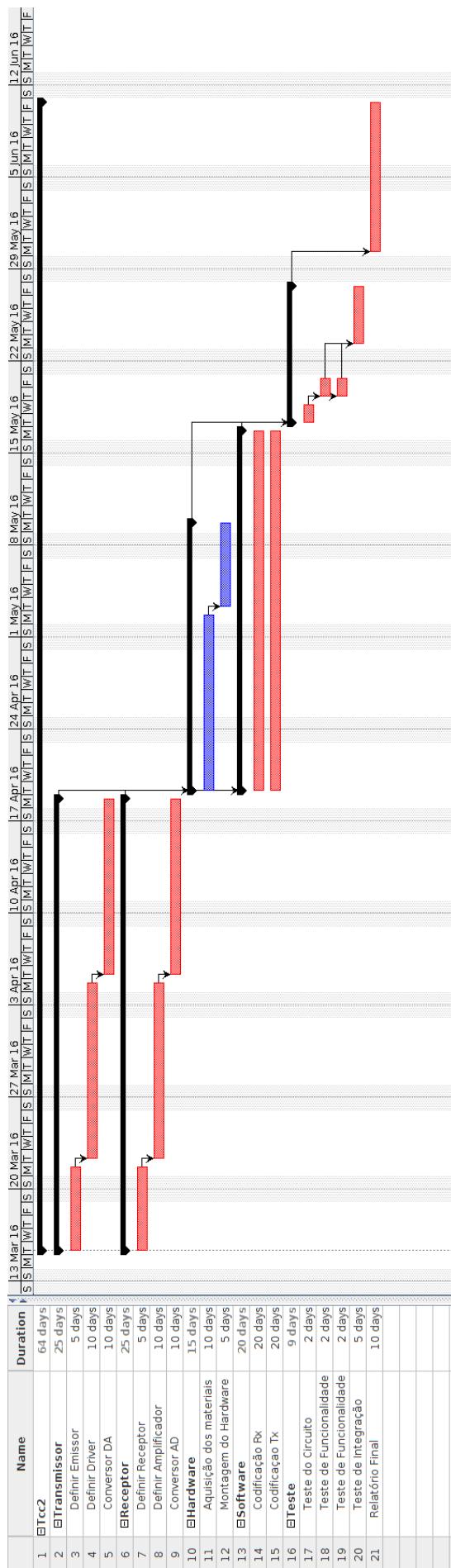


Figura 26 – Cronograma proposto para o Trabalho de Conclusão de Curso 2.

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 27.
- ALEXANDER; B., S. *Optical Communication Receiver Design*. [S.l.]: SPIE Optical Engineering Press, 1997. Citado na página 44.
- ALEXANDER; B, S. *Optical Communication Receiver Design*. [S.l.]: SPIE Optical Engineering Press, 1997. Citado na página 44.
- BELL, A. G. *Selenium and the photophone*. [S.l.], 1880. Citado na página 28.
- BISDIKIAN, C. An overview of the bluetooth wireless technology. *IEEE Communication Magazine*, v. 39, n. 12, p. 86–94, dec 2001. Citado na página 29.
- BOUCHET, O. *Free-Space Optics Propagation and Communication*. [S.l.]: ISTE Ltd, 2006. Citado na página 29.
- DANAKIS, C. et al. Using a cmos camera sensor for visible light communication. In: *IEEE Globecom Workshop on OWC*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 33.
- ENCYCLOPEDIA. Disponível em: <<http://www.pcmag.com/encyclopedia/term/65261/u-nii>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 28.
- FRIEDMAN; EDWARD; MILLER, J. L. *Photonics rules of thumb: optics, electro-optics, fiber optics, and lasers*. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2004. Citado na página 40.
- GERKEN, H. H. M.; TAUSENDFREUND, M. Long-range laser communication terminals: Technically interesting, commercially incalculable. In: (CSNDSP), N. . D. S. P. (Ed.). *8th International Symposium on Communication Systems*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 34.
- 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 28.
- GHASSEMLOOY, Z. *Indoor Optical Wireless Communication Systems*. Northumbria University UK, 2003. Citado na página 36.
- HRANILOVIC, S. *Wireless Optical Communication Systems*. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2009. ISBN 1441919821, 9781441919823. Citado 6 vezes nas páginas 15, 17, 25, 26, 27 e 30.
- KACHRIS, C. et al. *Optical Interconnects for Future Data Center Networks*. [S.l.]: Springer, 2013. Citado na página 31.
- MCDERMOTT-WELLS, P. What is bluetooth? *Potentials, IEEE*, v. 23, n. 5, p. 33–35, Dec 2005. ISSN 0278-6648. Citado na página 29.

OPTOELECTRONICS, E. *Choosing the Detector for you Unique Light Sensing Application.* 1997. Citado na página 45.

PARCA, G. et al. Optical wireless transmissions at 1.6 tbit for the next generation convergent urban infrastructures. *Opt. Eng.*, 2008. Citado na página 34.

RAZAVI, B. *RF Microelectronics (2Nd Edition) (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series)*. 2nd. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press, 2011. ISBN 0137134738, 9780137134731. Citado 3 vezes nas páginas 15, 40 e 44.

SCHERZ; PAUL. *Practical Electronics for Inventors*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2007. Citado na página 44.

SEMICONDUCTORS, O. O. *Silicon PIN Photodiode*. Version 1.1. [S.l.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 45.

SN. 2014. (<http://esc.gsfc.nasa.gov/267/271.html>). Citado na página 35.

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 27.

WON, E. T.; SHIN, D.; JUNG., D. Visible light communication: Tutorial. PowerPoint. 2008. Citado na página 35.

YU, S.-H. et al. *Smart automotive lighting for vehicle safety*. [S.l.], 2013. Citado na página 33.