



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
CEARÁ**

IFCE *campus* FORTALEZA

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES-PPGET
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**

PAULO RICARDO RODRIGUES QUINTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO E EXPERIMENTOS DA TECNOLOGIA DE TRANSMISSÃO POR
LUZ VISÍVEL**

FORTALEZA

2022

PAULO RICARDO RODRIGUES QUINTO

ESTUDO E EXPERIMENTOS DA TECNOLOGIA DE TRANSMISSÃO POR LUZ
VISÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso de Mestrado apresentado ao curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia

FORTALEZA

2022

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

Q7e

Quinto, Paulo Ricardo Rodrigues.

Estudo e Experimentos da Tecnologia de Transmissão por Luz Visível / Paulo
Ricardo Rodrigues Quinto. - 2022.
84 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de
Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia.

1. Transmissão de Dados por Luz. 2. Comunicação por Luz Visível. 3. VLC -
Visible Light Communication. 4. AI - Artificial Intelligence. 5. IoT - Internet of
Things. I. Título.

CDD 621.382

PAULO RICARDO RODRIGUES QUINTO

ESTUDO E EXPERIMENTOS DA TECNOLOGIA DE TRANSMISSÃO POR LUZ
VISÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso de Mestrado apresentado ao curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Aprovação em FORTALEZA, CE ____ de _____ 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Glaucionor Lima de Oliveira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia - Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

À Deus e Nossa Senhora e São José que são minha fonte de inspiração, vontade e força, bem como ao Santo Arcanjo São Miguel e meu Santo Anjo da Guarda e aos meus pais Antonio Rodrigues e Maria Socorro, a minha irmã Roberta, a minha esposa Deirdre e minha filha Raíssa e a meus familiares e amigos por toda paciência, carinho e apoio incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço e consagro mais este trabalho e título a Deus Pai, Deus Filho, Deus Espírito Santo, Nossa Senhora do Perpétuo Socorro, São José, Meu Santo Anjo da Guarda e a São Miguel Arcanjo que me iluminaram com fé e força de vontade, direcionando minha jornada nessa difícil caminhada da aquisição do conhecimento, protegendo-me de tudo que pudesse prejudicar e inspirando-me planos e sonhos. Aos meus pais, Antônio e Socorro, minha esposa Deirdre e minha filhinha Raíssa, pela paciência, incentivo e amor incondicional, minha irmã Roberta e aos demais familiares e amigos por todo respeito, carinho, afeto, conselhos e ensinamentos, além de todo apoio depositado em minha pessoa para superar todos os desafios e obstáculos para que esse objetivo, tão esperado, fosse alcançado. Eu especial gostaria de agradecer a Luiz Henrique colega da faculdade que me ajudou na montagem de alguns experimentos.

Agradeço a todos os professores e colegas que conviveram comigo durante toda a minha trajetória acadêmica e pela contribuição dos valores e conhecimentos por mim adquirido, e em especial ao meu orientador, Professor Dr. Daniel Xavier Gouveia, por aceitar me instruir e colaborar na elaboração deste trabalho com toda sua dedicação, paciência e empenho.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, campus Fortaleza, por toda infraestrutura oferecida, bem como a todos os servidores, desde os zeladores até ao Reitor, que contribuem para tornar essa instituição cada vez mais reconhecida e respeitada no campo do Ensino Superior, nacional e internacionalmente.

"O amor é paciente, o amor é bondoso. Não inveja, não se vangloria, não se orgulha. Não maltrata, não procura seus interesses, não se ira facilmente, não guarda rancor. O amor não se alegra com a injustiça, mas se alegra com a verdade. Tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta."

(Paulo - 1 Coríntios 13:4-7)

RESUMO

Após a descoberta da eletrônica, da microeletrônica e da Internet o mundo vem passando por profundas mudanças e avanços tecnológicos e atualmente já se encontra na chamada quarta revolução industrial, a Indústria 4.0, que incorpora ao nosso dia a dia inovações tecnológicas como a Inteligência Artificial AI – (*Artificial Intelligence*), Internet das Coisas IoT – (*Internet of Things*) e computação em nuvem CC – (*Cloud Computer*) para automatizar e customizar processos, cidades e até países. E vai além disso, conecta pessoas de diferentes culturas e nacionalidades, revoluciona sistemas, transforma vidas e a sociedade.

Nesse processo a comunicação sem fio com o uso do Wi-Fi – (*Wireless Fidelity*) e da tecnologia de RF – (*Radio Frequency*) desempenharam e ainda hoje exercem um papel fundamental na atual evolução tecnológica mundial. Mas, devido a exponencial crescente demanda mundial por produtos e serviços advindos da comunicação sem fio que exige altas taxas de transmissão, baixa latência, confiabilidade, segurança e disponibilidade, a tecnologia de RF com o uso do Wi-Fi vem apresentando problemas de congestionamento, baixo fluxo de dados, baixa velocidade de transmissão, instabilidades e até indisponibilidades dos serviços durante os picos de utilização.

Neste sentido apresentamos este trabalho para mostrar uma tecnologia bem recente, a comunicação por luz visível VLC – (*Visible Light Communication*) que no primeiro momento se apresenta como uma alternativa para complementar e solucionar as exigências da demanda de comunicação sem fio mundial e no segundo estágio protagonizar ou até substituir em grande parte a atual tecnologia de RF, devido a vários benefícios proporcionados.

Mostra-se através de três experimentos a funcionalidade da tecnologia VLC, a facilidade de implantação e a flexibilidade de integração com dispositivos e tecnologias já existentes. Utilizou-se materiais e dispositivos eletrônicos de fácil aquisição local, como diodos, microprocessadores Arduinos Uno e Nano, fios e conectores *usb*. Os objetivos dos experimentos foram alcançados conforme atesta resultados e vídeos em anexo, conseguindo-se transmitir e receber no primeiro experimento um áudio, no segundo um dado (*String*) entre dois microprocessadores e no terceiro realiza-se um acoplamento óptico para acionar uma carga ou um sistema.

Palavras chaves: AI – (*Artificial Intelligence*), IoT – (*Internet of Things*), CC – (*Cloud Computer*), RF – (*Radio Frequency*), VLC – (*Visible Light Communication*).

ABSTRACT

After the discovery of electronics, microelectronics and the Internet, the world has been going through profound changes and technological advances and nowadays is in the so-called fourth industrial revolution, Industry 4.0, which incorporates technological innovations into our daily lives, such as Artificial Intelligence AI – (Artificial Intelligence), Internet of Things IoT – (Internet of Things) and cloud computing CC – (Cloud Computer) to automate and customize processes, cities and even countries. And it goes beyond that, it connects people of different cultures and nationalities, revolutionizes systems, transforms lives and society.

In this process, wireless communication using Wi-Fi – (Wireless Fidelity) and RF technology – (Radio Frequency) played and still play a fundamental role in the current global technological evolution. But, due to an exponential growing worldwide for products and services arising from wireless communication that requires high transmission rates, low latency, reliability, security and availability, RF technology with the use of Wi-Fi comes with congestion problems, low data flow, low transmission speed, instabilities and even unavailability of services during peak usage.

In this sense, we present this paper for a very recent technology, communication by visible light VLC (Visible Light Communication) which at first presents itself as an alternative to complemente and solve the demands for worldwide wireless communication requirement and in the second stage to star in or even replace in large part the technology current RF due to several benefits provided.

It is shown through three experiments the functionality of the VLC technology, the ease of deployment and the flexibility of integration with existing devices and technologies. Materials and electronic devices were used and acquired from local market, such as diodes, Arduinos Uno and Nano microprocessors, wires and usb connectors. The objectives of the experiments were achieved as attested by the results and attached videos, being able to transmit and receive an audio in the first experiment, in the second a data (String) between two microprocessors and in the third an optical coupling is performed to trigger a load or a system.

Keywords: AI – (Artificial Intelligence), IoT – (Internet of Things), CC – (Cloud Computer), RF – (Radio Frequency), VLC – (Visible Light Communication).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Torre com antenas TX e RX de sinais para TV, rádio e telefonia móvel	18
Figura 2 – Fotofone transmissor de Graham Bell	24
Figura 3 – Espectro Eletromagnético	26
Figura 4 – Visão conceitual do VLC.....	27
Figura 5 – Luzes visíveis com uso de Lasers	28
Figura 6 – Rede Li-Fi de Internet	33
Figura 7 – Antena óptica para integração dispositivos móveis.....	35
Figura 8 – Como funciona uma rede Li-Fi	37
Figura 9 – Li-Fi, Dispositivo transmitindo e recebendo dados pela luz de LED	39
Figura 10 – Circuito Esquemático de transmissão de sinal de áudio	43
Figura 11 – Circuito Esquemático de recepção de sinal de áudio.....	45
Figura 12 – Circuito Esquemático transmissor de dados entre microprocessadores.....	47
Figura 13 – Circuito Esquemático receptor de dados entre microprocessadores	49
Figura 14 – Circuito Esquemático de acionamento de carga por luz.....	51
Figura 15 – Circuito Transmissor de sinal de Áudio.....	53
Figura 16 – Circuito Receptor de sinal de Áudio.....	54
Figura 17 – Princípio óptico da propagação dos raios luminosos.....	55
Figura 18 – Princípio óptico da reflexão e da reversibilidade dos raios luminosos.....	56
Figura 19 – Princípio da independência dos raios luminosos	57
Figura 20 – Circuito transmissor de dados (Strings) entre Arduinos	58
Figura 21 – Programa 100x (100 é número de repetições do laço do programa).....	59
Figura 22 – Circuito receptor de dados (Strings) entre Arduinos.....	60
Figura 23 – Recebendo dados (Strings) com placa solar e cálculo de luminosidade	61
Figura 24 – Circuito transmissor e receptor de dados (Strings) entre Arduinos	62
Figura 25 – Transmissão de dados (String) entre Arduinos e programa de recepção ...	62
Figura 26 – Acionamento de carga por laser ou pelo aumento luminosidade pino 7.....	64
Figura 27 – Programa acionamento de carga por laser ou aumento de luminosidade ..	65
Figura 28 – Leitura do pino A0<55lux mostrando que a carga é “DESLIGADA”	66
Figura 29 – Leitura do pino A0>55lux mostrando que a carga foi “ACIONADA”	69
Figura 30 – Circuito de acionamento de carga usando placa solar	67
Figura 31 – Sistema TX-RX de áudio por luz mostrando independência dos raios.....	68
Figura 32 – Sistema transmissor de ÁUDIO por luz	69

Figura 33 – <i>Sistema receptor de ÁUDIO por luz</i>	69
Figura 34 – <i>Sistema TX-RX de String por luz mostrando a independência dos raios...</i>	70
Figura 35 – <i>Monitor Serial Arduino 1 – recepção</i>	71
Figura 36 – <i>Monitor Serial Arduino 2 – recepção</i>	71

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - <i>Tecnologias de ondas de rádio e suas frequências</i>	18
Quadro 2 – <i>Comparativo entre RF x VLC</i>	22
Quadro 3 – <i>Comparativo entre Li-Fi x Wi-Fi</i>	38
Quadro 4 – <i>Dispositivos usado do circuito transmissor do experimento 3.1</i>	42
Quadro 5 – <i>Dispositivos usado do circuito receptor do experimento 3.1</i>	44
Quadro 6 – <i>Dispositivos usado do circuito transmissor do experimento 3.2</i>	46
Quadro 7 – <i>Dispositivos usado do circuito receptor do experimento 3.2</i>	48
Quadro 8 – <i>Dispositivos usado do circuito de acionamento de carga pela luz 3.3</i>	50

LISTA DE *links* e *QR-Codes* no YouTube

1.1 – TR_Áudio_VLC está no <i>link</i> : youtu.be/watch?v=1ITrJ03rBTE	72
1.2 – IND_Raios_Áudio está no <i>link</i> : youtu.be/watch?v=1ITrJ03rBTE	72
2.1 – V1TS está no <i>link</i> : youtube.com/watch?v=jflHnDc2-J4	73
2.2 – V2TS está no <i>link</i> : youtube.com/watch?v=F-9WY4NPWf8	73
2.3 – V3TS está no <i>link</i> : youtube.com/watch?v=Kdxdg9OT_UE	73
2.4 – V4TS está no <i>link</i> : youtube.com/watch?v=lW4KfYGXdRk	73
2.5 – V5TS está no <i>link</i> : youtube.com/watch?v=lqwTJCSiW54	74
2.6 – IND_Raios_S está no <i>link</i> : https://youtu.be/NmBIId_sj9_Y	74
3.1 – AC1_PS está no <i>link</i> : https://youtu.be/hMSh3iDzdzQ	75
3.2 – AC2_PS está no <i>link</i> : https://youtu.be/9h27C1lUu6k	75
3.3 – AC3_PS está no <i>link</i> : https://youtu.be/_uW4KpG_WXQ	75
4.1 – AC_LDR_1 está no <i>link</i> : https://youtu.be/tlNMqXBaIxA	76
4.2 – AC_LDR_2 está no <i>link</i> : https://youtu.be/RiVDGsLKZK4	76
4.3 – AC_LDR_3 está no <i>link</i> : https://studio.youtube.com/video/SDHvwNe7zaI	76
4.4 – AC_LDR_4 está no <i>link</i> : https://youtu.be/yNPYpuBqdFw	76
4.5 – AC_LDR_5 está no <i>link</i> : https://youtu.be/cmRil1mgbH	77
4.6 – AC_LDR_6 está no <i>link</i> : https://youtu.be/TqzieQsuAFg	77
4.7 – AC_LDR_7 está no <i>link</i> : https://youtu.be/Nnodd_2t1i4	77
4.8 – AC_LDR_8 está no <i>link</i> : youtu.be/AXi5HxnWpXM	77
4.9 – AC_LDR_9 está no <i>link</i> : youtu.be/WkjHQJHCdH4	78
4.10 – AC_LDR_10 está no <i>link</i> : https://youtu.be/UAY-4oZoAf8	78
4.11 – AC_LDR_11 está no <i>link</i> : youtu.be/VSldOr1QzAU	78
4.12 – AC_LDR_12 está no <i>link</i> : youtu.be/gMXAk-wPHPU	78
4.13 – AC_LDR_13 está no <i>link</i> : youtu.be/_2SJC5TKOvc	79

LISTA DE ACRÔNIMOS

BER – (*Bit Error Rate*) – taxa de erro de bits

CFL – (*Compact Fluorescent Lamp*) – Lâmpada Fluorescente Compacta

CC – (*Cloud Computer*) – Computação em Nuvem

DD – (*Direct Detection*) – detecção direta

DFT-S – (*Discrete Fourier Transform - Spread*) – modulação Transformada de Fourier Discreta - Distribuída

DMT – (*Discrete Multitone Modulation*) – Modulação Multitono Discreto

FEC – (*Forward Error Correction*) – Correção de Erros Adiante

FSO – (*Free Space Optics*) – Óptica em Espaço Livre

HIDs – (*High Intensity Discards*) –

IC – (*Integrated Circuit*) – circuito integrado

IEEE – (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

IFCE – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia.

IM – (*intensive Modulation*) – Modulação em intensidade

InGaN – **Índio-Gálio-Nitrogênio**

IoT – (*Internet of Things*) – Internet das coisas

JEITA – (*Japan Electronics and Information Technology Industries Association*) – Associação das Indústrias da Eletrônica e da Tecnologia da Informação do Japão

L – (*shaping lens*) – lentes

LASER – (*light amplification by stimulated emission of radiation*) – Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação.

LDR – (*Light Dependent Resistor*) – Resistor dependente da luz

Li-Fi – (*Light Fidelity*) – Fidelidade à Luz

LoS – (*Line of Sight*) – Linha de visão

LTE – (*Long Term Evolution*) – Evolução a longo prazo

MAC – (*Media Access Control*) – Camada de Enlace

MIMO – (*Multiple Input Multiple Output*) – Múltiplas Entradas, Múltiplas Saídas

OFDM – (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) Modulação e Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais

OLED – (*Organic LED*) – Diodos Emissores de Luz Orgânica

OOK – (*On Off Keying*) – Modulação Liga Desliga

OWC – (*Optical Wireless Communication*) – Comunicação Óptica sem Fio

PAPR – (*Peak to Average Power Ratio*) – potência máxima face à potência média

PD – (*photodiode*) – fotodiodos

PLC – (*Power Line Communication*) – Linha Elétrica para Comunicação

PLiFi – (*Power Light Fidelity*) – Fonte de Fidelidade à Luz

PS – (*power source*) – Fonte de alimentação

QAM – (*Quadrature Amplitude Modulation*) – Modulação de Amplitude em Quadratura

QPSK – (*Quadrature Phase- Shift Keying*) – Modulação por Chaveamento de Fase em Quadratura

R – (*reflector*) – refletor

RF – (*Radio Frequency*) – Rádio Frequência

RGB – (- *Red, Green, Blue*) – vermelho, verde e azul

Rx – (*Reciever*) – receptor

Smart Cities – (*Smart Cities*) – Cidades Inteligentes

String – (*String*) – Frase, texto

TED – (*Technology, Entertainment and Design*) Tecnologia, Entretenimento e Projeto

TIC – Telecomunicações da Informação e Comunicação

Tx – (*transmitter*) – transmissor

VLC – (*Visible Light Communication*) - Comunicação por Luz Visível

VLCC – (*Visível Light Communications Consortium*) – Consórcio de Comunicações em Luz Visível

VLISS – (*Visible Light ID System Standard*) – Padrão do Sistema de ID em Luz Visível

Wi-Fi – (*Wireless Fidelity*) – Fidelidade à rede sem fio

WLAN – (*Wireless Local Area Network*) – redes locais sem fio

WPT – (*Wireless Power Transmission*) – Transmissão de Energia sem Fio

SUMÁRIO

1 – Introdução	16
1.1 – Estrutura do trabalho	16
1.2 – Estado da arte.....	17
2 – VLC (<i>Visible Light Communication</i>)	24
2.1 – Histórico do VLC	24
2.2 – O que é o VLC?	26
2.3 – Histórico e desenvolvimento do LED	29
2.4 – Surgimento do Li-Fi - <i>Light Fidelity</i>	32
2.5 – Comparativo entre Wi-Fi e Li-Fi.....	36
2.4 – Outras Aplicações.....	40
3 – Materiais dos Experimentos	42
3.1 – Sinal de Áudio	42
3.2 – Transmissão-recepção de um dado (<i>String</i>) entre micro processadores.....	46
3.3 – Acionamento de carga por luz	50
4 – Experimentos e resultados	52
4.1 – Transmissão-recepção de Sinal de Áudio.....	52
4.2 – Transmissão-recepção de dados (<i>String</i>) entre microprocessadores	58
4.3 – Acionamento de carga por luz ou utilizando luz ambiente	64
4.4 – Experimentos para demonstrar a independência dos raios luminosos	68
4.4.1 – Transmissão-recepção de áudio através de sinal luminoso	68
4.4.2 – Transmissão-recepção de dados (<i>String</i>) entre dois microprocessadores	70
4.4.3 – Evolução dos experimentos durante pesquisa e trabalho desenvolvido	72
5 – Expectativas futuras e conclusões	80
5.1 – Trabalhos futuro	80
5.2 – Conclusão	80
6 – Referências	81

1. INTRODUÇÃO

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido por meio de pesquisas bibliográfica baseado em *sites* de engenharia, em artigos científicos e tecnológicos, além de livros e apostilhas sobre o assunto. Neste sentido, o mesmo apresenta no capítulo 1.2 um breve histórico da comunicação pela luz visível, VLC e o estado atual desta tecnologia, seus principais conceitos e os desafios enfrentados e o relacionamento com outras tecnologias consolidadas existentes no mercado e sua expansão. Discute os benefícios e influência que esse tipo de tecnologia exercerá sobre a sociedade e as comunicações e seus usuários, numa rede privada e ou pública na Internet.

No capítulo 2 na seção 2.1 falamos sobre a história do VLC e discutimos sobre essa tecnologia. Na seção 2.2 falamos sobre o que vem a ser o VLC e queremos chamar atenção para essa tecnologia que está no início de implantação no cenário mundial e em crescente ascensão exponencial desde sua descoberta em diversas áreas da sociedade, tais como comunicação, energia, segurança, engenharia, saúde, militar. Na seção 2.3 relata-se sobre o diodo Emissor de Luz (LED – *Light Emmitter Diod*), na seção 2.4 sobre o surgimento do Li-Fi, na seção 2.5 fazemos um comparativo entre o Wi-Fi e o Li-Fi e na seção 2.6 relacionamos outras aplicações com o VLC.

No capítulo 3 relacionamos os materiais usados nos nossos experimentos para demonstrar a funcionalidade da tecnologia do VLC. Na seção 3.1 os materiais para a transmissão do sinal de áudio, na seção 3.2 para a transmissão de uma *String* entre microprocessadores e na seção 3.3 para o acionamento de carga por luz.

No capítulo 4 realizamos os experimentos práticos para demonstrar a funcionalidade, flexibilidade e implementação da tecnologia, fazendo a transmissão de um sinal de áudio na seção 4.1, de um dado (uma *String*) entre dois microprocessadores na seção 4.2, e o acionamento óptico de uma carga na seção 4.3 e na seção 4.4 relatamos o experimento da independências dos raios luminosos, realizando assim os objetivos inicialmente almejados.

No capítulo 5 apresentamos as considerações finais e expectativas futuras.

E no capítulo 6 as referências bibliográficas.

1.2 ESTADO DA ARTE

A comunicação mundial realizada por meio de aparelhos de tvs, rádios, celulares, computadores deve-se ao surgimento das ondas eletromagnéticas e em especial das ondas de rádio. Os primeiros estudos e a previsão das ondas eletromagnéticas foram realizados em 1864 pelo Físico e Matemático James Clerk Maxwell^[1] que foi o primeiro a reportar propriedades ondulatórias da luz, além de observar similaridades entre a eletricidade e o magnetismo. Ele propôs equações matemáticas que descrevem as ondas de luz e de rádio como ondas eletromagnéticas que viajam no espaço. Contudo, em 1887, foi devido ao Heinrich Hertz^[2], a demonstração da existência das ondas eletromagnéticas, gerando experimentalmente em seu laboratório ondas de rádio, que conseguiriam transmitir informação pelo espaço. Na época essas ondas foram chamadas por Hertz, de “ondas indutivas” ou “ondas aéreas”, e hoje são conhecidas como ondas hertzianas em sua homenagem.

Portanto, só no final do século XIX com o surgimento das ondas de rádio e o início de várias pesquisas sobre o assunto, começaram a surgir novas tecnologias, entre elas podemos destacar a transferência de energia sem fio (WPT, *Wireless Power Transmission*), e o VLC. Atualmente essas tecnologias se encontram em uso, bem como seus estudos, com o intuito de usar suas propriedades e benefícios nas comunicações, na produção de produtos e serviços dos mais diversos tipos, para melhorar a qualidade de vida e bem estar das pessoas ao redor do globo terrestre. Essas tecnologias baseiam-se na natureza ondulatória da radiação eletromagnética.

Por volta de 1895 foi devido a Guglielmo Marconi^[3] (1874-1937) o desenvolvimento e produção do primeiro transmissor de ondas de rádio plenamente funcional que passou a ser comercializado em meados de 1900 [1].

[1] James Clerk Maxwell (1831 — 1879) foi um físico e matemático escocês. Conhecido por ter dado forma final à teoria moderna do eletromagnetismo, que une a eletricidade, o magnetismo e a óptica. Esta é a teoria que surge das equações de Maxwell, assim chamadas em sua honra e porque foi o primeiro a escrevê-las juntando a lei de Ampère, modificada por Maxwell, a lei de Gauss, e a lei da indução de Faraday. Maxwell demonstrou que os campos elétricos e magnéticos se propagam com a velocidade da luz.

[2] Heinrich Rudolf Hertz (1857 — 1894) foi um físico alemão. Hertz demonstrou a existência da radiação eletromagnética, criando dispositivos emissores e detectores de ondas de rádio. Em sua homenagem a unidade de frequência no Sistema Internacional de Unidades é denominada hertz (abreviada como Hz). Hertz pôs em evidência em 1888 a existência das ondas eletromagnéticas imaginadas por James Maxwell em 1873.

[3] Guglielmo Marconi (1874 — 1937) foi um físico e inventor italiano. Inventor do primeiro sistema prático de telegrafia sem fios (TSF), em 1896. Marconi se baseou em estudos apresentados em 1897 por Nikola Tesla para em 1899 realizar a primeira transmissão através do Canal da Mancha.

A Figura 1 mostra-se uma torre com várias antenas de transmissão e recepção de sinais para TV, rádio e telefonia móvel que são usados atualmente.

Figura 1 – Torre com antenas TX e RX de sinais para TV, rádio e telefonia móvel



Fonte [1] 1999

Vemos então que o uso das ondas de rádio deu origem a diversas aplicações tecnológicas no mundo moderno. O Quadro 1 mostra uma tabela com algumas dessas aplicações e de acordo com a frequência da onda de rádio utilizada.

Quadro 1 – Tecnologias de ondas de rádio e suas frequências

Utilização - Tecnologia	Frequência
Radares	10 GHz
Satélites (GPS)	1 GHz
Telefonia móvel	500 MHz
TV digital	300 MHz
Rádio FM	100 MHz
Rádio AM	1 MHz

Fonte [1] – 1999

As ondas eletromagnéticas bem como as ondas de rádio podem propagar-se pelo vácuo e se propagam a velocidade da luz, podendo ser usadas para transportar uma grande quantidade de informações para antenas de rádio, televisão, Sistema de Posicionamento

Global (GPS - *Global Positioning System*), telefonia móvel, entre outros. As ondas de rádio são geradas mediante a aceleração de cargas elétricas, no interior de antenas transmissoras [2].

Atualmente existe no mercado um grande número de dispositivos de telecomunicações que usam frequências de rádio e a emissão desses tipos de ondas são regulamentadas por leis nacionais e internacionais a fim de reduzir a possibilidade de interferências entre diferentes sinais[1].

Com o surgimento do transistor e da micro eletrônica, ocorreram grandes avanços tecnológicos em todo o planeta e esta evolução tecnológica continua em crescimento exponencial, como também o uso vertiginoso dessas tecnologias nas mais diversas áreas da engenharia com o uso da robótica e da nanotecnologia, trazendo inúmeras transformações e benefícios nos produtos e serviços prestados a humanidade. Além disso, verificaram-se mudanças significativas nos tamanhos dos dispositivos de comunicações, na velocidade da transmissão, na qualidade e quantidade de serviços que podem ser ofertados pelas Telecomunicações da Informação e Comunicação (TIC) [3].

Os dispositivos e as placas de circuito estão ficando cada vez menores fazendo com que os equipamentos eletrônicos em geral, em especial os de comunicação tenham seus tamanhos reduzidos drasticamente a cada dia, sendo utilizados em sua maioria em ambientes *indoor*.

Constata-se todo esse avanço tecnológico nos dispositivos móveis, nos celulares, nos *smartphones* e *tablets*, que utilizam a tecnologia das ondas eletromagnéticas de RF e sua crescente utilização pela população mundial. Com esse aumento vertiginoso do número de dispositivos em escala mundial cresceu assustadoramente também a grande quantidade e volume de informação que deve ser transmitido diariamente e ininterruptamente ao redor do globo. Contudo, a largura de banda de RF para essas transmissões bem como as redes para distribuição está chegando aos seus limites de operação, apresentando tráfego e congestionamento, tornando muitas dessas redes ineficientes ou até mesmo inoperantes durante os picos trabalho do dia a dia.

Grandes corporações não poupam esforços nem recursos financeiros na obtenção de produtos e serviços mais acessíveis que promovam e forneçam tecnologias para melhorar a infraestrutura das casas, empresas, indústrias e cidades, melhorando a mobilidade urbana, gerando qualidade de vida para as populações dos pequenos e grandes centros.

Neste cenário, a comunicação sem fio é considerada por muitos especialistas na área como a tecnologia do futuro e vem nas últimas décadas se desenvolvendo de forma surpreendente e vertiginosa. Segundo KUMAR; SINGH – 2019 a comunicação sem fio pode ser dividida ou classificada em: radiofrequência RF e comunicação óptica sem fio (OWC – *Optical Wireless Communication*)[4].

Com o surgimento da internet, da telefonia móvel e das redes sem fio ocorreu um aumento exponencial do uso desses serviços, do número de dispositivos que os utiliza, bem como um aumento vertiginoso do volume de dados que são trafegados diariamente e ininterruptamente pelos seus usuários. Com esse aumento exponencial de informações começou-se verificar congestionamento de tráfego e de redes, revelando as limitações a que o atual e principal sistema de comunicação sem fio de RF está passando, como repartição de frequências, pequena largura de banda de dados e uma procura por alta conectividade e maior velocidade nos processos.

Então, nas últimas décadas o mundo é testemunha de um aumento desordenado de tráfego e congestionamento nas redes de telecomunicações. Temos um aumento significativo de demandas por serviços de internet de alta velocidade como Tv de alta resolução, vídeo chamadas (especialmente após a pandemia mundial de Covid-19) e computação e armazenamento de dados em nuvens tem motivado a pesquisa de novas tecnologias e serviços que possam atender a essa crescente necessidade mundial por maior velocidade e volume de informações a serem processados nas redes de telecomunicações[4].

O atual sistema de comunicação baseado em RF tem sofrido particularmente com os efeitos da propagação de múltiplos caminhos no ambiente de grande densidade urbana reduzindo a disponibilidade de *links* de comunicação e bem como a performance do sistema. O limite da largura de banda desses sistemas junto com o espectro congestionado significa que relativamente muito poucos canais de alta definição pode ser acomodados numa determinada área. Este problema é mais acentuado para aplicações *indoor* onde existe uma falta de largura de banda adequada para ser dividida entre o grande número de usuários que desejam o serviço. É estimado que mais de 70% do tráfego sem fio ocorre em ambientes *indoor* (casas, escritórios, etc.). Portanto, baixo custo e alta confiabilidade tecnológicas são necessários para habilitar sistemas de comunicação sem fio e que não apresentem problemas. As duas soluções possíveis para resolver o problema exposto seria explorar ainda mais o atual espectro de RF ou tentar como alternativas auxiliar, o uso de tecnologia óptica existente[4].

Além disso as tecnologias sem fio (3G, 4G, 5G e além) tem somente três modos para aumentarem a capacidade de um sistema sem fio de RF:

1. Estabelecer um novo espectro e mais banda larga (custa caro)
2. Aumentar o número de nós de conexões (custa caro e aumento da complexidade gerenciamento)
3. Melhora a eficiência do spectral (aumenta a complexidade também)

Para evitar o congestionamento de redes que são, em sua maioria administradas por essa tecnologia, surgiram pesquisas alternativas que possam solucionar uma futura diminuição na qualidade de serviço, surgindo como um candidato viável para atender a estes requisitos o OWC pode ser classificada como: 1. Comunicação pela luz visível (VCL - *Visible Light Communication*), que apresenta um comprimento de onda na faixa de 380-750nm e frequência na faixa de THz usando diodos emissores de luz (LED – *Light Emitter Diodo*) em ambientes *indoor* e 2. A comunicação óptica em espaço livre (FSO – *Free Space Optical*), com comprimento de ondas na faixa de 800 - 1600nm, com uso de diodos lasers em ambientes externos [4].

Como as redes de RF existentes não podem atender à demanda cada vez maior do volume de dados, a OWC, que usa um amplo espectro não regulamentado e ainda inexplorado, configura-se como uma proposta tecnológica promissora para superar as limitações do espectro de RF. Comparadas às redes de RF, as redes OWC são mais seguras e menos suscetíveis à interceptação devido à pequena cobertura fornecida pelos LEDs e por funcionarem adequadamente apenas na presença dos componentes de linha de visão (LoS – *Line of Sight*).

O sistema de comunicação VLC tem seu próprio padrão o IEEE 802.15.7, tem o fundamento científico, a aplicabilidade e condições de funcionamento de forma eficiente e em conjunto com tecnologias sem fio, como Wi-Fi - *Wireless Fidelity*, LTE - *Long Term Evolution* e 5G.

A seguir temos o Quadro 2, onde veremos algumas vantagens da VLC em relação ao RF, dentre as quais destacamos a reutilização da infraestrutura, já que as lâmpadas de LED podem desenvolver a funcionalidade tanto de iluminação como de comunicação. Pode também ser usado com grande funcionalidade e utilidade para várias finalidades em ambientes como hospitais, instalações sanitárias, nas comunicações submarinas, na indústria, em refinarias petroquímica e de gás, e em área inóspitas de difícil acesso humano em a utilização da RF não é possível ou permitida [5].

Quadro 2 – Comparativo entre RF x VLC

PROPRIEDADE	RF	VLC
Espectro de Frequência	3KHz - 300GHz	430THz – 790THz
Segurança	Baixa	Alta
Cobertura	32m	12m
Complexidade do Sistema	Alta	Baixa
Interferência Eletromagnética	Sim	Não
Faixa de Espectro Regulamentada	Sim	Não

Fonte [6] – 2017

Acredita-se que com o aumento da utilização do espectro de RF- Radiofrequência e Micro-ondas o mesmo dentro de algum tempo tenderá a não absorver a demanda de transmissão de dados sem fio. [7].

Deste modo a tecnologia VLC vem sendo estudada e está ganhando espaço como sendo a melhor alternativa para solucionar a demanda enorme de comunicação sem fio no mundo. Sistemas VLC poderão se tornar não só uma alternativa, mas, uma forma de complementar e mesmo expandir a infraestrutura *wireless* da Internet aliviando a tendência de saturação do espectro de RF disponível, complementando assim as tecnologias já existentes e consolidadas no mercado mundial, o Wi-Fi e a RF.

Muitas melhorias e inovações ainda estão por vir fazendo do VLC uma tecnologia que está sendo atualmente estudado por empresas, indústrias e instituições acadêmicas destacando-se a Nasa, Disney e Philips que possuem produtos e pesquisas nesta área.

Deve-se ressaltar que sistemas VLC são propícios para aplicação em ambientes internos (*indoor*) onde a maioria das pessoas tendem a ficar trabalhando, estudando ou se divertindo grande parte do tempo. Ambientes internos também podem ser mais imunes a interferência de fatores externos. Um fato muito importante é que a implementação de tecnologias VLC poderia em princípio utilizar uma infraestrutura de luminárias existente da rede elétrica ou pelo menos parte dela.

Atualmente muitos dispositivos (monitores, *smartphones*, computadores, automóveis e outros veículos de transporte) utilizam LEDs, bem como as lâmpadas de LED nas residências, poderiam facilitar a implementação da tecnologia VLC. Nas residências as lâmpadas teriam as funções de iluminação e ponto de acesso e transmissão de dados.

A possibilidade de altas taxas de transmissão de dados proporcionadas pela frequência na ordem de THz, torna-se uma grande motivação para os estudos na área, lembrando que a tecnologia Wi-Fi alcança, no máximo, taxas de até 300 Mbps[4].

Outro item relevante para a implementação de sistemas VLC é que ao contrário da radiofrequência, o espectro da luz visível não é licenciado, ou seja, dispositivos podem transmitir em qualquer frequência sem a necessidade de uma licença. Enquanto no espectro de ondas de rádio a frequência varia na faixa (3KHz – 300GHz), no espectro de luz visível as frequências envolvidas estão na ordem dos THz, ou seja, 1000 vezes superior. Segundo *Haas*, criador da tecnologia Li-Fi, a largura de banda no espectro de luz visível utilizável e não licenciada é de cerca de 670 THz[8].

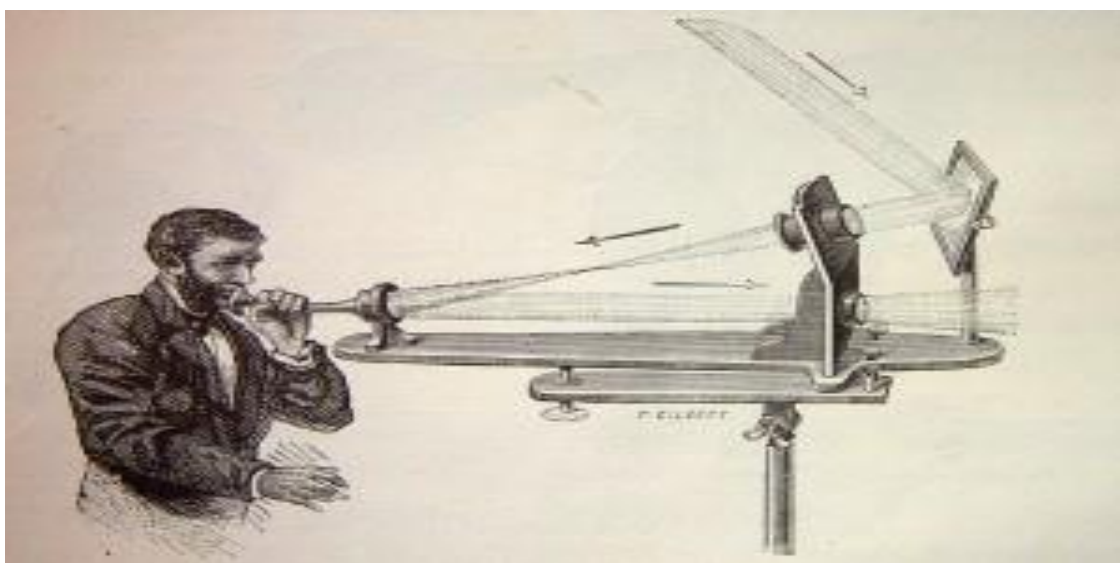
Enquanto frequências no infravermelho e em ultravioleta podem ser perigosas para a saúde humana, o espectro da luz visível não tem nenhum perigo ou restrições desta ordem. Também do ponto de vista da segurança da informação é sabido que ondas de rádio numa rede sem fio convencional podem ser interceptadas, enquanto em sistemas VLC, devido às propriedades da luz, teríamos maior segurança[8].

2. VLC (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION)

2.1 HISTÓRIA DO VLC

Alexander Graham Bell ficou conhecido mundialmente pela invenção do telefone, contudo, ele também foi quem primeiro demonstrou sistema VLC (*visible light communication*) através de sua outra invenção, o Fotofone (*Photophone*). Em 3 de junho de 1880, a primeira mensagem telefônica sem fio através do seu aparelho foi transmitida, que permitia a transmissão de som através de um feixe de luz [9].

Figura 2 – Fotofone transmissor de Graham Bell



Fonte [9], 2011

Após ter sucesso na transmissão da fala através da eletricidade, Bell tentou transmiti-la utilizando a luz. E em 1880, com a ajuda de seu assistente Charles Tainter, obteve sucesso. Ele conseguiu transmitir pela primeira vez uma mensagem telefônica sem a utilização de fios, utilizando apenas feixes de luz solar. Batizou seu dispositivo de *Photophone*, que utilizava células cristalinas de selênio no ponto focal de um receptor parabólico. A resistência elétrica do selênio varia inversamente com a luminosidade, isto é, sua resistência é maior no escuro e menor quando é exposto à luz. A ideia básica do *Photophone* é iluminar as células de selênio as quais convertem a energia luminosa em corrente elétrica e com um raio de luz modulante, fazendo, assim, com que a resistência elétrica e consequentemente a corrente elétrica variem. Com a ajuda de um receptor telefônico tornou-se possível, então, regenerar os sons capturados. O raio de luz utilizado era modulado mecanicamente pelas ondas sonoras da voz através de um espelho fino

vibrante que podia variar de côncavo a convexo, isto é, um espelho que podia focar ou dispersar a luz. Em suma, o telefone e o *Photophone* partem do mesmo princípio, porém, um utiliza a eletricidade e o outro a luz. Quatro das trinta patentes de Bell dizem respeito ao *Photophone*, o qual era considerado por ele sua principal invenção, apesar de sua relevância não ser reconhecida à época. Bell pensava que o *Photophone* poderia ser usado, por exemplo, por navios em alto mar e via como sua maior vantagem em relação ao telefone a não necessidade de instalação de linhas telefônicas. Porém, isso se mostrou impossível devido a problemas oriundos na transmissão da luz: interferências externas como nuvens, neblina, chuva, etc., facilmente podem perturbar o sinal. Assim, até o desenvolvimento das tecnologias do laser moderno e das fibras ópticas^[4] - que contribuíram para a segurança da transmissão da luz, o fabuloso invento de Bell foi praticamente inutilizável. A tecnologia disponível na época limitava o alcance do sistema a 200 metros, além disso, seu dispositivo não funcionava sem a luz solar direta. Bell acreditava que o *Photophone* era sua mais importante invenção[10].

. A tecnologia *Photophone* apesar de ter sido uma invenção extremamente importante, foi substituída por outras, como as ondas de rádio e a fibra óptica. O conceito de comunicação por luz, VLC, só veio a ser novamente explorado a partir do início do século XXI no ano 2000.

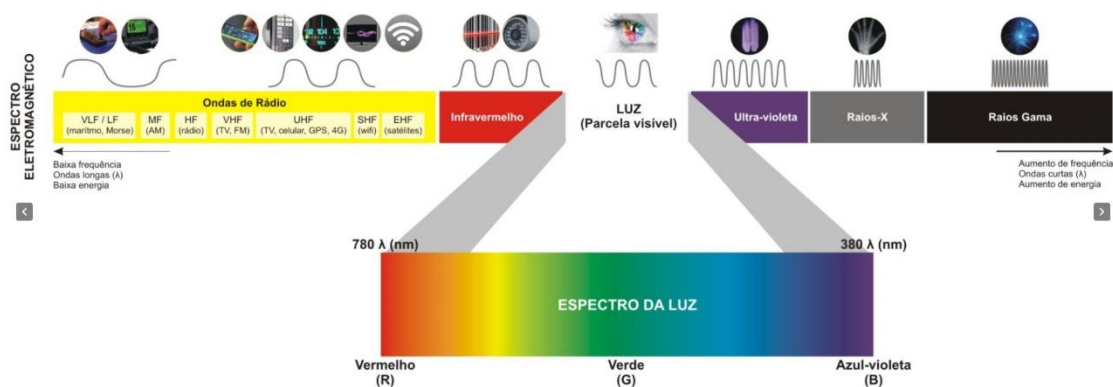
Há pouco tempo, em 2011, surgiu e foi apresentada pelo professor Harald Haas numa palestra do Tecnologia, Entretenimento e Projeto (TED - *Technology, Entertainment and Design*) a tecnologia chamada Li-Fi, que se refere a sistemas de comunicação com luz visível, que empregam luz do diodo emissor de luz LED para transmitir dados em alta velocidade, possibilitando uma transmissão de até 224 gigabytes por segundo e de forma similar como acontece no Wi-Fi, o Li-Fi é uma tecnologia que pode servir de base à internet das coisas, onde tudo o que é eletrônico permanece conectado à internet, sendo que as luzes dos LED's serão os pontos de acesso [11].

[4] Fibras ópticas são finos filamentos de vidro onde a luz viaja por um processo de reflexão interna, sendo utilizadas especialmente na telecomunicação, na medicina e na indústria. São capazes de transportar uma quantidade de informações (voz, imagens e outros tipos de dados) dezenas de milhares de vezes maior que a de um fio de cobre e numa velocidade próxima à da luz

2.2 O QUE É O VLC?

O que vem a ser o VLC? Comunicação por Luz Visível são todos os sistemas em que dados são transmitidos através da modulação das ondas de luz no espectro visível, ou seja, a faixa do espectro eletromagnético que varia entre 390 nm a 700 nm. Na realidade qualquer sistema que consegue transmitir informações utilizando luz visível aos olhos humanos pode ser considerado como VLC. Contudo, VLC tem como princípio a transferência de dados de maneira imperceptível aos olhos do ser humano, de forma que, quando os dados estão sendo transmitidos durante a utilização de um sistema VLC, o que se perceberia ou se enxergaria seria apenas a iluminação comum, sem nenhuma alteração perceptível[6]. A Figura 3 mostra os espectros de frequência da RF e do VLC, bem como seus comprimentos de onda.

Figura 3 – Espectro Eletromagnético



Fonte [12], 2017

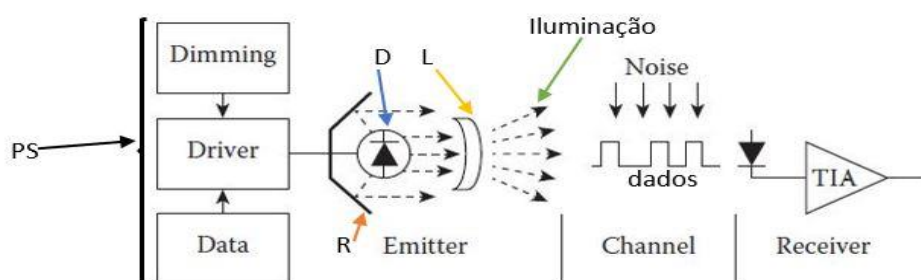
Para alguns pesquisadores o VLC está sendo atualmente preferida devido a facilidade de implementação, pois, não utiliza cabos, a transmissão é por luz, além de não ter interferências por fontes eletromagnéticas e por poder trabalhar com altas frequências na casa dos TeraHertz[13].

Devido ao rápido desenvolvimento de componentes ópticos como os fotodiodos (PD *photodiode*) centrados na sua alta sensibilidade e LED centrados na sua eficiência energética, a comunicação VLC está se tornando uma ótima opção para a transmissão de dados em ambientes internos. Isto devido à possibilidade de usar a mesma infraestrutura de iluminação para comunicação. Para a transmissão de informação, a VLC utiliza a comutação rápida do LED, que é representado em mudanças na intensidade da luz que

são imperceptíveis para o olho humano, além disso apresenta uma técnica de modulação mais simples, pois só requer trabalhar com os valores positivos, portanto a sua modulação é em intensidade (IM *intensive Modulation*) no lado do transmissor (Tx *transmitter*) e para a sua recepção utiliza a detecção direta (DD *Direct Detection*) no receptor (Rx *Reciever*). O esquema elétrico de um sistema VLC é composto do lado do transmissor por um *driver* de corrente que recebe o sinal a ser transmitido e modula à sua saída o LED. Do lado do receptor o sinal é recebido através de um circuito eletrônico que converte o sinal de luz detectado no PD (fotodetector) num sinal de tensão. Após o tratamento do sinal recupera-se os dados recebidos. O meio de transmissão é o ar, devendo-se ter em conta fatores de atenuação provocados pelo meio, além do ruído presente devido às fontes luminosas exteriores ao sistema.

A figura 4 mostra uma visão conceitual em blocos do VLC. Os quatro principais componentes são a fonte (PS, *power source*), a lâmpada ou LED, o refletor (R, *reflector*), e as lentes de modelagem (L, *shaping lens*). A fonte PS é quem fornece e controla a energia para a lâmpada ou LED. Diferentes lâmpadas ou LEDs requerer quantidades de energia e diferentes *drivers*^[5] da fonte. Por exemplo, um driver para as lâmpadas em LED são diferentes para uma lâmpada fluorescente. A lâmpada ou LED é o dispositivo de iluminação onde a energia elétrica é convertida em luz. Existem vários tipos de dispositivos de iluminação com diferentes mecanismos de conversão, cada um adequado para diferentes aplicações.

Figura 4 – Visão conceitual do VLC



Fonte[4], 2017

Os dispositivos de iluminação mais comuns disponíveis no mercado são lâmpadas fluorescentes, lâmpadas fluorescentes compactas (CFL - *Compact Fluorescent Lamp*), lâmpadas de descarga de alta intensidade (HIDs - *High Intensity Discards*), e LEDs.

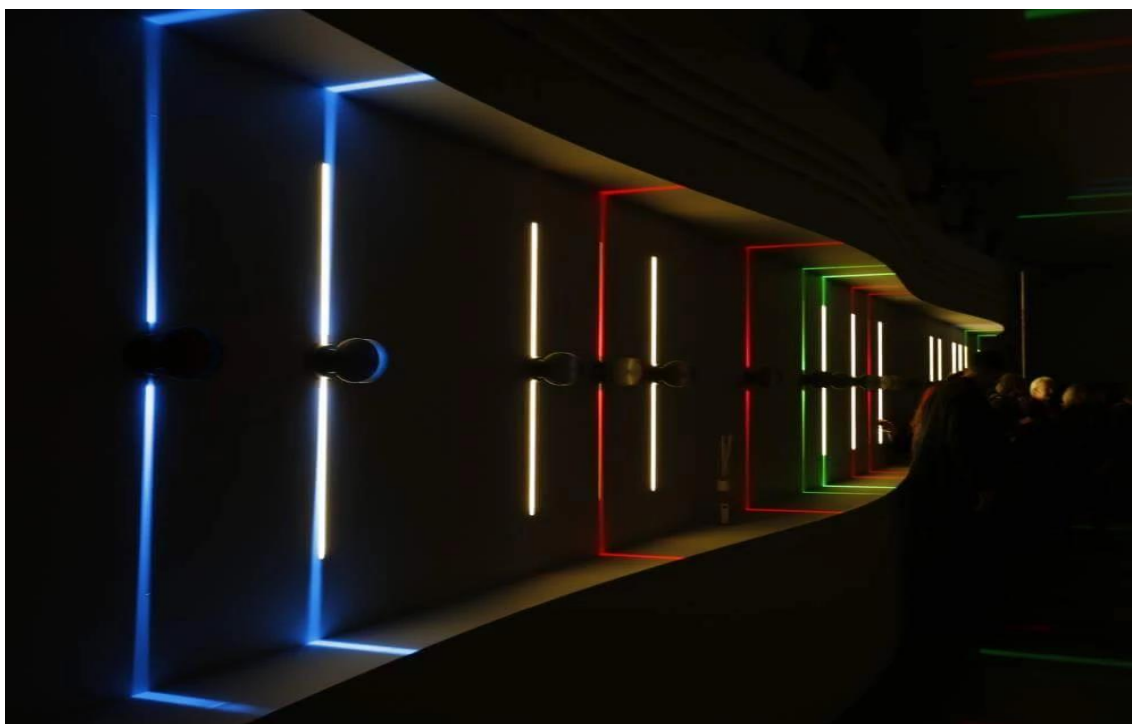
[5] Driver: arquivo de software; Drive: aciona leitor de dado.

O refletor é o elemento usado para confinar a radiação de luz numa direção específica. E finalmente as lentes de modelagem para assegurar condições de uma luminosidade uniforme. Com o surgimento das lâmpadas de estado sólido, pela primeira vez tornou-se possível transformar esses dispositivos em fontes de alta velocidade (o que até então, não era possível com outras lâmpadas). Portanto, ficou claro que podemos utilizar essas lâmpadas ou LEDs com duas finalidades, a primeira para iluminação ambiente e a outra como um ponto de acesso para transmissão de dados usando o sistema VLC[4].

Como o VLC tem um espectro na faixa de THz (390 -790) o que garante uma enorme largura de banda que ainda não foi utilizada e que, além disso, e contrário à comunicação por RF é sem licenciamento. A crescente procura de velocidade nas redes de comunicação faz essa tecnologia que é compatível com as redes existentes e as de nova geração ainda em desenvolvimento ser desejada por todos. A comunicação VLC se apresenta como um complemento dos sistemas de comunicação móvel RF através da concepção e implementação de redes de alta capacidade e velocidade ou como sistema de comunicação alternada porque não apresenta interferência eletromagnética. Além disso os LED podem ser usados para iluminação dos ambientes, além de conferir uma alternativa para comunicações no interior de alta velocidade [4].

A figura 5 mostra luzes visíveis baseadas em laser, uma tendência mundial.

Figura 5 – Luzes visíveis com uso de lasers



Fonte [14], 2022

2.3 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO DO LED

A tecnologia de LED sofreu um grande avanço nos anos 1990 e surgiram os LEDs verdes e azuis baseados em InGaN (Índio-Gálio-Nitrogênio). Iniciaram estudos e trabalhos para melhorar a eficiência do LED que possibilitasse seu uso em sistemas de comunicação devido ao fato de usar o LED como um elemento comutador, possibilitando comutações mais rápidas. Em meados de 2008 surgem os LEDs emissores de luz branca a partir da mistura de LED de cores primários (HELD, 2008). No início dos anos 2000 contemplamos o início e a utilização de lâmpadas LED nos experimentos para realizar um sistema de comunicação VLC que possam transmitir e iluminar ao mesmo tempo. Os LEDs de luz branca foram usados em comunicações VLC pela primeira vez pelo grupo de pesquisadores Tanaka que conseguiram alcançando taxas de 400Mbps no ano de 2003. Após esta inovação, inúmeras pesquisas sobre o tema surgiram, o que acabou levando ao desenvolvimento da VLC como tecnologia capaz de cumprir as funções de transmissão e de iluminação ao mesmo tempo e então criou-se o Consórcio de Comunicações em Luz Visível (VLCC - *Visível Light Communications Consortium*) [15].

Dois padrões foram propostos em 2007: 1. Sistema de Comunicação em Luz Visível (VLCSS, *Visible Light Communication System Standard*) e 2. Sistema de ID em Luz Visível (VLIS, *Visible Light ID System Standard*) onde foram reconhecidos pela Associação das Indústrias da Eletrônica e da Tecnologia da Informação do Japão (JEITA, *Japan Electronics and Information Technology Industries Association*) [15].

Já o Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos, (IEEE, *Institute of Electrical and Electronic Engineers*), publicou em 2011 seu padrão próprio para comunicações ópticas sem fio de curto alcance e o referenciou como 802.15.7-2011, abrangendo Camada Física (PHY, *Physical Layer*) e a Camada de Enlace (MAC, *Media Access Control*) (IEEE, 2011), e 7 anos depois em 2018 uma revisão do padrão foi realizada [15].

Em 2013, Ahmad Helmi Azhar montou um experimento baseado em comunicação VLC para um ambiente *indoor*, construíram um esquema usando quatro LEDs brancos, formando um dispositivo com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) e usando modulação e multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM, *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) apresentou uma taxa de erro de bits (BER, *Bit Error Rate*) de 10^{-3} e conseguiram atingir uma taxa de 1 Gbps.

No mesmo ano 2013 Haigh juntamente com sua equipe atingiram uma taxa de transmissão de 1,4 Mb/s usando comunicação VLC, contudo, a modulação em questão foi a modulação multitono discreto (DMT, *Discrete Multitone Modulation*) e com uma modulação de amplitude em quadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) de 32 níveis junto com 1024 subportadoras, usando diodos emissores de luz orgânica (OLED *Organic LED*) usando uma banda de 100kHz conseguiram melhorar o desempenho em 1422 vezes [15].

Em 2014, Burton e seus auxiliares conseguiram estabelecer um link de comunicação VLC para um sistema MIMO, com taxas de 50Mb/s a uma distância de 2 m. Foram utilizados quatro emissores LED brancos independentes, onde cada qual transmitiu 12,5 Mb/s de dados usando modulação liga desliga OOK (*On Off Keying*), e nos receptores usou-se quatro fotodiodos independentes [15].

Em 2015 Tsonev e sua equipe fez a substituição do LED pelo diodo *laser* (LD, *Laser Diode*), convertendo a energia elétrica em luz com maior eficiência, combinando três cores: vermelho, verde e azul (RGB- *Red, Green, Blue*) na obtenção luz branca. A taxa de transmissão atingida foi de 3,43 Gbps com uma BER de $2,33 \times 10^{-3}$, uma iluminação de 21,25 lx para uma distância de 2,88 m [15].

Em 2016 Fahs e sua equipe conseguiram montar um sistema Óptico do Espaço Livre para ser utilizado em ambientes fechados. Um receptor de circuito integrado (IC) de alta sensibilidade com níveis de detecção na faixa de microwatts foi utilizado formando um link na faixa de gigabit por segundo com apenas 250 lux de iluminação e $600 \mu\text{W}$ de potência óptica com uma fonte de diodo laser de 680 nm. Na recepção, fotodiodos integrados foram utilizados usando tecnologia $0,35 \mu\text{m}$ CMOS MAS e a taxa de 2,5 Gb/s foi alcançada para uma taxa de erro (BER) de 10^{-3} e utilizando modulação OOK em uma distância de 1,2 m [15].

Em 2017 Wu e seus colaboradores utilizaram a modulação Transformada de Fourier Discreta - Distribuída (DFT-S, *Discrete Fourier Transform - Spread*) sobre subportadoras OFDM com o objetivo de reduzir a potência máxima face à potência média (PAPR, *Peak to Average Power Ratio*). Neste trabalho, 24 LEDs RGB distribuídos uniformemente em uma sala como se fossem fontes externas de iluminação como as lâmpadas fluorescentes, conseguiram transferir uma taxa de 1 Gbps com uma BER de $2,7 \times 10^{-3}$ [15].

Em 2018 Shi e seus colaboradores realizaram teste integrando a tecnologia 5G-New Radio com o VLC, usando uma lâmpada LED comercial a uma distância de 55 cm

transformaram o enlace usando no 5G em um enlace em luz visível, usando Modulação por Chaveamento de Fase em Quadratura (QPSK, *Quadrature Phase- Shift Keying*) conseguindo uma taxa de transmissão de 14,4 Mbps [15].

Em 2019 Bian e seu time mostraram um experimento VLC usando codificação de correção de erros adiante (FEC, *Forward Error Correction*) formando um link de 1,6 m, e usando OFDM atingiu uma taxa 15,73 Gb/s. LEDs de cor única com baixo custo foram usados como fontes de luz e segundo os mesmo essa seria a velocidade mais alta anunciado para sistemas VLC baseados em LED [15].

Já em 2020 Wei e seus colaboradores demonstraram um sistema VLC usando luz branca sem filtro azul à base de fósforo e obtiveram uma taxa de 2,705 Gb/s para uma distância 1,5 m e com iluminação de 545 lux, e verificaram o despenho desse sistema quando deslocaram o receptor do eixo x para o y [15].

A crescente procura de dispositivos eletrônicos, juntamente com a capacidade dos dispositivos eletrônicos de se conectarem à rede, motivou a investigação de novas tecnologias sem fio que permitam suportar uma alta velocidade de dados. A Comunicação por VLC é considerada por muitos especialistas, como uma alternativa eficiente para futuras comunicações sem fio, uma vez que tem uma ampla faixa não licenciada em torno dos THz que ainda não é utilizada, além de estar na faixa do espectro visível que pode ser também utilizada como fonte de iluminação ambiente.

2.4 SURGIMENTO DO LI-FI - (*LIGHT FIDELITY*)

Desde do ano de 2000 que alguns estudos vêm sendo realizados sobre o VLC e entre estes podemos destacar um que usa lâmpadas de LEDs de luz branca para iluminação e transmissão de dados em ambiente interno, principalmente o que foi realizado por Tanaka et al em 2003. Após este experimento começaram a surgir muitos trabalhos envolvendo VLC e trazendo grandes inovações, como novas modulações e novas tecnologias de lâmpadas LEDs, inclusive a surgimento da tecnologia Li-Fi e com ela o surgimento da empresa PureVLC.

Em 2010, em uma pesquisa foi realizada na Universidade de Edimburgo e liderada pelo professor de Comunicações Móveis, Harald Haas. Em 2011, Haas tornou público o conceito de Li-Fi enquanto apresentava o seu primeiro TED (*TED - Technology, Entertainment and Design*), em que foi introduzida a ideia de “*wireless data from every light bulb*”, na tradução literal, “dados sem fio de cada lâmpada”. Neste mesmo evento, Haas também demonstrou a tecnologia já em funcionamento, transmitindo um vídeo através de uma lâmpada LED equipada com a tecnologia Li-Fi [16].

Harald Haas criador da tecnologia Li-Fi fundou a primeira empresa com foco em *Li-Fi* em 2012, a *pureVLC* e em setembro de 2013 foi lançado o primeiro produto da *pureVLC*, o *Li-1st*, a primeira tecnologia Li-Fi disponível no mercado, que fornecia uma conexão de mão dupla com a internet com uma velocidade de até 11.5 Mbps. Numa comparação do Li-Fi com a RF podemos dizer que ambas as tecnologias são equivalentes, contudo, Li-Fi usa as ondas de luz ao invés de sinais de rádio [17].

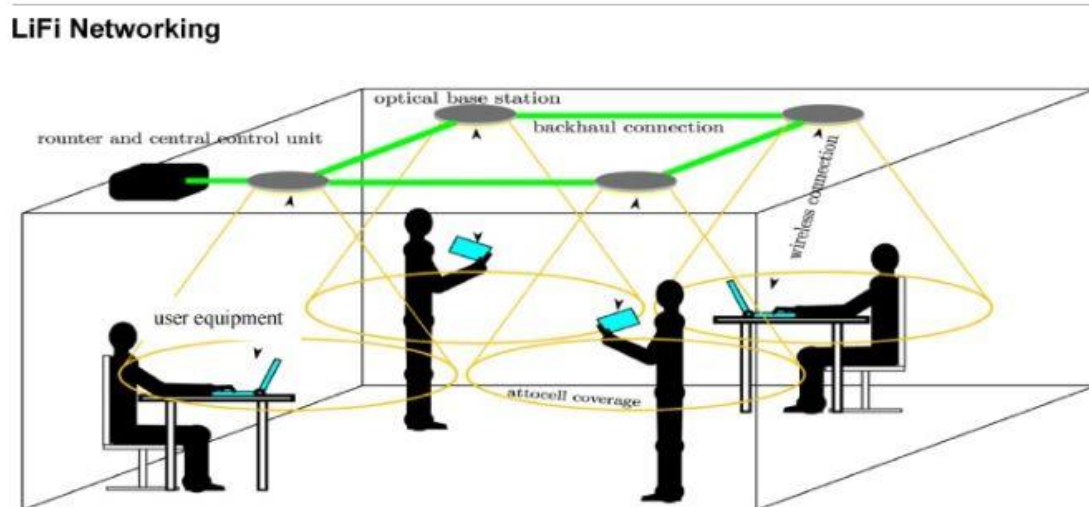
Já em janeiro de 2014, a *pureVLC* passou por uma reformulação de marca se tornando a *pureLiFi* e em dezembro deste mesmo ano completou o desenvolvimento de seu novo produto, o *Li-Flame*. O *Li-Flame* foi anunciado no Congresso Mundial de Comunicação Móvel (*Mobile World Congress*) em março de 2015 e representou um grande passo à onipresença de soluções de redes sem fio de alta velocidade utilizando Li-Fi, permitindo também que dispositivos móveis se conectassem [17].

A comunicação sem fio tornou-se tão útil e indispensável como a eletricidade e a água, além de usarmos todos os dias em casa ou em empresas sendo fundamental para nossas vidas. Nós transmitimos dados sem fios usando ondas eletromagnéticas em particular nas ondas de rádio, contudo, ondas de rádio são limitadas, escarças e caras, não

conseguido absorver a demanda de transmissão de dados sem fio, sendo ineficiente e com uso da banda do espectro de RF já quase todo comprometido .

Na Figura 6 mostramos um exemplo de rede Li-Fi e como atualmente a demanda por recursos em redes sem fio é altíssima e continuará por muito tempo em crescimento exponencial, tornando a tecnologia VLC, como uma das principais ferramentas de comunicação sem fio no mundo.

Figura 6 – Rede Li-Fi de Internet



Fonte [18], 2019

Podemos ver o VLC como uma alternativa para complementar a atual infraestrutura wireless da Internet. Novidades ainda estão por vir melhorando ainda mais a tecnologia que atualmente é amplamente estudada e já conta com grandes empresas e indústrias, como a Nasa, Disney e Philips que já tem pesquisas e produtos na área [14].

Então existe uma demanda cada vez maior de fluxo de dados em redes sem fio e o VLC pode complementar as tecnologias já existentes e consolidadas no mercado mundial, como o Wi-Fi e a RF, principalmente em ambientes internos, onde a maioria das pessoas tendem a ficar grande parte do tempo, além de proporcionar aos usuários segurança e menos interferência de fatores externos. Neste sentido a implementação de tecnologias VLC seria mais simples, pois utilizaria toda uma infraestrutura elétrica já existente.

Atualmente são incontáveis os dispositivos, como monitores, *smartphones* e automóveis que utilizam LEDs, além das lâmpadas convencionais nas residências, facilitando a implementação da tecnologia VLC, onde a mesma utiliza a luz de LED

desses dispositivos para realizar comunicação entre elas própria e a internet usando a luz visível branca. Tudo isso com a possibilidade de altíssimas taxas de dados proporcionada pelas frequências, na ordem de THz, que é outra grande motivação para estudos na área, pois a tecnologia Wi-Fi alcança, no máximo, taxas de até 300 Mbps [14].

Além disso, o infravermelho e ultravioleta que podem ser perigo para a saúde humana, já o espectro da luz visível não tem nenhum perigo ou restrição. Finalmente, sabemos que as ondas de rádio podem atravessar obstáculos como paredes, mas, uma rede sem fio convencional pode ser interceptada por invasores [14].

Podemos perceber que nos últimos anos houve o crescimento do interesse em sistemas VLC, então, devemos ressaltar que em paralelo a essa nova tendência, existem muitos estudos no sentido de aumentar o desempenho do Wi-Fi em redes *wireless* presentes atualmente como as redes locais sem fio (WLANs, *Wireless Local Area Network*), 4G e recentemente o 5G. Assim, o futuro desta área torna-se muito promissor, com o surgimento de muitos trabalhos sobre o assunto VLC de forma individual, bem como aqueles que integram esta tecnologia à outras existentes, como Wi-Fi. Recentemente surgiram temas abordando principalmente o desenvolvimento de sistemas híbridos que faz a integração do Wi-Fi e VLC. Surgiu então um sistema híbrido, o PLiFi (PLiFi, *Power Light Fidelity*) que é, cuja arquitetura une as tecnologias Wi-Fi e VLC, através do uso à comunicação pela linha eletrificada, o PLC (PLC, *Power Line Communication*) [14].

Ultimamente as lâmpadas incandescentes e fluorescentes estão sendo substituídas pelas lâmpadas de LED e essas lâmpadas, principalmente as LEDs de luz branca serão uma nova geração de fonte de luz, bem como, podem ser usadas como um ponto de acesso à internet tanto para *upload* como *download* de informações usando a tecnologia VLC. Ainda existem desafios a serem superados principalmente relativo ao upload de dados e a mobilidade celular [19].

Existe uma corrida para a implementação de VLC em futuras tecnologias sem fio, principalmente com o aparecimento 5G, pois a demanda por tecnologias que envolvem transmissão de dados sem fio vem crescendo exponencialmente e a tendência é continuar crescendo ainda por muitos anos, tudo isto para atender a demanda cada vez maior de dispositivos eletrônicos fixos ou móveis que surgem no mercado a cada dia, como *smartphones*, *tablets*, *smart TVs*, carros elétricos, *drones*, no transportes terrestres, aéreos e marítimos, além da IoT, que é uma ferramenta de controle e supervisão das chamadas cidades inteligentes. Neste sentido existe um esforço para se implementar a

comunicação por luz visível aos *smartphones* utilizando componentes como câmeras e leds externos e como a maioria desses dispositivos já são equipados com a câmera, e leds externos, o grande desafio seria adaptar os dispositivos sem nenhuma modificação no hardware, a fim de integrá-los em sistemas de comunicação por luz visível [14].

Na figura 8 vemos a implementação da tecnologia VLC em *smartphones* já existentes no mercado, apenas introduzindo uma antena Tx e Rx com capacidade de conectividade ótica em Gigabits que torne possível a comunicação entre o dispositivo e a rede VLC, provendo muita segurança na comunicação [20].

Figura 7 – Antena óptica para integração dispositivos móveis



Fonte [20], 2013

2.5 COMPARATIVO ENTRE WI-FI E LI-FI

Tanto o Wi-Fi quanto o Li-Fi são tecnologias de transmissão de dados sem fio. O Li-Fi pode ser considerado uma evolução do Wi-Fi e isso se deve especialmente à forma de transmissão de dados. Contudo, na operação de uma rede Wi-Fi se utiliza frequências de rádio, ao passo que a transmissão por Li-Fi é realizada por meio de luz visível, luzes ultravioletas e luzes infravermelhas que apresentam uma frequência bem superior as frequências de rádio e com o envio e o recebimento de dados dentro de um mesmo ambiente[21].

Na realidade, o Wi-Fi necessita de um roteador para fazer a transição dos dados de um equipamento para outro enquanto o Li-Fi usa LEDs que podem não só fazer a transmissão de dados, como também iluminar os ambientes. É como se as lâmpadas virassem roteadores[21].

As redes Li-Fi podem operar em frequências mais altas são menos sujeitas a interferências, oferecendo um sinal mais estável. Além disso, essas redes podem ser consideradas mais seguras, diminuindo ataques e chances de invasões. Por serem menos sujeitas a interferências, elas são ideais para o uso em hospitais, aviões e quaisquer ambientes onde a qualidade do sinal seja um fator fundamental[21].

Quanto a velocidade na transmissão as redes Wi-Fi modernas conseguem atingir apenas 1.200Mb/s, ao passo que as redes Li-Fi já atingem a marca de 224Gb/s[21].

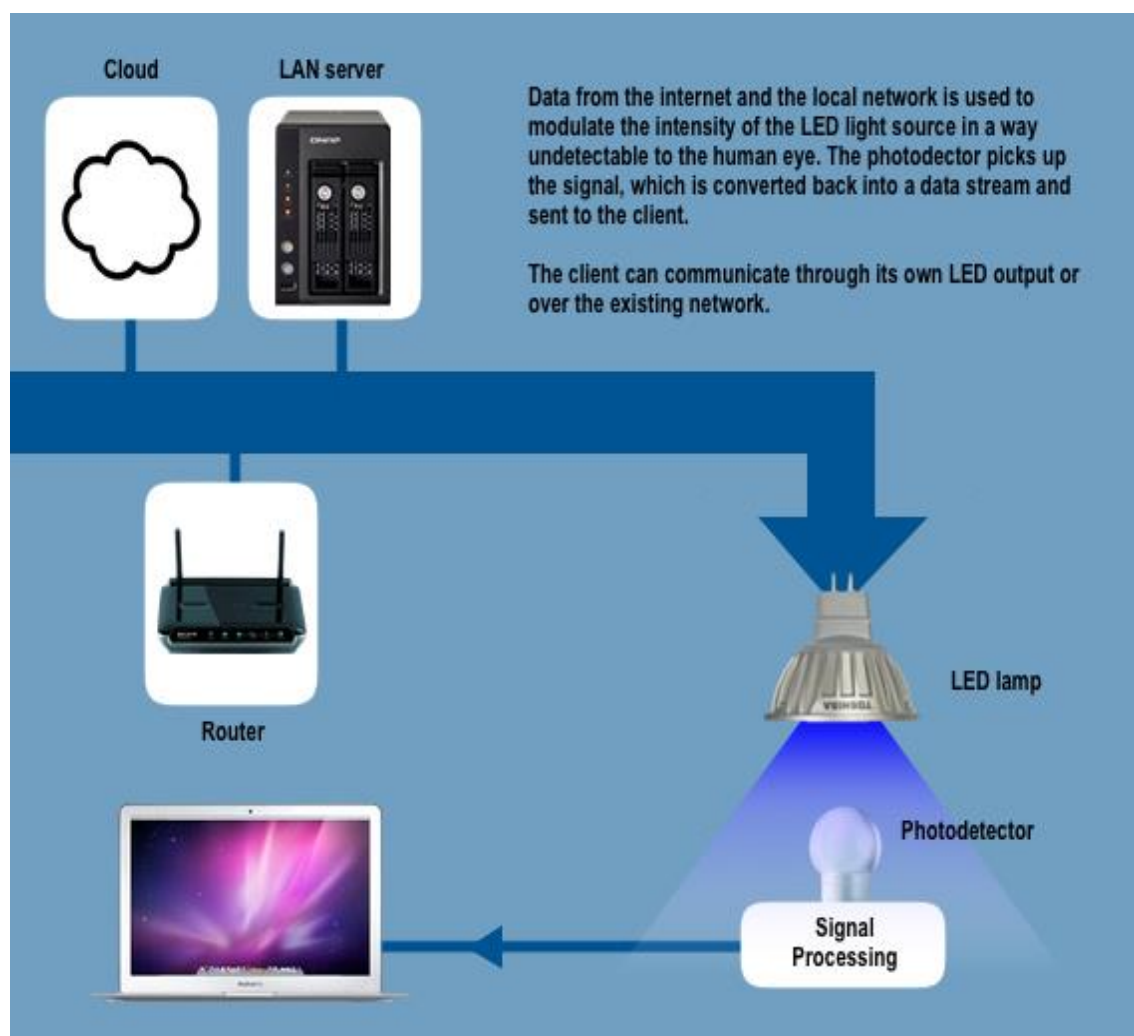
As principais vantagens do Wi-Fi são em regiões em ocorrem quedas de luz com frequência, além de ter uma maior área de alcance, podendo atravessar paredes e obstáculos ainda que com uma certa perda de eficiência. Como o Wi-Fi pode funcionar sem o acionamento de luzes (lâmpadas e LEDs), o que pode resultar em economia de energia[21].

Quanto à implantação da rede, a rede Li-Fi torna-se mais caro, devido ao fato de precisar de LEDs ou lâmpadas adaptadas para os ambientes de operação da rede, além de serem mais caras devido à baixa produção neste atual momento[21]. Na realidade a tecnologia usa lâmpadas para transmitir dados, com a estratégia de usar e permanecer em dois estados: apagada ou acesa, exatamente como o bit, que pode apenas assumir valores “0” e “1”, ou seja, simplesmente ligando e desligando uma lâmpada a transmissão e recepção de dados pode ser feita. Contudo, o processo é tão rapidamente realizado que se torna imperceptível ao olho humano. Na figura 8 temos uma noção de funciona a rede Li-

Fi e como a luz é recebida por um fotodetector, que será responsável pela transformação da luz em informações[22].

A Figura 8 temos uma visão simplificada de funcionamento de uma rede Li-Fi. Os dados da Internet da rede local são modulados através de uma modulação intensiva pela fonte que é uma lâmpada de LED de modo imperceptível pelo olho humano. Um foto detector é colocado do lado do dispositivo receptor (um *tablet*, um *laptop*, um celular) que recebe o sinal de luz da fonte, transformando esse sinal em sinais de tensão e conseqüentemente em sinais de corrente que tratado na recepção reconstrói o sinal original.

Figura 8 – Como funciona uma rede Li-Fi.



Fonte [22], 2012

O Quadro 3 mostra as principais diferenças entre as tecnologias Wi-Fi e Li-Fi.

Quadro 3 – *Comparativo entre Li-Fi x Wi-Fi*

Diferenças entre	Li-Fi	Wi-Fi
Transferir dados por	Luz	RF
Frequência de operação	10.000 x a f. de RF	2.4Ghz, 4.9Ghz e 5Ghz
Ultrapassar barreiras	Não	Sim
Segurança	Mais seguro	Menos seguro
Interferências	Tem, mas não afeta o sinal enviado	Tem, mas, pode afetar o sinal enviado
Velocidade	224Gb/s	867Mb/s

Fonte [22], 2012

Como vimos até aqui o Li-Fi transfere dados eletromagneticamente sem fio usando o espectro de luz visível produzidas por lâmpadas LEDs em velocidades muito altas pela emissão de pulsos de luz que não são detectáveis ao olho humano por apresentarem uma frequência muito alta. Os receptores, também conhecidos como fotodetectores, coletam informações e interpretam os dados transmitidos. Mas a principal diferença é que o Wi-Fi usa ondas de rádio e o Li-Fi usa luz visível para transferir dados [23].

Quanto a eficiência energética o Li-Fi como usa apenas um LED (que funciona também como fonte luminoso ambiente) e fotodiodos receptores para a recepção de dados requerendo uma quantidade de energia bem menor que a usada por um sistema de RF do Wi-Fi, onde exige no mínimo dois rádios para a transmissão dessas ondas eletromagnéticas, onde esses rádios se comunicam entre si por meio de transmissores de RF e um chip de banda base instalado dentro de cada rádio, consumindo muita energia apenas para discernir os sinais de ruídos de outros dispositivos que possam estar usando a mesma frequência de operação [23].

Um limitação da tecnologia Li-Fi em relação ao Wi-Fi é a área de cobertura, pois, a área de cobertura do Li-Fi que é aproximadamente 12m e está limitada ao ambiente onde o LED está instalado, não pode ter barreiras entre transmissor e receptor.

Já o Wi-Fi pode efetuar transmissões em uma área de até 32m, mesmo com barreiras e com atenuação do sinal e conexão mais lenta consegue realizar transmissão de sinais a maiores distâncias que o Li-Fi [23].

Na Figura 9, vemos *download* e *upload* entre lâmpada LED e um computador usando Li-Fi.

Figura 9 – Li-Fi –(*Light Fidelity*) - Dispositivo transmitindo e recebendo dados pela luz de LED



Fonte [23], 2020

Quanto ao Wi-Fi uma de suas maiores vulnerabilidades em relação ao Li-Fi consiste quando temos grande densidade ou volume de dados a serem transmitidos provocando congestionamento nas redes Wi-Fi, o que não acontece nas redes Li-Fi que pode operar com um volume bem maior de dados que o das redes Wi-Fi, podendo operar em altas velocidades mesmo com vários usuários.

Concluindo, não podemos descartar o fato que o Wi-Fi teve e ainda tem um papel importante melhoria e qualidade de produtos e serviços *wireless* mas, que vem perdendo espaço devido a fatores que incluem congestionamento, velocidade de transmissão, limitações de uso devido à interferência e saturação da largura de banda, o que expõe claramente as deficiências desta tecnologia existente e a necessidade de melhorias com o uso do Li-Fi que pode oferecer inúmeros benefícios em relação a tecnologia atual.

2.6 OUTRAS APLICAÇÕES

Atualmente existem muitos grupos e empresas desejando participar das vantagens e benefícios que a tecnologia do VLC pode ofertar para consumidores e investidores, por isso em 2014, os primeiros investidores e pioneiros da Li-Fi, a PureLiFi uniram forças com a empresa de iluminação francesa Lucibel para produção e lançamentos de produtos habilitados que usem a tecnologia Li-Fi [23].

A PureLiFi já produz uma unidade de teto Li-Fi para conectar a uma luminária LED e Li-Fi-XC que é um dispositivo para se conectar via USB a outro equipamento ou *hardware*, podendo fornecer cerca de 43 Mbps de cada Li-Fi LED habilitado. Essa conectividade fornece dados em alta velocidade e em grandes volumes. Isto permite uma integração com a IoT proporcionando um enorme campo de aplicações e oportunidades para consumidores e pequenos e grandes investidores [23].

A Philips, empresa e marca consagrada e conhecida no mercado da iluminação também fez investimentos em Li-Fi, agora está oferecendo serviços Li-Fi completos e integrados, incluindo produtos LED e Li-Fi [23].

Em 2016, em Dubai, o Li-Fi foi testado pelo provedor de telecomunicações dos Emirados Árabes Unidos Du e Zero1 onde obteve-se sucesso nas transmissões de *streaming* de áudio e vídeo pela internet [23].

O Li-Fi pode substituir com inúmeras vantagens o Wi-Fi, principalmente quanto ao volume de dado transmitido e a velocidade de transmissão. Uma pequena loja na França já está usando o Li-Fi para rastrear a localização de seus clientes pela loja, oferecendo-os cupons e descontos em seus produtos e serviços [23].

Uma gigante do mercado, a Apple iniciou o uso do Li-Fi e prevê que esta tecnologia, que é cem vezes mais rápida que o Wi-Fi e em seus relatórios sugerem a produção de futuros *iPhones* com recursos Li-Fi no futuro bem próximo [24].

Em 2013, a Apple fez o pedido de patente de um sensor de modulação óptico para imagens, que seria usado nas câmeras do *iPhones* para transmissão de dados por luz, e essa tecnologia poderia ser usado com o Li-Fi [24].

Entre as inúmeras possibilidades de aplicações e criações de produtos usando a tecnologia VLC, como uso do Li-Fi, pode-se mencionar o controle e monitoramento de sistemas de controle de tráfego, ou até a substituição total dos serviços de RF em empresas químicas, onde o risco de explosões devido a faísca usando as antenas da tecnologia de RF é frequente e real. Isto pode ser estendido para o uso em instrumentos médicos e

hospitalares. Na Figura 10, vemos a anuncio da Apple sobre os testes realizados com o Li-Fi [24].

Já existem pesquisas e produtos de como acessar o Li-Fi mesmo com as luzes desligadas, de maneira a torna possível o acesso a internet ou outros produtos e serviços no escuro. Descobertas recentes demonstraram que LEDs com emissão de pulsos sem serem totalmente energizadas, no escuro, seriam suficientes para transmissão e recepção de dados e quando totalmente energizadas forneceria além de luz ambiente o serviço Li-Fi [25].

De acordo com a pureLiFi, se toda a energia de um LED estiver desligada não teremos o Li-Fi, contudo, a tecnologia Li-Fi pode ser habilitada de modo suficiente para que um ambiente pareça escuro e ainda assim continue transmitindo dados. Atualmente a empresa já fornece serviços de comunicação com níveis de luz em torno de 60 lux, que comparado ao padrão britânico, onde o nível mínimo de luz para leitura é 400 lux. Mas existem outras possibilidades para uso invisível do espectro de luz, como o infravermelho que é utilizado para reenvio de informações de *upload* para a lâmpada de LED [25].

3 – MATERIAIS DOS EXPERIMENTOS

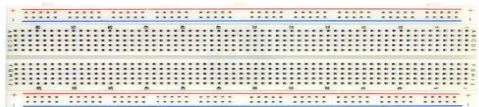
3.1 – SINAL DE ÁUDIO

Circuito Transmissor do sinal de áudio:

1. Celular que possa reproduzir quaisquer sons ou ligações.
2. Cabo P2 adaptado para saída mono de áudio
3. Protoboard 400 - Modelo: ABS 83mm x 55mm x 10 mm
4. Fonte Ajustável para Protoboard - Entrada: 5V por cabo USB ou de 7V a 12V pelo conector de fonte externa e tensão regulada de saída: 5V ou 3,3V
5. Mini Laser 650nm - 5V, 5mw, 40mA, 15mm x 6mm.
6. Fonte AC - Entrada: 100-240V – 50/60Hz, Saída: 6V

O Quadro 4 mostra os dispositivos usados no circuito transmissor do experimento de transmissão e recepção de sinal de áudio pela luz.

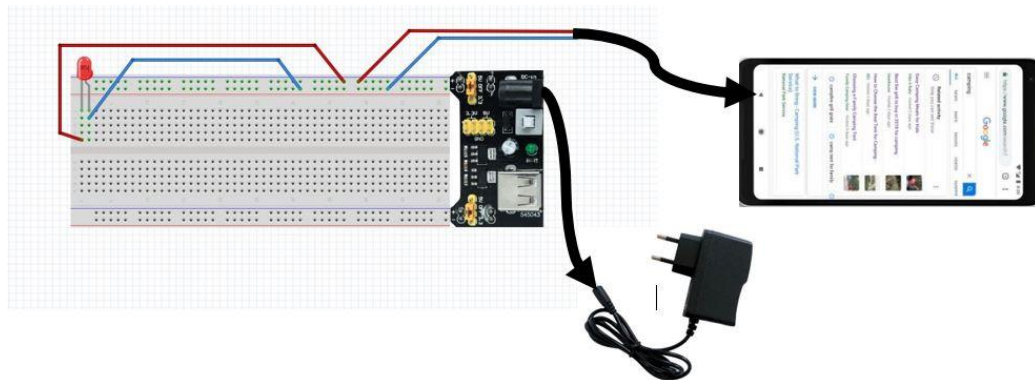
Quadro 4 – Dispositivos usado do circuito transmissor do experimento 3.1

Celular	Fonte sonora	
Cabo P2	Adaptado para saída mono de áudio	
Protoboard	Agrupar componentes	
Fonte	Ajustável para Protoboard para ligar e desligar a fonte de 5V	
Mini Laser 650nm	5V, 5mw, 40mA, 15mm x 6mm	
Fonte AC - 6V	Entrada: 100-240V – 50/60Hz, Saída: 6V	

Fonte Própria - 2022

A Figura 9 mostra o esquemático do circuito de transmissão de sinal de áudio usando luz.

Figura 10 – *Esquemático do circuito de transmissão de sinal de áudio*



Fonte Própria - 2022

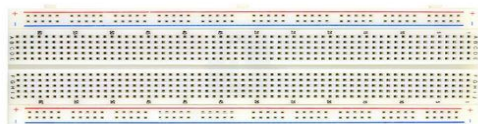
O cabo P2 ou P3 foi adaptado para mono, onde um dos fio é conectado diretamente no canhão de laser e o outro na fonte de 5V da fonte ajustável. A fonte ajustável é usada para ligar ou desligar a fonte que alimenta o laser e a protoboard serve para conexão dos dispositivos.

Circuito receptor do sinal de áudio:

1. Protoboard 830 - Modelo: MB-102 165mm x 57mm x 10mm
2. Mini Placa Pannel Solar Fotovoltaico – Tensão: 5V e corrente: 65mA - Potência: 325mW
3. Mini-speaker modelo: WS-887
4. Cabo P2 macho nas duas pontas
5. Receptor de cabo P2 fêmea

O Quadro 5 mostra os dispositivos usados no circuito receptor do experimento de transmissão e recepção de sinal de áudio pela luz.

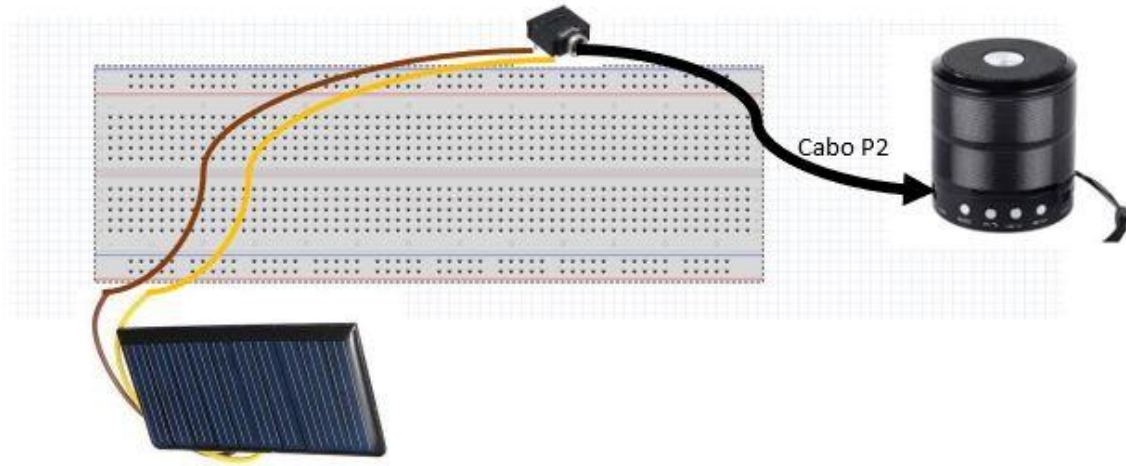
Quadro 5 – Dispositivos usado do circuito receptor do experimento 3.1

Protoboard	Agrupar componentes	
Mini Placa Pannel Solar Fotovoltaico	Tensão: 5V e corrente: 65mA - Potência: 325mW	
Mini-speaker	modelo: WS-887	
Cabo P2	macho nas duas pontas	
Receptor de cabo P2 fêmea	Receptor fêmea	

Fonte Própria - 2022

A Figura 9 mostra o esquemático do circuito de transmissão de sinal de áudio usando luz.

Figura 11 – Esquemático do circuito de recepção de sinal de áudio



Fonte Própria - 2022

Os fios conectores da placa solar são conectados diretamente a uma das extremidades do cabo P2 através do receptor fêmea de cabo P2 na protoboard e a outra extremidade do cabo P2 na caixa amplificadora *mini-speaker* WS-887.

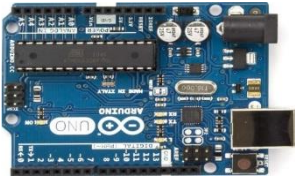
3.2 – TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO DE UM DADO (*STRING*) ENTRE MICRO PROCESSADORES

Circuito Transmissor de dados (*String*) entre dois microprocessadores:

1. Microcontrolador Arduino Uno ATMEGA328P
2. Mini Laser 650nm - 5V, 5mw, 40mA, 15mm x 6mm
3. Laptop LG para transmissão e programação do Arduino
4. Cabo conector USB Arduino

O Quadro 6 mostra os dispositivos usados no circuito transmissor do experimento de transmissão e recepção de dados (*Strings*) pela luz.

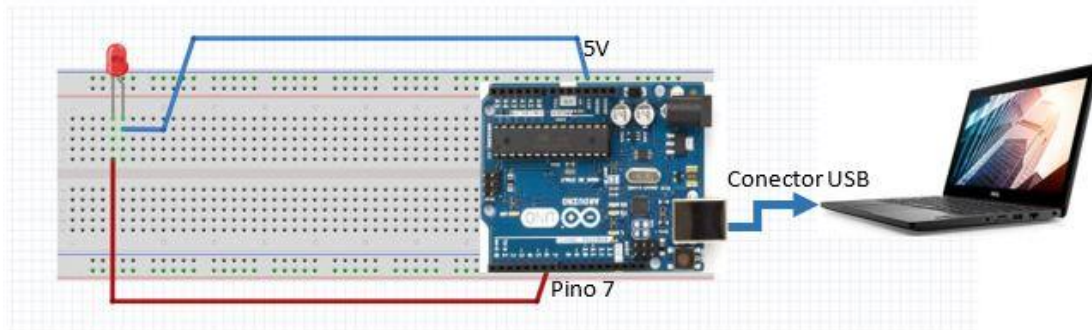
Quadro 6 – Dispositivos usado do circuito transmissor do experimento 3.2

Microcontrolador Arduino	Uno ATMEGA328P	
Mini Laser 650nm	5V, 5mw, 40mA, 15mm x 6mm	
Laptop LG	Laptop usado para transmissão e programação do Arduino	
Conector USB	Usado para programação e alimentação da placa UNO pelo laptop	

Fonte Própria - 2022

A Figura 12 mostra o esquemático do circuito de transmissão de sinal de dados (*String*) entre dois microprocessadores usando luz.

Figura 12 – Esquemático do circuito de transmissão de dados (*String*) entre 02 microprocessadores



Fonte Própria - 2022

Os fios conectores do canhão de *laser* são conectados um ao pino de alimentação do laser de 5V e o outro no pino digital 7. O cabo USB que conecta o microprocessador Arduino ao laptop serve tanto como alimentação como para realizar a programação e download do programa do laptop para o microprocessador Arduino.

Circuito receptor de dados (*String*) entre dois microprocessadores:

1. Microcontrolador Arduino Uno ATMEGA328P
2. Mini Placa Paine Solar Fotovoltaico – Tensão: 5V e corrente: 65mA - Potência: 325mW
3. Laptop LENOVO para recepção e programação do Arduino
4. Cabo conector USB Arduino

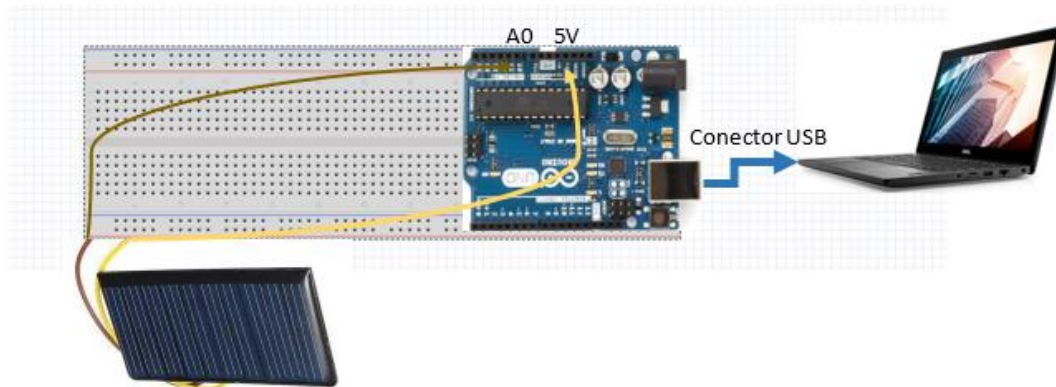
Quadro 7 – Dispositivos usado do circuito receptor do experimento 3.2

Microcontrolador Arduino	Uno ATMEGA328P	
Mini Placa Paine Solar Fotovoltaico	Tensão: 5V e corrente: 65mA - Potência: 325mW	
Laptop LG	Laptop usado para transmissão e programação do Arduino	
Conector USB	Usado para programação e alimentação da placa UNO pelo laptop	

Fonte Própria - 2022

A Figura 13 mostra o esquemático do circuito de recepção de sinal de dados (*String*) entre dois microprocessadores usando luz.

Figura 13 – *Esquemático do circuito de recepção de dados (String) entre 02 microprocessadores*



Fonte Própria - 2022

Os fios conectores da placa solar são conectados um ao pino de alimentação do laser de 5V e o outro no pino analógico A0, que realiza a leitura analógica da luminosidade sobre a placa solar. O cabo USB que conecta o microprocessador Arduino ao laptop serve tanto como alimentação como para realizar a programação e download do programa do laptop para o microprocessador Arduino.

3.3 – ACIONAMENTO DE CARGA POR LUZ

Circuito para acionamento de carga por luz:

1. Arduino nano v3
2. Suporte Shields para Arduino nano v3
3. Resistor dependente da luz (LDR - *Light Dependent Resistor*)
4. Relê de potência para acionamento de cargas de alta potência
5. Carga usada: Refletor LED *slim* 800 lumens 10W bivolt 6500K luz branca
6. Cabo conector USB

O Quadro 8 mostra os dispositivos usados no acionamento de carga.

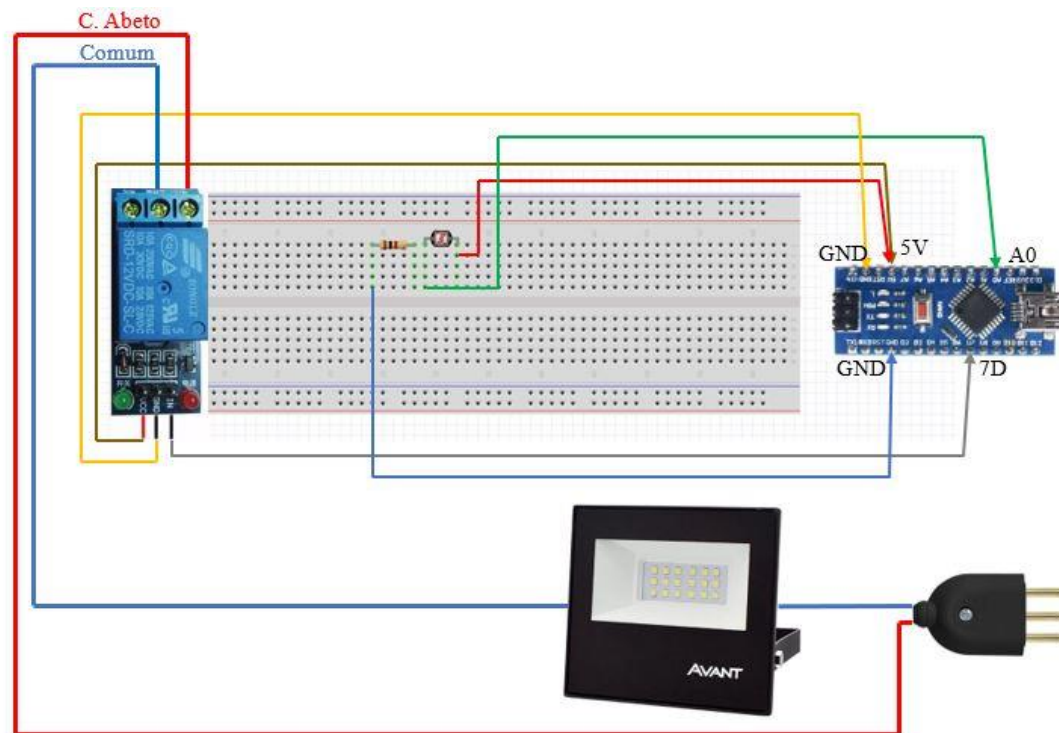
Quadro 8 – Dispositivos usado do circuito de acionamento de carga pela luz 3.3

Arduino nano v3	nano v3	
Shields para Arduino nano v3	Suporte para Arduino nano v3	
LDR	Resistor dependente da luz	
Relê	para acionamento de cargas de alta potência	
Refletor LED <i>slim</i> 800 lumens 10W bivolt 6500K luz branca	Refletor Avant usado como carga	
Cabo conector nano v3	Serve para alimentação e programação do placa nano	

Fonte Própria - 2022

A Figura 14 mostra o esquemático do circuito de acionamento de carga por luz usando um microprocessador nano V3.

Figura 14 – Esquemático do circuito de acionamento de carga por luz



Fonte Própria - 2022

O relê tem conexão com o Arduino pelos pinos VCC (Fio marrom), GND(Fio amarelo) e IN(Fio cinza) com os respectivos pinos no Arduino: 5V(Fio marrom), GND(Fio amarelo) e pino digital 7D(Fio cinza). A carga é conecta pelo lado da bobina do relê, que é o lado de potência, através dos conectores comumente aberto e juntamente com o comum são conectados a alimentação elétrica. O acionamento do relê ocorre pelo estímulo de luz no LCD que ao acionar a bobina de potência aciona a carga.

4 – EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Aqui descrevemos passo a passo os procedimentos dos experimentos realizados demonstrando a funcionalidade da tecnologia VLC com três aplicações: 1. Transmissão e recepção de um sinal de áudio, 2. Transmissão e recepção de um dado (*String*) entre dois microprocessadores, 3. O acionamento de uma carga por uma fonte de luz e 4. Dois experimentos que demonstram a independência dos raios luminosos, um com sinal de áudio e outro com transmissão de *String* com o cruzamento de sinais.

4.1 TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE UM SINAL DE ÁUDIO

A proposta aqui é fazer a transmissão e recepção de um sinal sonoro usando como fonte e transmissor de áudio, um celular conectado a um canhão de *laser* por meio de um cabo P2 que fazem a modulação do sinal sonoro digital de acordo com a corrente elétrica vinda celular através do cabo P2, transformando essa pulsação ou excitação elétrica em pulsos de luz que são transmitidos pelo ar através do canhão de *laser* e são recebidos por uma placa solar conectada a um outro cabo P2 e a uma caixa amplificada de som, onde os pulsos de luz aqui recebidos produzem pulsos de tensão e consequentemente em corrente elétrica novamente, que ao passar por um amplificador na caixa de som o sinal elétrico é convertido novamente em um sinal de onda sonora mecânica reproduzindo o sinal de áudio que fora transmitido.

O sinal de áudio ao invés de sair pela caixa de som do celular é transmitido via cabo P2 diretamente ao laser conectado, fazendo com que a luz do laser ser modulada e transmitida de acordo com o sinal de áudio (sinais elétricos) que está sendo gerado no celular.

Na fonte transmissora, o celular está sintonizado em uma estação de rádio e conectado a *protoboard* pelo cabo P2 adaptado, onde um dos conectores (cor azul) é o terra do P2 e os outros dois fios conectores são conectados formando uma saída mono.

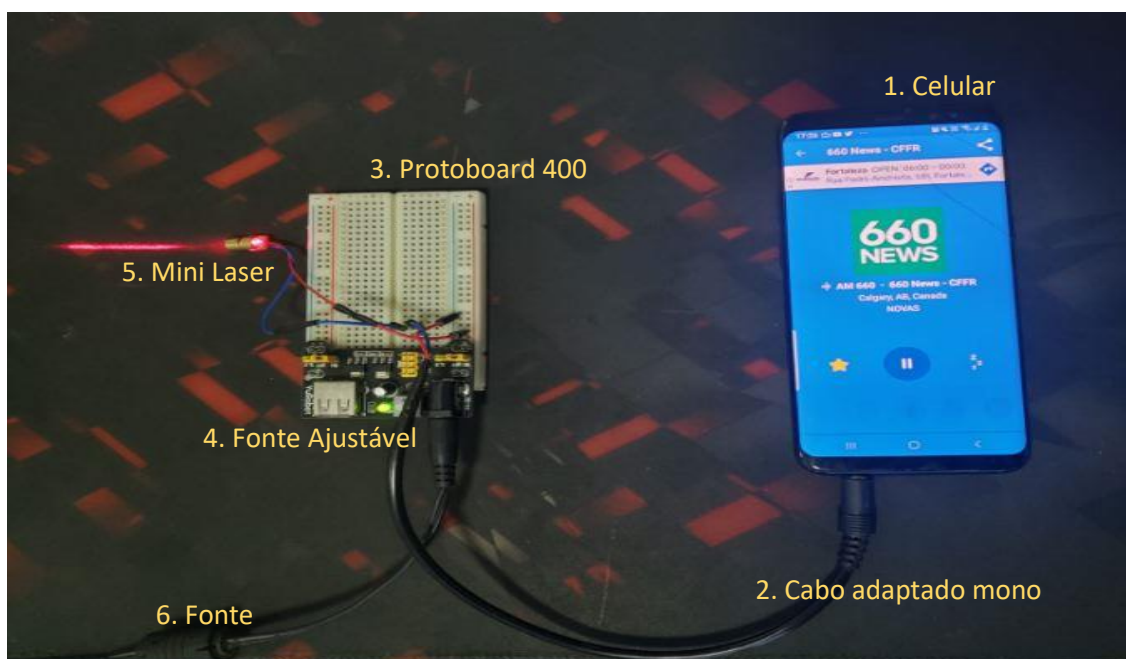
Um dos fios do cabo P2 (cor vermelha) liga-se ao terminal negativo da fonte ajustável (5V ou 3V) e o outro fio (na cor azul) vai conecta-se ao diodo laser. Do diodo laser sai outro fio (na cor vermelha) conectando-se diretamente ao positivo da fonte ajustável (5V).

A fonte ajustável de tensão é conectada a fonte que fornece ou excita o canhão de laser com uma tensão de 6V. Esta fonte ajustável possui uma chave liga desliga para

acionamento do circuito. No celular, quando os áudios digitais nos arquivos digitais ou nos *streams* de Internet são reproduzidos, o sinais digitais são convertidos em sinais elétricos analógicos que excitam o canhão de laser através do cabo P2, modulando e transmitido a luz emitida pelo laser.

Na Figura 15 temos o sistema transmissor de sinal de áudio.

Figura 15 – Circuito Transmissor de sinal de Áudio



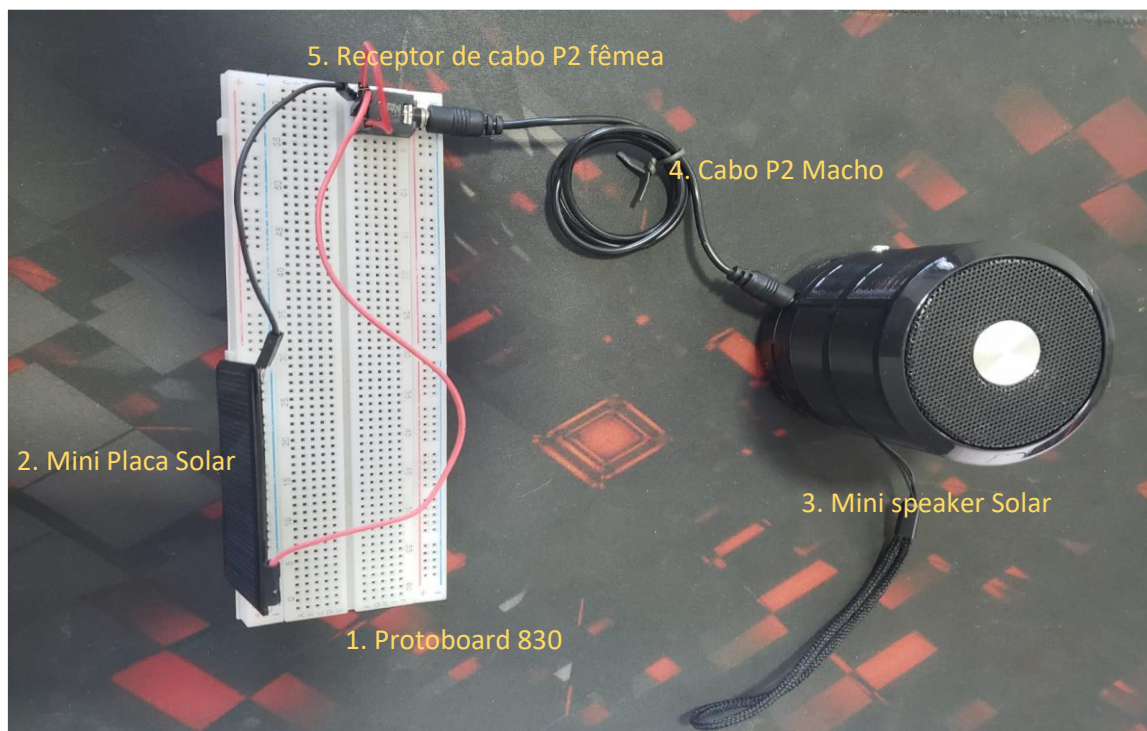
Fonte [Própria autoria], 2022

Já na parte de recepção a mini placa solar está conectada diretamente ao receptor de cabo fêmea P2 e este ao cabo P2 macho em uma de suas extremidades e na outra está a caixa de som.

Os raios luminosos ao atingirem a placa solar produzem um sinal de tensão e consequentemente uma corrente que excita o cabo P2 conectado a uma caixa de som amplificada, que amplificando o sinal de corrente analógico excita e vibra a membrana da caixa de som transformando o sinal elétrico em sinal mecânico excita um diafragma ou membrana e este o ar reproduzindo o sinal sonoro original emitido.

Na Figura 16 mostramos o sistema receptor do sinal sonoro.

Figura 16 – Circuito Receptor de sinal de Áudio



Fonte [Própria autoria], 2022

Foram realizados três experimentos para a transmissão de áudio entre a fonte transmissora e receptora com distâncias diferentes, onde na primeira transmissão foi usada a distância de 0.50m, na segunda 5m e na terceira 10m entre o canhão de laser e a placa receptora.

Observou-se que em todas as distâncias usadas houve uma recepção perfeita do áudio transmitido e a luminosidade ambiente não teve influência nas transmissões-recepções, ou seja, foram realizados tais transmissões com luzes acesas e pagadas no ambiente de transmissão, contudo a recepção do áudio transmitido foi realizada perfeitamente sem nenhum tipo de interferências.

Devemos ressaltar aqui que as experiências acima citadas foram realizadas sem nenhum tipo de obstáculo entre a fonte transmissora e receptora, ou seja, sem nenhum obstáculo que barrasse o raio de laser entre o canhão de laser e a placa receptora.

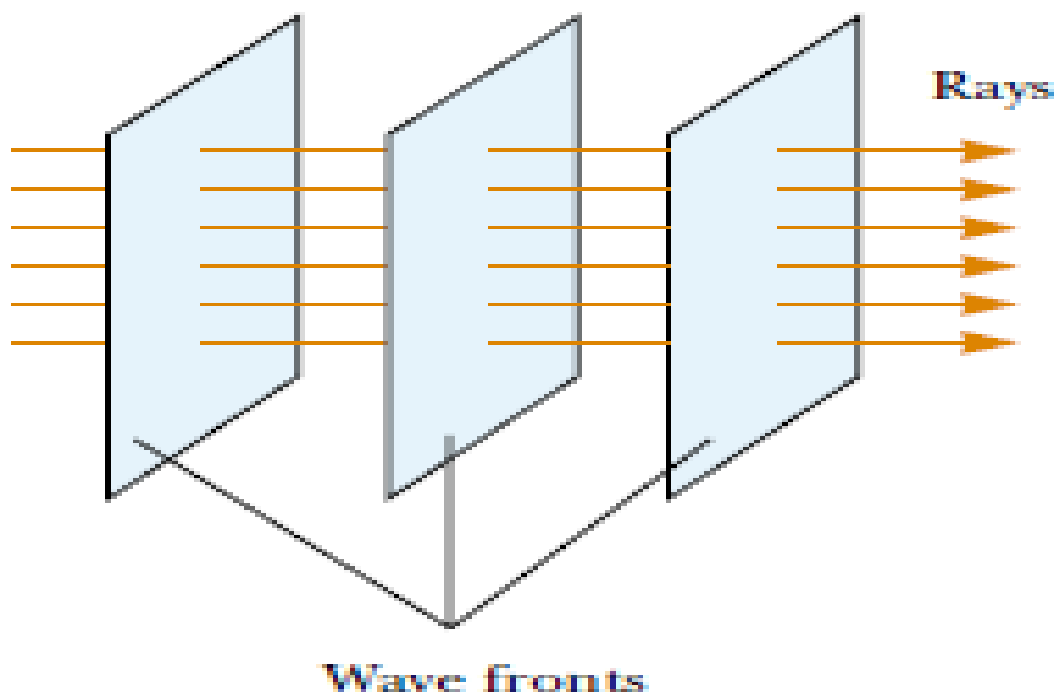
Contudo, pensando-se na possibilidade de haver alguma implementação em se observasse obstáculo em linha reta entre transmissor e receptor, realizamos um experimento utilizando espelhos para direcionar o raio do transmissor ao receptor numa situação que os mesmos não estivessem visíveis um ao outro em linha reta. Neste caso,

o fenômeno óptico da reflexão e o princípio da reversibilidade dos raios luminosos são utilizados, onde a trajetória seguida pelo raio de luz, em um sentido, é a mesma trajetória quando o raio de luz em sentido contrário ou sentido de percurso inverso [26][27].

Foram realizadas também duas transmissões simultâneas onde o raio de transmissão do primeiro sistema transmissor-receptor cruzava-se com o outro raio de transmissão do segundo sistema transmissor formando um ângulo de 90° entre os mesmos. Observou-se que tanto no primeiro sistema de transmissão-recepção quanto no segundo a recepção dos áudios transmitidos foram realizados sem nenhum tipo de problema ou interferência, constatando o princípio da independência dos raios luminosos, que diz: “Quando dois raios de luz ou feixes de luz se cruzam, continuam suas trajetórias individualmente e um raio não interfere na trajetória de outro” [27][28].

Na figura 17 mostra-se que em ótica geométrica um raio de luz (feixe) se propaga em linha reta como um raio retilíneo [27].

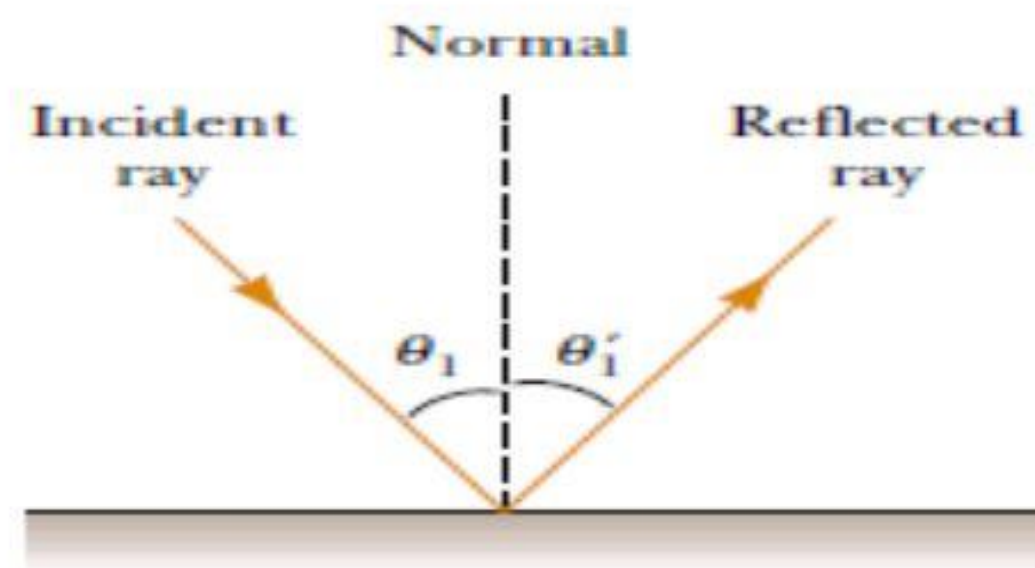
Figura 17 – *Princípio óptico da propagação dos raios luminosos*



Quando um raio incide sobre uma superfície de outro material não transparente, o raio é refletido [27]. A lei da reflexão é dada por $\theta_1' = \theta_2$ também conhecida como Lei de Snell para a reflexão. O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência, como mostra a Figura 18. Quando o raio encontra um material transparente diz-se que o raio é refratado [27].

A Figura 18 mostra a reflexão de um raio luminoso.

Figura 18 – Princípio óptico da reflexão e da reversibilidade dos raios luminosos



Fonte[27], 2004

Um dos fenômenos mais importantes para o estudo do comportamento da luz é o da interferência na qual estão relacionadas com a superposição entre as ondas. Para observação do fenômeno da interferência entre duas ondas é necessário:

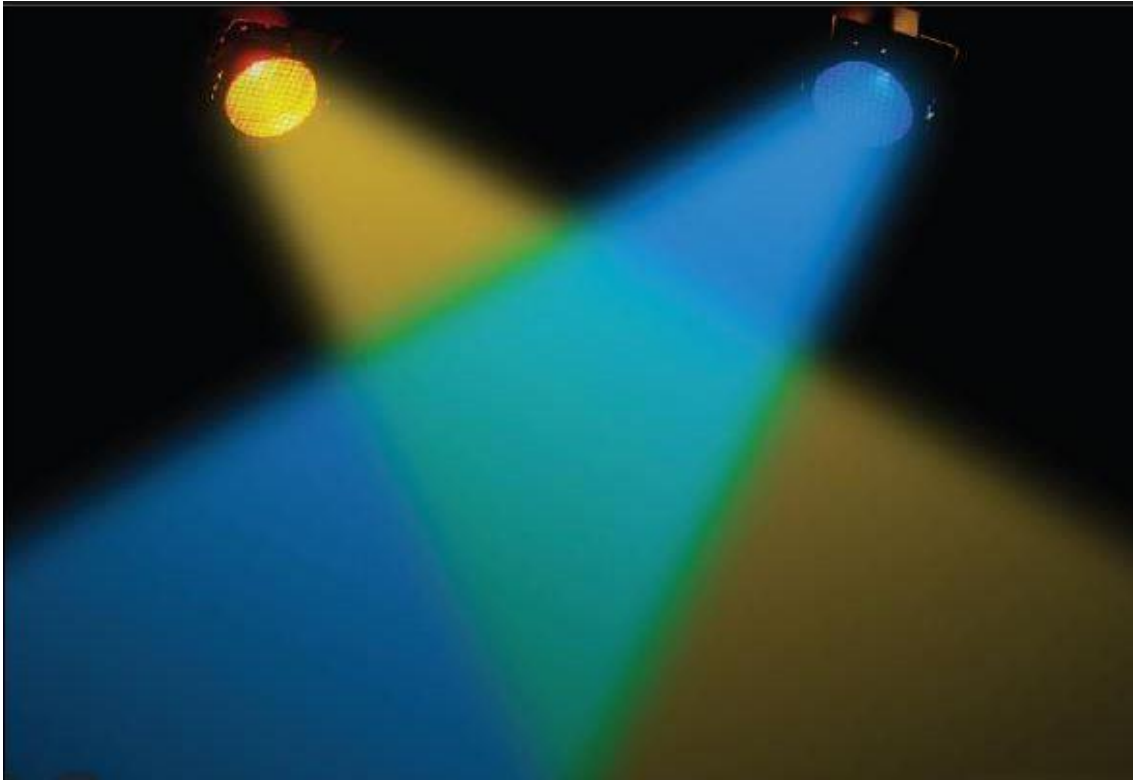
1. que as fontes da radiação luminosa sejam coerentes ou seja mantenham a diferença de fase entre elas
2. que as ondas tenham mesmo comprimento de onda (mesma frequência).

Caso estas condições não forem satisfeitas a interferência não será observada.

Por exemplo, se duas fontes de feixes de luz não coerentes se cruzarem ortogonalmente o fenômeno de interferência não será observado visualmente, pelo fato dos feixes serem incoerentes [28].

A Figura 19 mostra a interseção entre raios luminosos de comprimentos de ondas de diferentes, na área de interseção dos raios luminosos azuis com os de cor amarela forma-se uma região de cor esverdeada, contudo, a trajetória dos respectivos raios azuis e amarelos não são afetados, bem como a informação que eles transmitem não são afetadas devido a esse cruzamento.

Figura 19 – *Princípio da Independência dos Raios Luminosos*



Fonte[26], 2022

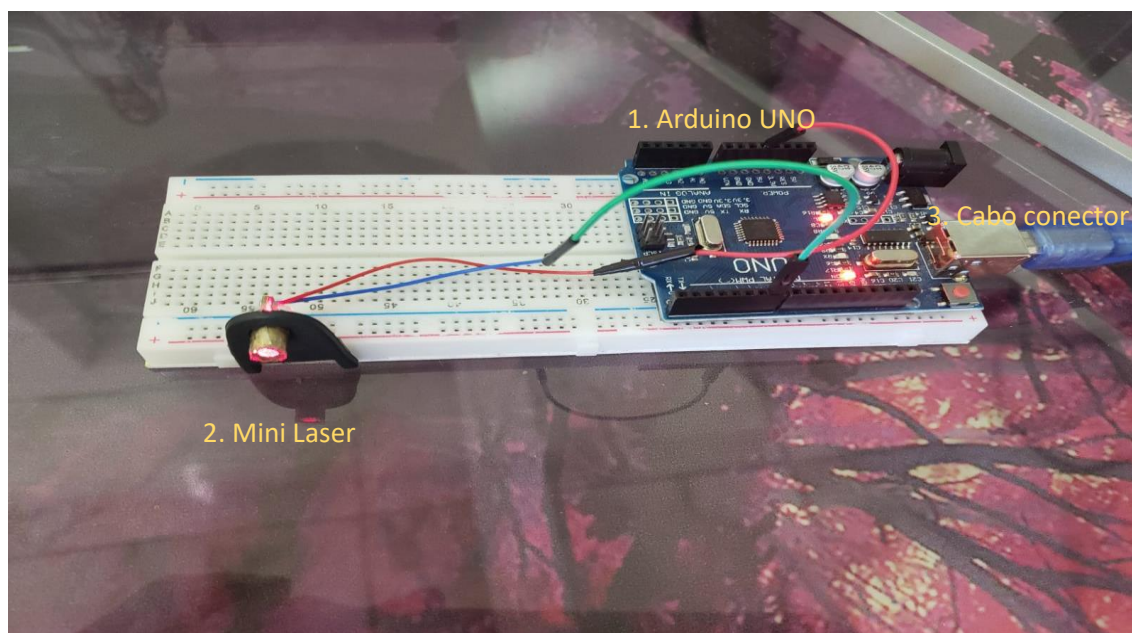
4.2 TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE DADOS (*STRING*) ENTRE MICROPROCESSADORES

A proposta agora é realizar a transmissão de uma palavra em código ASCII entre dois microprocessadores, demonstrando a flexibilidade da utilização e funcionalidade da tecnologia VLC que pode aliar-se a outros dispositivos para aumentar suas funcionalidades. Realizamos este experimento para demonstrar que o VLC pode ser utilizado com a IoT que usa muitos sensores e microprocessadores na automatização de processos e serviços e nas *smart cities*.

Abrimos a interface de comunicação entre o computador e o Arduino, onde se encontra o programa que será executado no Arduino. Nesse programa digitamos a frase (*String*) que deverá ser transmitida entre os dois Arduinos usando a luz.

A Figura 16 mostra o lado transmissor ou sistema transmissor da *String* entre dois Arduinos.

Figura 20 – Circuito Transmissor de Strings entre Arduinos

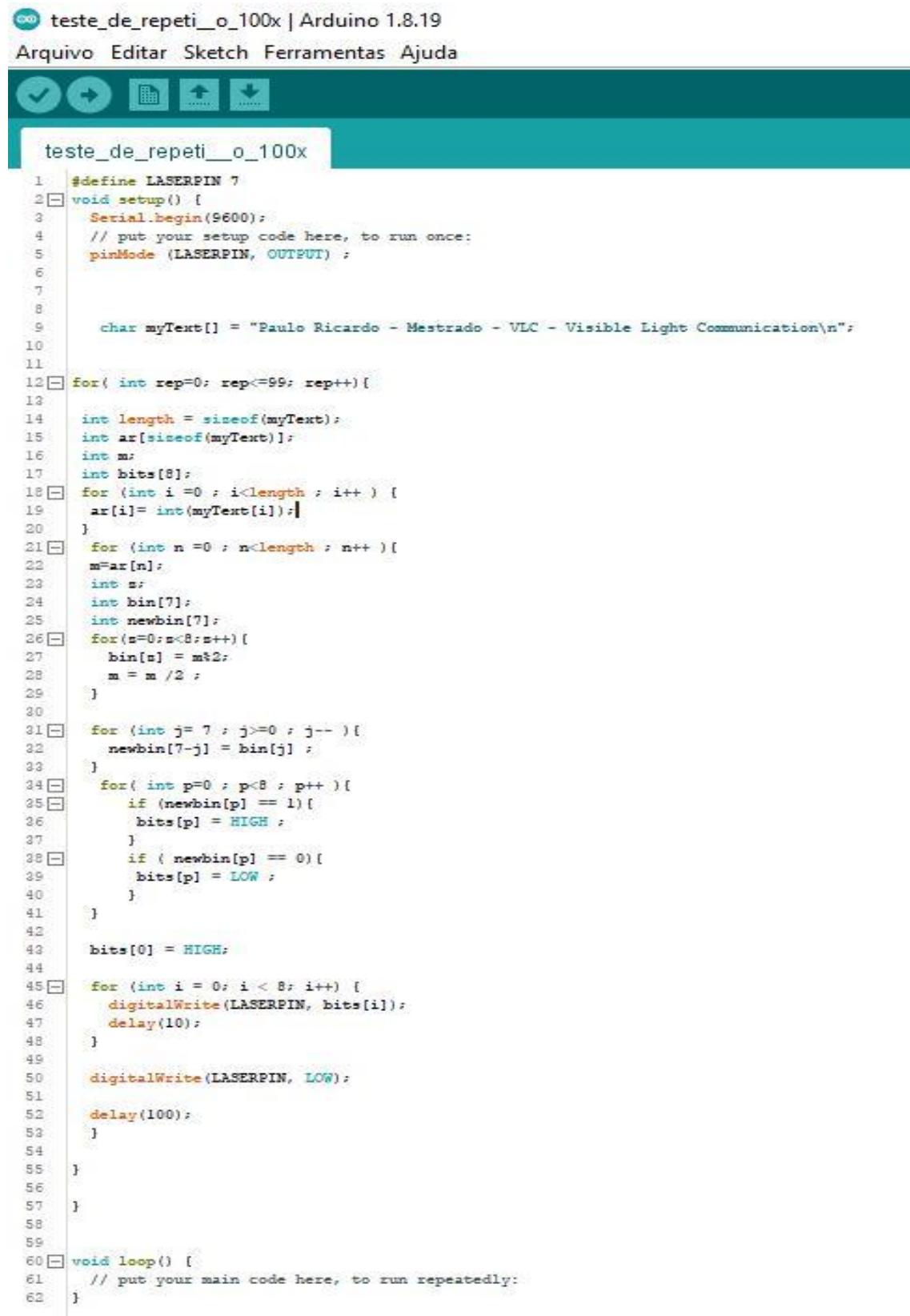


Fonte [Própria autoria], 2022

Conecta-se o Arduino ao *laptop* através do cabo *usb* para fornecimento de energia, configuração e programação da placa Arduino, onde é armazenado o programa de transmissão de *Strings* entre os Arduinos usando luz. Dos dois fios conectores do canhão de laser, um é conectado à porta ou pino 7 e o outro no pino 5V, que é a saída analógica do Arduino, onde o laser recebe as informações do Arduino.

A Figura 21, mostra o código de comunicação usado para transmissão.

Figura 21 – Programa 100x (100 é número de repetições do laço do programa)



```

1  #define LASERPIN 7
2  void setup() {
3      Serial.begin(9600);
4      // put your setup code here, to run once:
5      pinMode (LASERPIN, OUTPUT) ;
6
7
8
9      char myText[] = "Paulo Ricardo - Mestrado - VLC - Visible Light Communication\n";
10
11
12  for( int rep=0; rep<=99; rep++){
13
14      int length = sizeof(myText);
15      int ar[sizeof(myText)];
16      int m;
17      int bits[8];
18      for (int i =0 ; i<length ; i++ ) {
19          ar[i]= int(myText[i]);
20      }
21      for (int n =0 ; n<length ; n++ ){
22          m=ar[n];
23          int s;
24          int bin[7];
25          int newbin[7];
26          for(s=0;s<8;s++){
27              bin[s] = m%2;
28              m = m /2 ;
29          }
30
31          for (int j= 7 ; j>=0 ; j-- ){
32              newbin[7-j] = bin[j] ;
33          }
34          for( int p=0 ; p<8 ; p++ ){
35              if (newbin[p] == 1){
36                  bits[p] = HIGH ;
37              }
38              if ( newbin[p] == 0){
39                  bits[p] = LOW ;
40              }
41          }
42
43          bits[0] = HIGH;
44
45          for (int i = 0; i < 8; i++) {
46              digitalWrite(LASERPIN, bits[i]);
47              delay(10);
48          }
49
50          digitalWrite(LASERPIN, LOW);
51
52          delay(100);
53      }
54  }
55
56
57
58
59
60  void loop() {
61      // put your main code here, to run repeatedly:
62  }

```

Fonte [Própria autoria], 2022

O princípio de funcionamento do sistema de comunicação à laser (luz) é similar ao sistema de comunicação por fibra óptica, sendo a principal diferença, que no sistema de comunicação por luz o meio de comunicação é o espaço livre. O nosso sistema de comunicação transmite a informação (texto) de forma serial através do ar do transmissor para o receptor.

No lado transmissor escrevemos o texto a ser transmitido no código do Arduino transmissor e este usando o protocolo chamado UART (*Universal Assynchronous Receiver/Transmitter*) que significa transmissor-receptor universal assíncronos, cria um pacote de dados anexando bits de sincronização e paridade e em seguida envia-os através do laser (luz), onde cada bit 0 significa ausência de luz e o bit 1 excitação luminoso ou presença de luz, com tempos precisos entre bits que é de 10ms e entre dois bytes (8bits) diferentes, que é de 100ms.

Este protocolo de comunicação é assíncrono, o que não exige sincronismo entre os relógios do transmissor e receptor, significando que o receptor não precisa receber a informação transmitida imediatamente no exato momento da transmissão, mesmo porque a distância entre transmissor e receptor pode variar, alterando também o tempo transmissão-recepção.

A Figura 22, a seguir, mostra o lado do circuito receptor da *String*.

Figura 22 – Circuito Receptor de Strings entre Arduinos

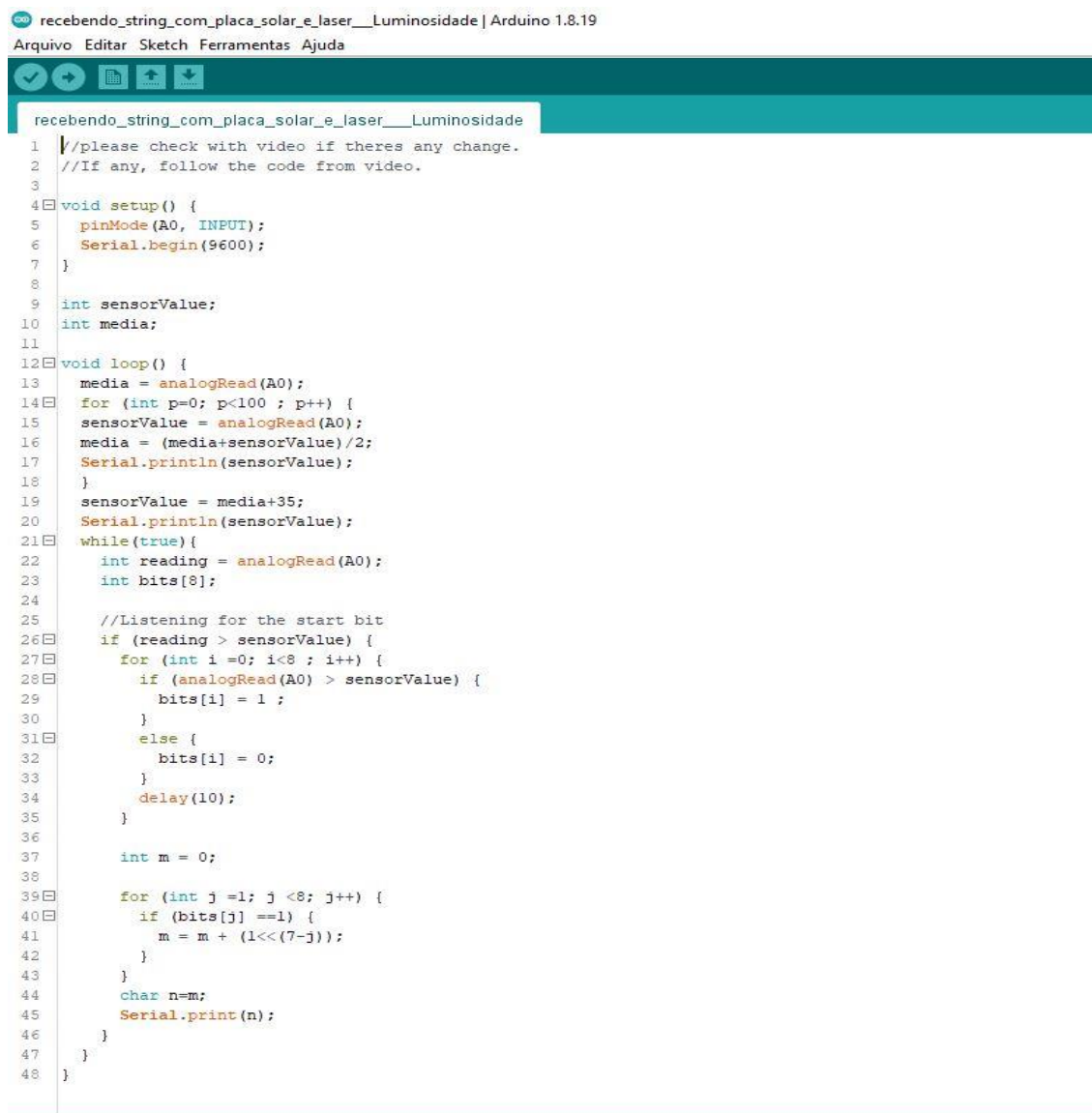


Fonte [Própria autoria], 2022

Já no lado receptor temos uma pequena placa solar (receptora do sinal), um Arduino receptor e um outro laptop para mostrar os dados recebidos. Quando a luz atinge a placa solar, esta converte o raio recebido sinal de tensão e consequentemente em uma corrente elétrica que passa pelo Arduino receptor converte os bits recebidos em forma de luz 1 e ausência de luz 0 em correspondentes caracteres alfanuméricos que foram enviados recuperando o sinal emitido e que são mostrados no monitor serial na tela do laptop, sendo este o objetivo deste experimento.

No receptor temos outro Arduino que deve rodar o programa de recepção da informação (*String*) a ser transmitida. A seguir, a Figura 23 mostra o programa que deve rodar no Arduino receptor de *Strings*.

Figura 23 – Recebendo String com placa solar e cálculo de luminosidade



```

recebendo_string_com_placa_solar_e_laser__Luminosidade | Arduino 1.8.19
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

1 //please check with video if theres any change.
2 //If any, follow the code from video.
3
4 void setup() {
5   pinMode(A0, INPUT);
6   Serial.begin(9600);
7 }
8
9 int sensorValue;
10 int media;
11
12 void loop() {
13   media = analogRead(A0);
14   for (int p=0; p<100 ; p++) {
15     sensorValue = analogRead(A0);
16     media = (media+sensorValue)/2;
17     Serial.println(sensorValue);
18   }
19   sensorValue = media+35;
20   Serial.println(sensorValue);
21   while(true){
22     int reading = analogRead(A0);
23     int bits[8];
24
25     //Listening for the start bit
26     if (reading > sensorValue) {
27       for (int i=0; i<8 ; i++) {
28         if (analogRead(A0) > sensorValue) {
29           bits[i] = 1 ;
30         }
31         else {
32           bits[i] = 0;
33         }
34         delay(10);
35       }
36
37       int m = 0;
38
39       for (int j=1; j <8; j++) {
40         if (bits[j] ==1) {
41           m = m + (1<<(7-j));
42         }
43       }
44       char n=m;
45       Serial.print(n);
46     }
47   }
48 }
  
```

Já na Figura 24, a seguir, mostramos os circuitos transmissor e receptor de String fazendo uma transmissão.

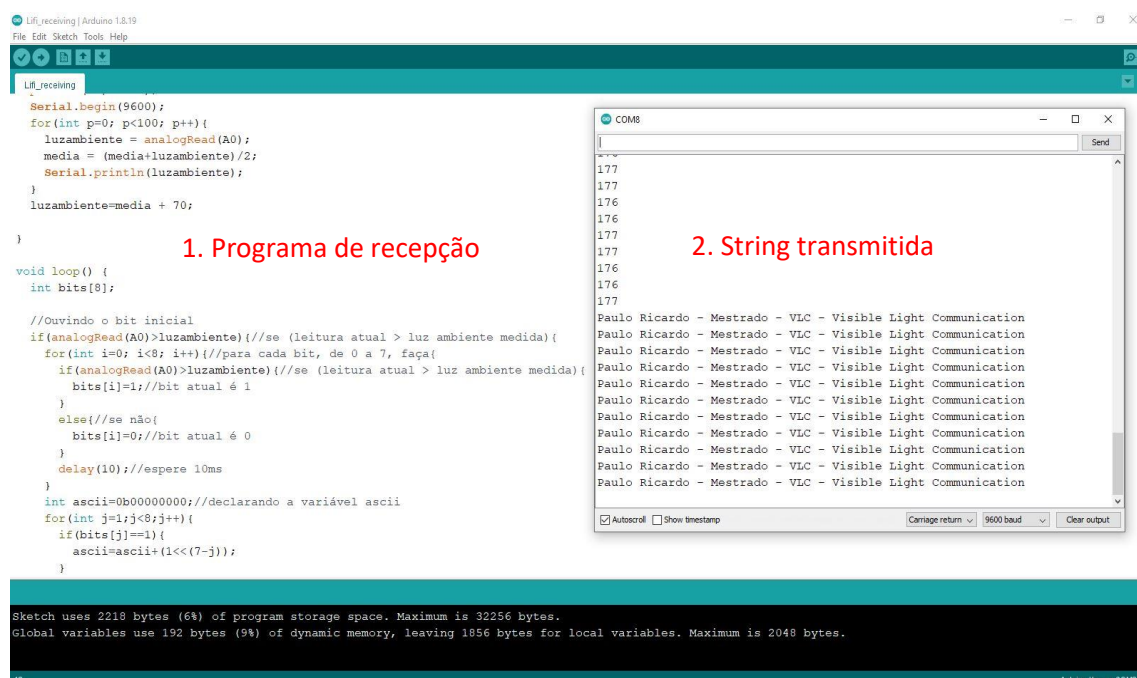
Figura 24 – Circuitos Transmissor e Receptor de Strings entre Arduinos



Fonte [Própria autoria], 2022

A Figura 25, a seguir, mostra o resultado na tela do laptop de recepção da String.

Figura 25 – Transmissão de Strings entre Arduinos e programa de recepção



Fonte [Própria autoria], 2022

Na tela 1 podemos ver o programa de recepção da String e na tela 2 podemos ver a String transmitida em uma janela ferramenta do próprio Arduino chamada Monitor Serial que mostra as informações seriais que estão sendo transmitidas para o Arduino receptor na porta ou pino selecionado. Realizamos este experimento várias vezes durante dia e em todas as transmissões obtivemos sucesso, com uma média de erro 2 a 3 a cada 100 transmissões efetuadas.

O experimentos foram realizando inicialmente com uma distância de 5m entre o canhão de laser transmissor e a placa solar receptora. Depois com uma distância de 10m e finalmente com uma distância de 12m. Os experimentos foram realizados durante o dia com luminárias ambientes desligas e também com as lâmpadas ligadas. Nas duas situações ocorreu a recepção dos dados transmitidos (*String*) com uma ou duas falhas em algum trecho da frase ou *String* transmitida em um total de 100 *Strings* recebidas.

4.3 ACIONAMENTO DE CARGA POR LUZ OU UTILIZANDO LUZ AMBIENTE

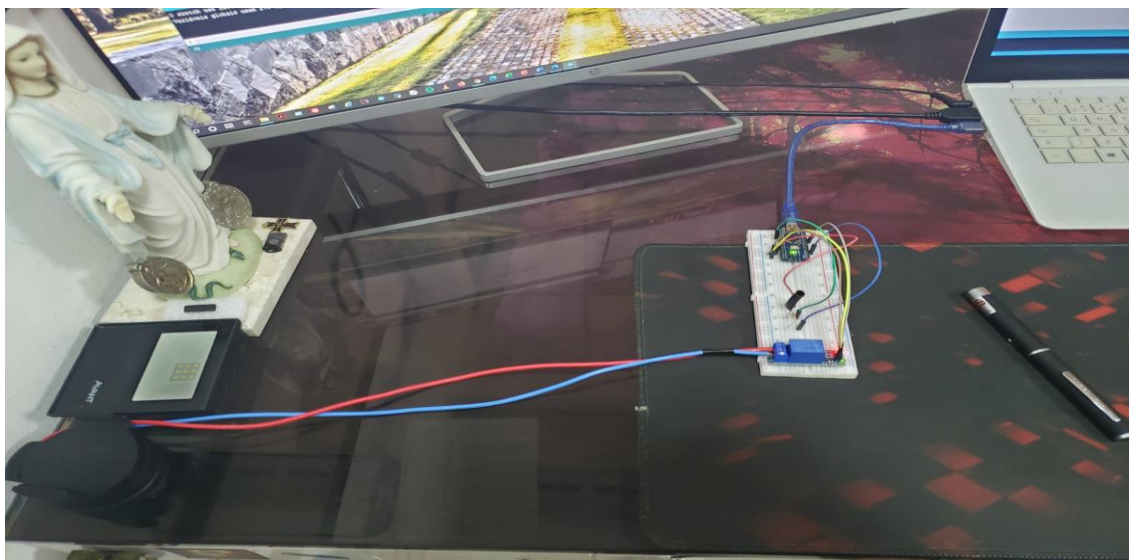
A proposta deste experimento é realizar o acionamento de uma carga usando um sinal luminoso. Neste experimento conseguimos fazer o acionamento de uma lâmpada e um ventilador que foram acionados de dois modos: 1. por uma fonte de luz de laser de uma caneta laser e 2. pelo aumento da luminosidade ambiente com o acionamento de uma lâmpada, sendo que no nosso caso essa lâmpada ambiente já fazia parte de um sistema de controle acionado pela internet com a Alexa. Sendo assim, demonstramos que podemos realizar o acionamento de cargas usando luz através da internet, bem a integração com um sistema pré-existente.

Neste experimento utilizamos um Arduino nano v3, um Suporte Shields para Arduino nano v3, um resistor dependente da luz (LDR, *Light Dependent Resistor*) , um relê e um resistor.

Este experimento pode fazer o acionamento de uma carga que pode ser uma lâmpada, um motor, ou qualquer outro dispositivo elétrico sendo acionado pela luz ou pela ausência da mesma, dependendo da lógica de programação especificada no Arduino. Quando utilizamos a luz como acionamento, este pode ser realizado por um raio laser, ou até pela luz ambiente de acordo com os parâmetros de luminosidade que são lidos pelo pino analógico do Arduino especificado no programa.

A Figura 26, mostra o circuito do acionamento de carga pela luz.

Figura 26 – Acionamento de uma carga por laser ou pelo aumento da luminosidade ambiente no pino 7



Fonte [Própria autoria], 2022

Já a Figura 27, a seguir, mostra o programa usado para acionar carga por luz.

Figura 27 – Programa para o acionamento de uma carga por laser ou pelo aumento da luminosidade

```

Acionar_Carga_com_rel_usando_sensor_LDR_pino_7 | Arduino 1.8.19
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

Acionar_Carga_com_rel_usando_sensor_LDR_pino_7
1 void setup() {
2   // escreva o seu código aqui:
3   Serial.begin(9600);
4   pinMode(7, OUTPUT);
5 }
6
7 void loop() {
8   // escreva o seu código principal aqui, para rodar repetidamente:
9   Serial.println(analogRead(A0)); //Faz a impressão do que estará dentro do parenteses (comando que
10  //faz a leitura analógica do disp. conectado ao pino analógico A0)
11  delay(200); //atrasa a impressão no monitor serial facilitando a leitura dos dados impressos lá.
12  if (analogRead(A0) >= 55){
13    delay(100);
14    Serial.print("      Carga acionada      ");
15    pinMode(7, HIGH);
16  } // Se o pino A0 tiver uma leitura maior ou igual a 55, o pino 7 fica HIGH e aciona o relê e este a carga
17  else{
18    Serial.print("      DESLIGADA      | ");
19    pinMode(7, LOW);
20    delay(100);
21  } //se não o pino 7 fica LOW Desacionando o relê e este a carga
22 }

Carregado.
O sketch usa 2208 bytes (7%) de espaço de armazenamento para programas. O máximo são 30720 bytes.
Variáveis globais usam 242 bytes (11%) de memória dinâmica, deixando 1806 bytes para variáveis locais. O máximo são 2048 bytes

18 Arduino Pro or Pro Mini, ATmega328P (5V, 16 MHz) em COM5

```

Fonte [Própria autoria], 2022

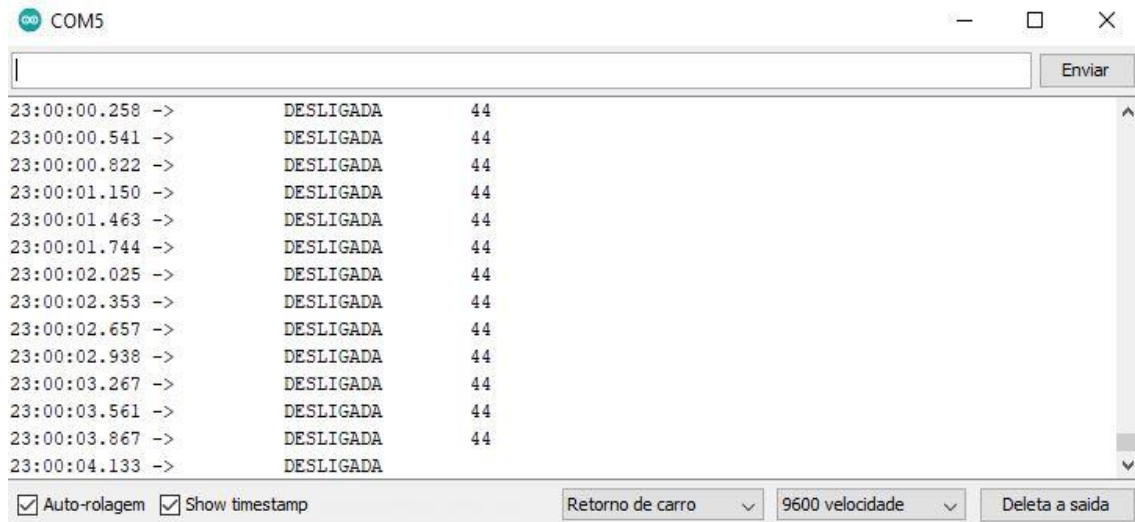
No experimento habilitamos a leitura analógica de luminosidade para pino A0 e quando essa luminosidade fosse maior ou igual a 55luxs o circuito acionaria o relê de potência e este faria o acionamento da carga. E da mesma forma, caso a luminosidade fosse inferior a 55luxs a carga não seria acionada.

Este experimento demonstra a facilidade de utilização do sistema VLC com vários dispositivos, como LDRs, relês e microprocessadores, bem como, a integração com sistemas de controle pré-existentes como o sistema de inteligência artificial usado pelo secretário eletrônica Alexa da Amazon, que foi utilizada para o acionamentos de lâmpadas locais e assim alterando a luminosidade ambiente acionando o sistema VLC de acionamento de carga através da aumento ou diminuição da luz ambiente.

Na Figura 24, a seguir, observamos pela janela do Monitor Serial do Arduino que a leitura analógica do pino A0 é inferior a 55lux e de acordo com a lógica do programa a carga não é acionada, e mostrando o valor de 44lux e a carga com o texto “DESLIGADA”.

A Figura 28, mostra os registros de luminosidade ambiente e sua consequente ação de acionamento ou não da carga pela alteração de luminosidade.

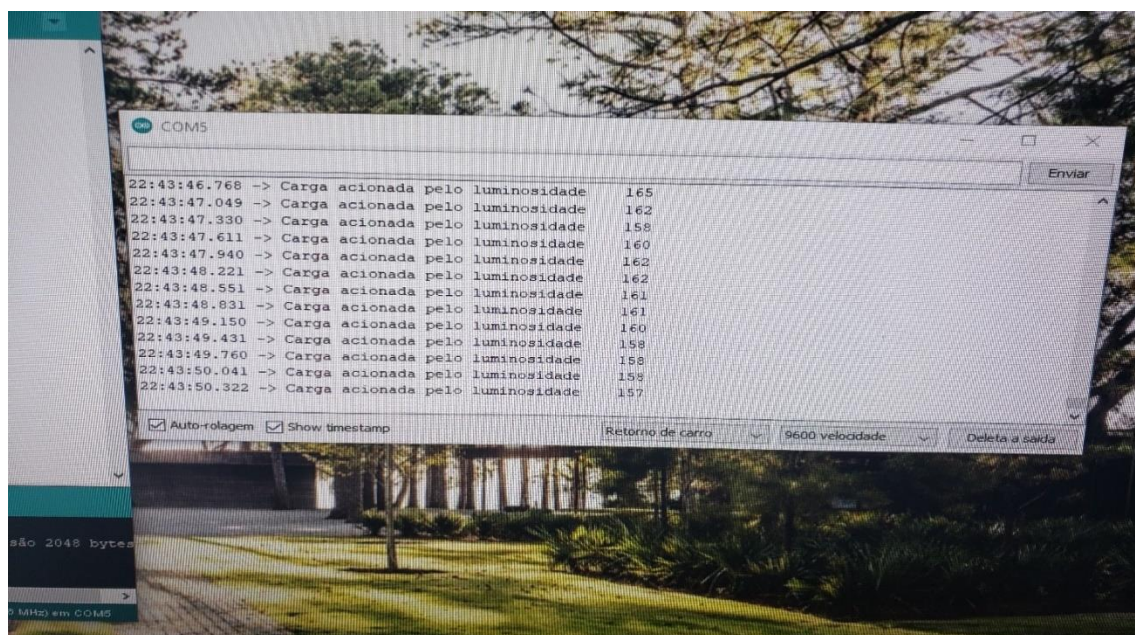
Figura 28 – *Leitura do pino A0 < 55lux mostrando que a carga é “DESLIGADA”*



Fonte [Própria autoria], 2022

A Figura 29 mostra a janela do Monitor Serial do Arduino, com a leitura analógica do pino A0, superior a 55lux e de acordo com a lógica do programa a carga é acionada pelo aumento da luminosidade, mostrando o valor de 157lux a 165lux e o texto “Carga acionada pela luminosidade”.

Figura 29 – *Leitura do pino A0 > 55lux mostrando que a carga foi “ACIONADA”*

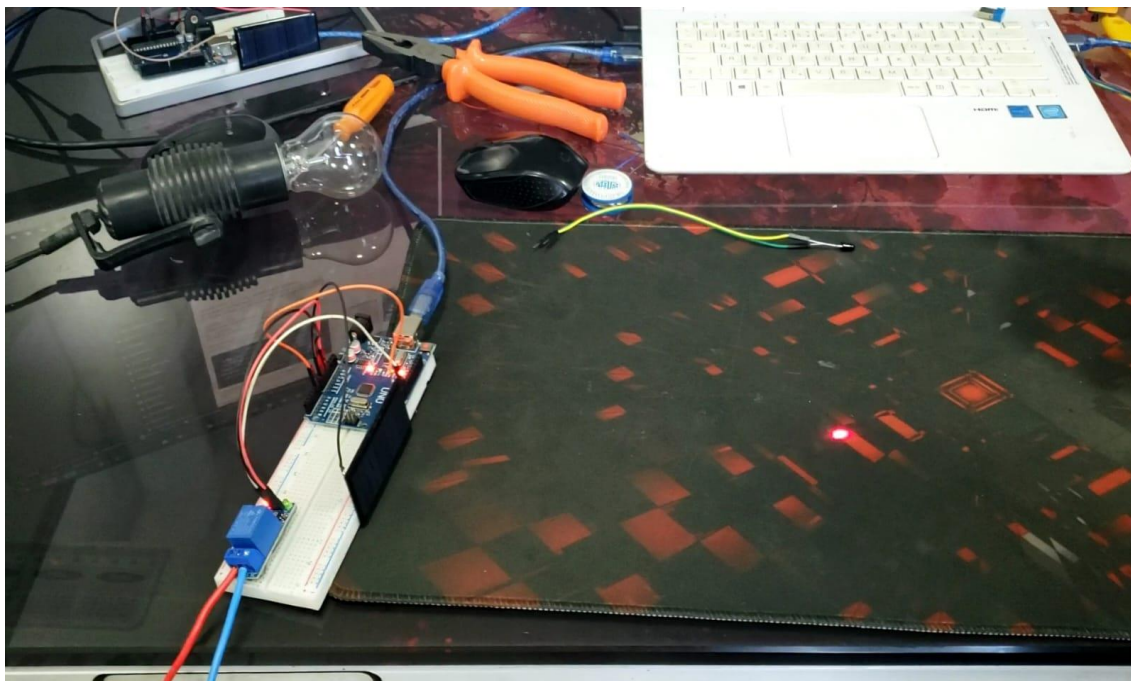


Fonte [Própria autoria], 2022

Também realizamos outros experimentos com o acionamento de cargas por luz. Em um desses nossos experimentos utilizamos uma placa solar como ponto de recepção da luminosidade vinda de uma fonte de luz laser ou até de uma lâmpada de LED normal de iluminação ambiente, a qual em nosso caso, também já fazia parte de um outro sistema de controle liga-desliga comandado por uma secretária eletrônica de inteligência artificial (AI, *Artificial Intelligent*), Alexa. Neste experimento a lâmpada de LED do local do experimento pode ser acionado localmente ou por voz, ou pela internet, ou de qualquer parte do mundo, por voz ou através de botão instalado no celular do App Alexa, demonstramos assim que o sistema VLC pode se integrar a outros sistemas através da internet.

A Figura 30 mostra o circuito usando uma placa solar ou invés de um LDR para o acionamento de carga

Figura 30 – Circuito de acionamento de carga usando placa solar



Fonte [Própria autoria], 2022

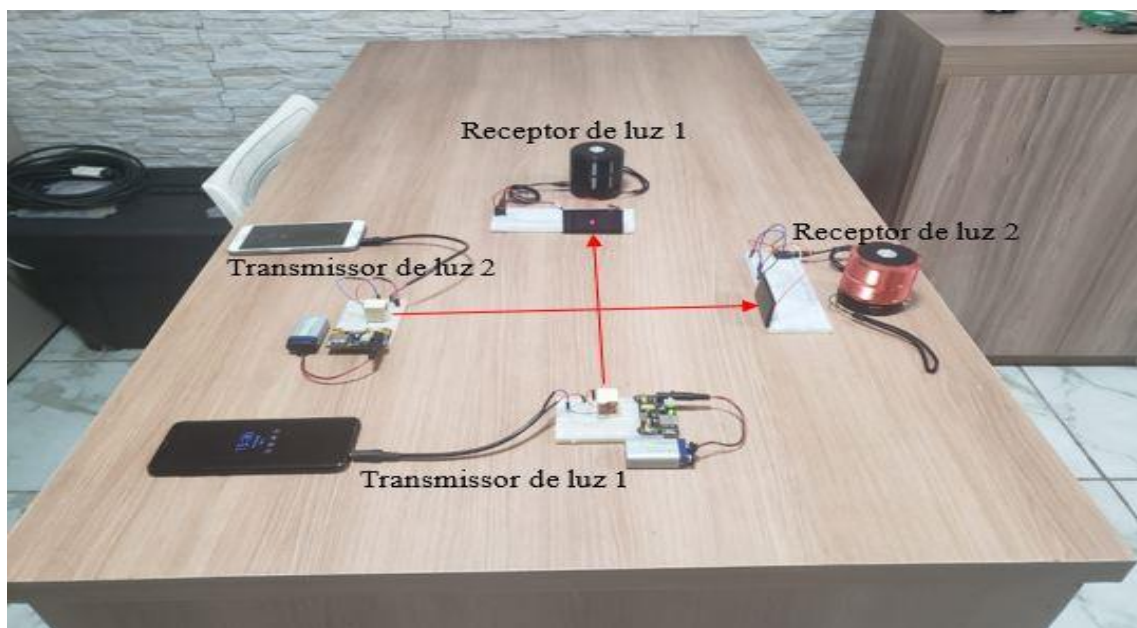
4.4 EXPERIMENTOS PARA DEMONSTRAR A INDEPENDÊNCIA DOS RAIOS LUMINOSOS

4.4.1 EXPERIMENTO 1: SISTEMA DE TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO DE ÁUDIO ATRAVÉS DE SINAL LUMINOSO

Usamos dois sistemas de transmissão-recepção de áudio conforme materiais descritos nas páginas 3.1. O experimento foi realizado de tal modo que um raio do primeiro sistema transmissor-receptor 1 pudesse cruzar com o outro raio do outro sistema transmissor-receptor 2. No primeiro sistema utilizamos um aparelho celular sintonizado em uma estação de rádio internacional e o segundo em uma estação de rádio nacional e verificou-se que ocorreu a transmissão-recepção nos dois sistemas sem nenhum tipo de interferências ou falhas nos mesmos. Demonstrando que as informações transmitidas, pelo raio luminoso, no caso, transmitindo áudio, ocorreu como se cada raio luminoso estivesse operando de forma isolada, sem que houvesse um outro raio luminoso cruzado, pois, os áudios foram recebidos bem audíveis e sem nenhum tipo de falha sonora. O experimento foi realizado com as distâncias de 0.5m, 1.5m e 3m entre a fonte transmissora e a fonte receptora.

A Figura 31 mostra os sistema transmissão-recepção se cruzando.

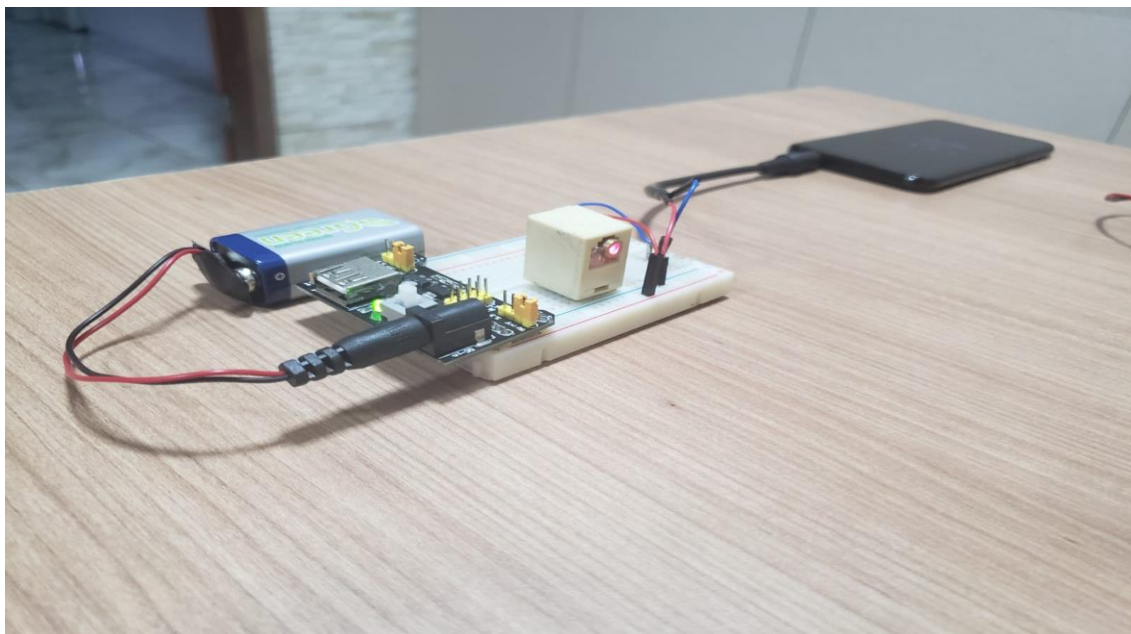
Figura 31 – Sistema transmissor-receptor 1 e 2 de áudio por luz mostrando a independência dos raios



Fonte [Própria autoria], 2022

A Figura 32 mostra o circuito do sistema transmissor de áudio por luz.

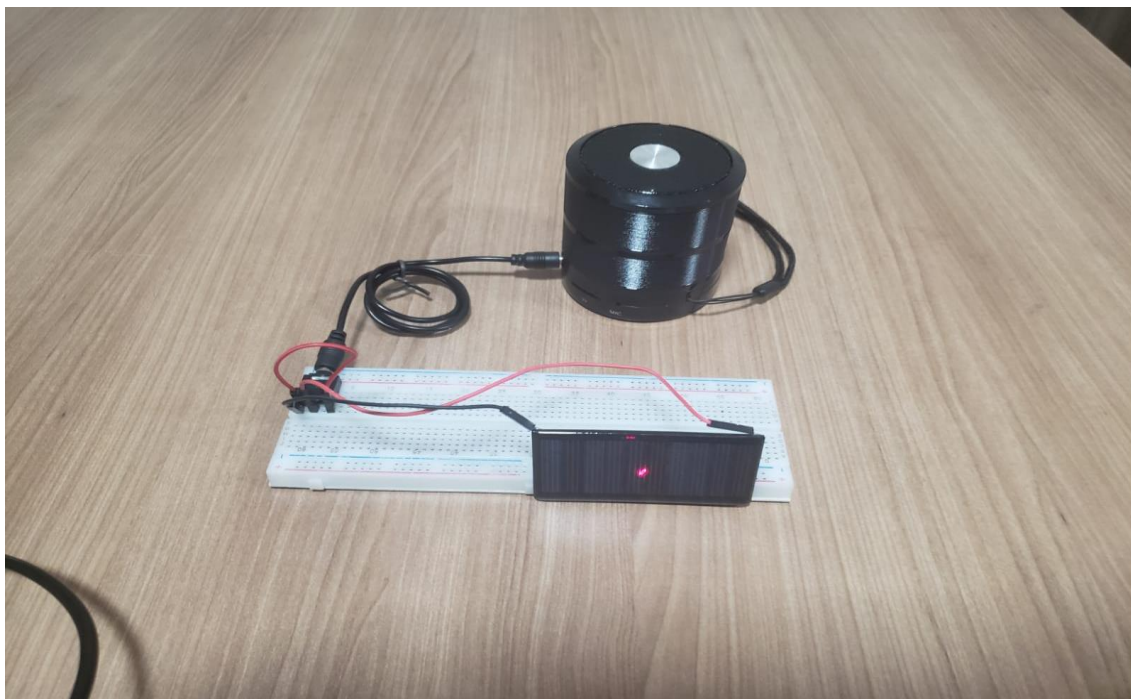
Figura 32– Sistema transmissor de ÁUDIO por luz



Fonte [Própria autoria], 2022

A Figura 33 mostra o circuito do sistema receptor de áudio por luz.

Figura 33 – Sistema receptor de ÁUDIO por luz



Fonte [Própria autoria], 2022

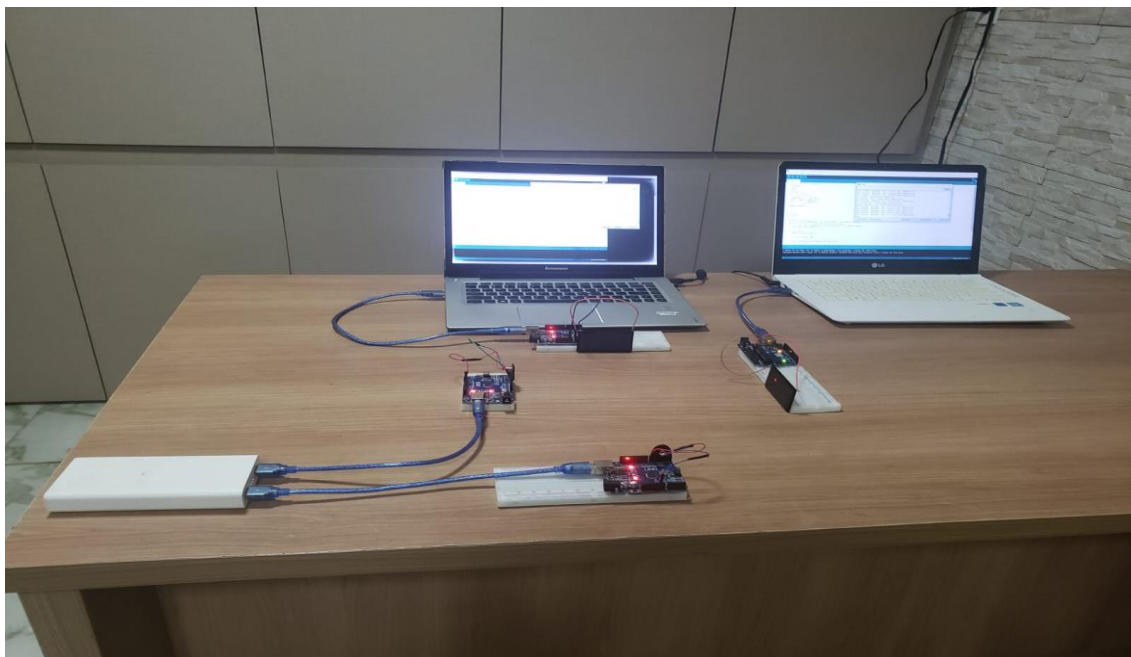
4.4.2 EXPERIMENTO 2: SISTEMA DE TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO DE DADOS (*STRING*) ENTRE DOIS MICROPROCESSADORES

Usamos dois sistemas de transmissão-recepção de *String* entre dois microprocessadores Arduinos, conforme materiais descritos no capítulo 3.2. O experimento foi realizado de tal modo que um raio do primeiro sistema transmissor-receptor 1 pudesse cruzar com o outro raio do outro sistema transmissor-receptor 2, sendo que neste caso, o raio transmissor é gerado com o auxílio de microprocessador, o Arduino, bem a demodulação da informação recebida também utiliza um outro Arduino na recepção. As *Strings* são recebidas pelos sistemas 1 e 2 independentes e são visualizadas na interface Serial Monitor de cada Arduino 1 e 2 nas telas dos *laptops* em que cada Arduino está conectado.

A transmissão da *String* foi realizada por 100 vezes várias durante o dia, em cada um dos sistemas, e mesmo um raio luminoso cruzando o outro, as recepções mostram que não houve nenhum tipo de interferências e falhas nas recepções dos monitores seriais.

A Figura 30 mostra dois sistemas transmissor-receptor de *Strings* por luz cruzando os raios transmissores e demonstrando também aqui a independência dos raios luminosos.

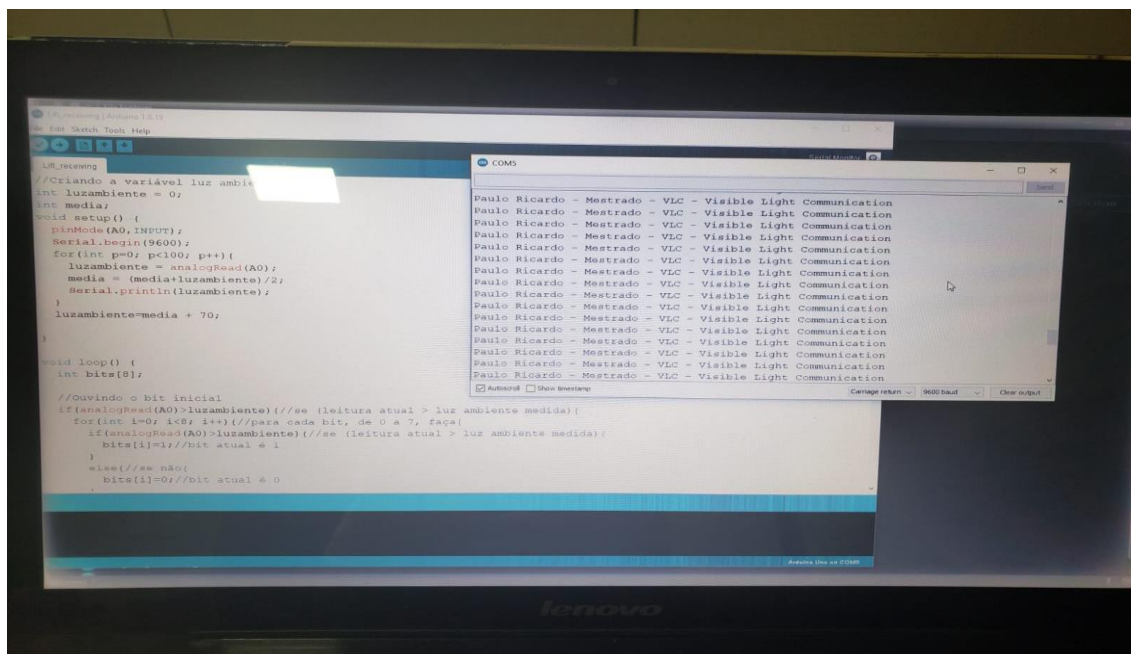
Figura 34 – Sistema transmissor-receptor 1 e 2 de *Strings* por luz mostrando a independência dos raios



Fonte [Própria autoria], 2022

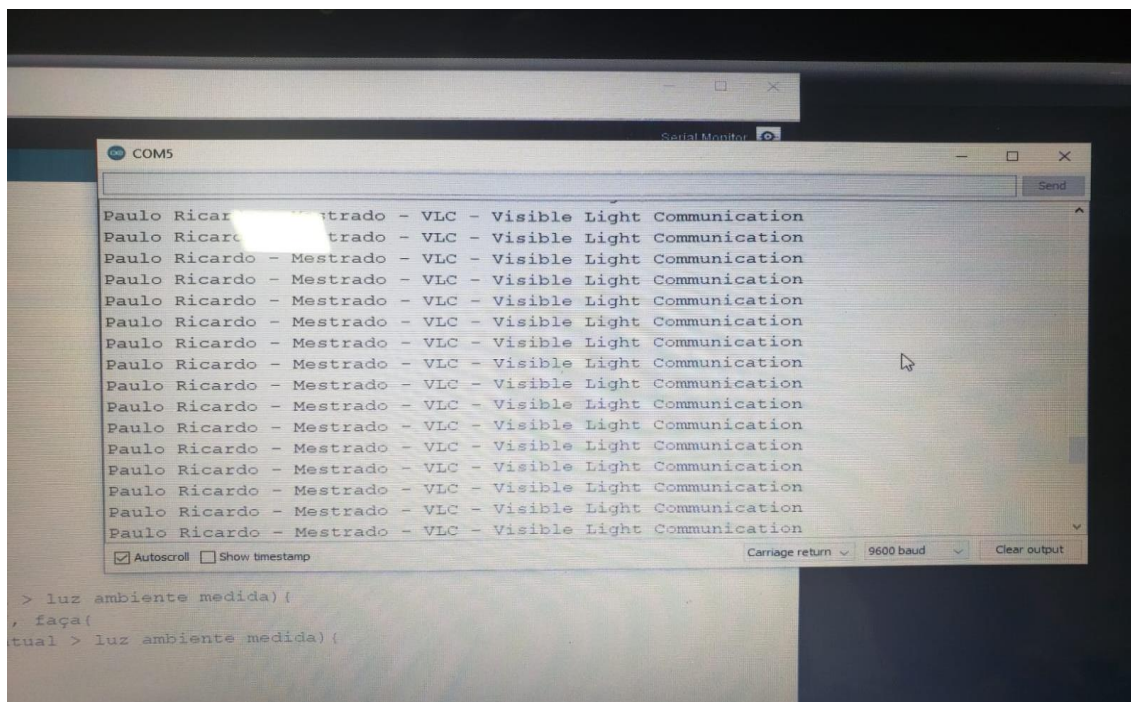
A Figura 35 e 36 mostram o monitor serial do primeiro sistema e segundo de transmissão, demonstrando que não ocorreu nenhuma falha na transmissão, nem recepção, mesmo que os raios dos dois sistema se cruzassem no momento da transmissão.

Figura 35 – Monitor Serial Arduino 1 – recepção



Fonte [Própria autoria], 2022

Figura 36 – Monitor Serial Arduino 2 – recepção



Fonte [Própria autoria], 2022

4.4.3. EVOLUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DURANTE A PESQUISA E TRABALHO DESENVOLVIDO

Apresentamos a seguir a evolução dos trabalhos realizados com o VLC e relacionamos os *QR codes* e os *links* dos vídeos realizados nos experimentos: 1. Transmissão-recepção de um sinal de áudio; 2. Transmissão-recepção de um dado (*String*) entre dois microprocessadores, 3. Acionamento de cargas por luz com placa solar e 4. Acionamento de cargas pela luz com LDR.

Nos experimentos realizados tivemos o cuidado de filmar todos os procedimentos e colocar à disposição para os leitores e possíveis interessados dos experimentos em caso de comprovar a veracidade e funcionalidade da tecnologia e estudo aqui apresentado.

1. TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO DO SINAL DE ÁUDIO.

1.1 TR_Áudio_VLC está no *link*: youtu.be/watch?v=1ITrJ03rBTE ou pelo *QR-code* a seguir:



1.2 IND_Raios_Áudio está no *link*: youtu.be/watch?v=1ITrJ03rBTE ou pelo *QR-code* a seguir:



2. TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO DE UM DADO (*STRING*) ENTRE DOIS MICROPROCESSADORES

2.1. V1TS está no *link*: youtube.com/watch?v=jflHnDc2-J4 ou pelo *QR-code* a seguir:



2.2. V2TS está no *link*: youtube.com/watch?v=F-9WY4NPWf8 ou pelo *QR-code* a seguir:



2.3. V3TS está no *link*: youtube.com/watch?v=Kdxdg9OT_UE ou pelo *QR-code* a seguir:



2.4. V4TS está no *link*: youtube.com/watch?v=IW4KfYGXDRk ou pelo *QR-code* a seguir:



2.5. V5TS está no *link*: youtube.com/watch?v=lqwTJCSiW54 ou pelo *QR-code* a seguir:



2.6 IND_Raios_S está no *link*: https://youtu.be/NmBIId_sj9_Y ou pelo *QR-code* a seguir:



3. ACIONAMENTO DE CARGAS POR LUZ COM PLACA SOLAR

3.1 AC1_PS está no *link*: <https://youtu.be/hMSh3iDzdzQ> ou pelo *QR-code* a seguir:



3.2 AC2_PS está no *link*: <https://youtu.be/9h27C1lUu6k> ou pelo *QR-code* a seguir:



3.3 AC3_PS está no *link*: https://youtu.be/_uW4KpG_WXQ ou pelo *QR-code* a seguir:



4. ACIONAMENTO DE CARGAS PELA LUZ COM LDR

4.1 AC_LDR_1 está no *link*: <https://youtu.be/tlNMqXBaIxA> ou pelo *QR-code* a seguir:



4.2 AC_LDR_2 está no *link*: <https://youtu.be/RiVDGsLKZK4> ou pelo *QR-code* a seguir:



4.3 AC_LDR_3 está no *link*: <https://studio.youtube.com/video/SDHvwNe7zaI> ou pelo *QR-code* a seguir:



4.4 AC_LDR_4 está no *link*: <https://youtu.be/yNPYpuBqdFw> ou pelo *QR-code* a seguir:



4.5 AC_LDR_5 está no *link*: <https://youtu.be/cmRI1mgbH> ou pelo *QR-code* a seguir:



4.6 AC_LDR_6 está no *link*: <https://youtu.be/TqzieQsuAFg> ou pelo *QR-code* a seguir:



4.7 AC_LDR_7 está no *link*: https://youtu.be/Nnodd_2t1i4 ou pelo *QR-code* a seguir:



4.8 AC_LDR_8 está no *link*: youtu.be/AXi5HxnWpXM ou pelo *QR-code* a seguir:



4.9 AC_LDR_9 está no *link*: youtu.be/WkjHQJHCdH4 ou pelo *QR-code* a seguir:



4.10 AC_LDR_10 está no *link*: <https://youtu.be/UAy-4oZoAf8> ou pelo *QR-code* a seguir:



4.11 AC_LDR_11 está no *link*: youtu.be/VSldOr1QzAU ou pelo *QR-code* a seguir:



4.12 AC_LDR_12 está no *link*: youtu.be/gMXAk-wPHPU ou pelo *QR-code* a seguir:



4.13 AC_LDR_13 está no *link*: youtu.be/_2SJCSTKOvc ou pelo *QR-code* a seguir:



5 – EXPECTATIVAS FUTURAS E CONCLUSÕES

5.1 – TRABALHOS FUTUROS

A título de sugestão para trabalhos futuros, poder-se-ia sugerir estudos e talvez o desenvolvimento de produtos e ou serviços para auxiliar na automação de pequenas e médias indústrias e empresas ou de algum sensor que funcionasse pela luz ou ausência da mesma.

Sugerimos também o estudo e possível desenvolvimento de um sistema transmissor de imagens por VLC, usando dispositivos locais.

5.2 – CONCLUSÃO

Os experimentos realizados comprovam que em um ambiente *indoor* a tecnologia estuda aqui é perfeitamente aplicável, apontando o caminho para futuras utilizações e implementações de produtos e serviços que funcionem de modo satisfatório para o público em geral, sendo assim atingidos os objetivos deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Rafael Helerbrock – **Mundo Educação – Ondas de Rádio**. 1999. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/ondas-radio.htm> > Acesso em 01.01.2022.
- [2] Constantine A. Balanis – **Antenna Theory Analysis and Design** – 2005. A John Wiley & Sons, Inc. Publication – ISBN: 0-471-66782-X.
- [3] Prof. Alcir Mario Trainotti Filho e Prof.a Cintia Ghisi Trainotti – **Introdução às Tecnologias da Informação e Comunicação** - Copyright © UNIASSELVI 2018 - ISBN 978-85-515-0241-9.
- [4] Zabih Ghassemlovy, Luis Nero Alves, Stanislav Zvánovl and Mohammad-Ali Khalighi – **Visible Light Communications – Theory and Applications** – 2107. CRC Press Taylor & Francis Group - International Standard Book Number-13: 978-1-4987-6753-8 (Hardback).
- [5] BURCHART et al - **VLC: Beyond point-to-point communication - IEEE Communications Magazine - Volume: 52, Issue: 7. July 2014**. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6852089>>. Acesso: 02.01.2022.
- [6] Luiz Eduardo Mendes Matheus¹, Alex Borges Vieira, Jean H. F. Freire, Luiz F. M. Vieira², Marcos A. M. Vieira, Omprakash Gnawali, **Comunicação por Luz Visível: Conceitos, Aplicações e Desafios**. 2017. Disponível em: <(PDF) [Comunicação por Luz Visível: Conceitos, Aplicações e Desafios \(researchgate.net\)](#)>. Acesso em: 01.07.2021.
- [7] Marcel Verrumo - As faixas para transmissão de dados podem acabar? - Atualizado em 4 - 2018, Publicado em 27 - 2013. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/as-faixas-para-transmissao-de-dados-podem-acabar/>>. Acessado em: 03.01.2022
- [8] SVILEN DIMITROV - German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen and HARALD HAAS - University of Edinburgh. **Principles of LED Light Communications Towards Networked Li-Fi**. © Cambridge University Press 2015. ISBN 978-1-107-04942-0 Hardback.
- [9] Gordon Povey - **Visible Light Communications** – 2011. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20131010151309/http://visiblelightcomm.com/the-photophone-%E2%80%93-worlds-first-wireless-communications/> > Acesso em: 14.01.2022.
- [10] André Coelho da Silva - **TELEFONE COM DIAPASÃO: UMA DAS PATENTES DE ALEXANDER GRAHAM BELL**. 2009. Disponível em:

<https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2009/AndreC_Schulz_RF1.pdf>. Acesso em: 15.01.2022.

em: 14.06.2021.

[11] Lucas Wormsbecher - Tendências Digitais. **Li-Fi**. 2017. Disponível em: <<https://medium.com/tend%C3%Aancias-digitais/li-fi-comunica%C3%A7%C3%A3o-atrav%C3%A9s-de-luz-vis%C3%ADvel-61b66d9b7115>> . Acesso em: 15.01.2022.

[12] Bandeira, D. A. ; Tarran, M. L.; Castro, E. C. **Estudo da cor – Espectro Eletromagnético**. Disponível em: <<https://estudodacor.wordpress.com/aspectos-fisicos/espectro-da-luz/espectro-2/>>. Acesso em 16.01.2022.

[13] Latif Ullah Khan - Journals and books – Science Direct - **Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges**. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864816300335>>. Acesso em: 19.01.2022.

[14] UDDA Light Store – Ali Express – 2022. Disponível em: < https://ae01.alicdn.com/kf/Sf7717a59c65a4ddd4a5e42374725cc3u/Arte-de-alum-nio-design-janela-varanda-arandela-luz-parede-interior-10w-cree-led-roxo-rgb.jpg_Q90.jpg_.webp>. Acesso em 20.01.2022

[15] David Esteban Farfán Guillén - **Projeto e Análise de Desempenho de um Sistema de Comunicação por Luz Visível**. 2021. Disponível em: < <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26142/1/sistemacomunicacaoluzvisivel.pdf>>. Acesso em: 20.01.2022

[16] Wikipedia – LiFi - 2020. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>>. Acesso em: 14.06.2021.

[17] Harald Haas - **Li-Fi**. 2011. Disponível em: < <https://lifi.co/harald-haas/>> Acesso em: 21.01.2022.

[18] LiFi Lighting - **LiFi The New Internet** – 2019. Disponível em: < **Erro! A referência de hiperlink não é válida.** >. Acesso em: 31.01.2022.

[19] Visible Light Communication using White LEDs for Indoor Wireless Data Transmission - **INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING** – 2015. Disponível em: < https://ijireeice.com/wp-content/uploads/2015/05/T1_138.pdf>. Acesso em: 16.02.2022.

[20] pureLiFi - **Push wireless to new limits with LiFi** – 2013. Disponível em: < <https://purelifi.com/lifi-products/>>. Acesso em 16.02.2022

- [21] Science Alert by Bec Crew – **Li-Fi has just been tested in the real world and it's 100 times faster than Wi-Fi.** 24 Novembro 2015. Disponível em: < <https://www.sciencealert.com/li-fi-tested-in-the-real-world-for-the-first-time-is-100-times-faster-than-wi-fi> >. Acessado em: 17.02.2022.
- [22] Tecnoblog by Paulo Higa – **O que é Li-Fi?** – 24 de maio de 2012. Disponível em: < <https://tecnoblog.net/responde/li-fi-conexao-lampadas/> >. Acessado em: 19.02.2022.
- [23] Geekblog by Rafael Pimenta – **Li-Fi: entenda como funciona o novo tipo de conexão com a internet!** – 14.09.2020 – Disponível em: <<https://geekblog.com.br/li-fi-entenda-como-funciona-o-novo-tipo-de-conexao-a-internet/>>. Acessado em: 19.02.2022.
- [24] Inc. by Max Slater Robins, Business Inside – **Apple reportedly testing Li-Fi, a technology that runs 100 times faster than Wi-Fi.** 19.02.2022. Disponível em: < <https://www.inc.com/business-insider/apple-is-now-testing-li-fi.html> > . Acessado em: 10.04.2022.
- [25] pureLiFi by Sarah Scace – **How does LiFi works when you turn off the lights?** 12 de junho de 2017. Disponível em: < <https://purelifi.com/faq/how-does-lifi-work-when-you-turn-off-the-lights/> >. Acessado em: 10.04.2022.
- [26] Docplayer - por Jonathan Raminhos Lemos – **Conceitos Básicos de Óptica Geométrica.** 2022. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/46429697-Conceitos-basicos-de-optica-geometrica.html>>. Acessado em: 10.04.2022.
- [27] Physics for Scientists and Engineers by Serway Jwett – 6th Edition – **The ray approximation in geometric optics.** Page 1097 section 35.3
- [28] Physics for Scientists and Engineers by Serway Jwett – 6th Edition – **Conditions for interference.** Page 1177 section 37.1