



Engenharia de Informação

Trabalho de Graduação

PROTOTIPAGEM DE SISTEMA VLC BASEADO
EM PLATAFORMA ABERTA

Nome: Jean Carlos Vieira

RA: 11052613

Santo André - SP

2019

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Aplicações	3
1.2	Li-Fi	3
1.3	Comunicação entre veículos	4
1.4	Comunicação submarinas	5
2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Espectro eletromagnético	7
2.2	Sistema de comunicação digital	8
2.3	Componentes de sistema de comunicação	9
2.4	Modulação	10
2.5	Emissor Óptico	13
2.5.1	LED	13
2.6	Receptor Óptico	14
2.6.1	LDR	14
2.6.2	Placa solar	16

2.7	Posicionamento do sistema VLC	17
3	Metodologia	19
3.1	Configuração usada	19
3.1.1	Plataforma Arduino	20
3.2	Primeiro Protótipo	21
3.3	Segundo Protótipo	24
3.4	Terceiro Protótipo	25
3.5	Comportamento do sinal enviado e recebido	28
4	Resultados e Conclusão	31

Resumo

Sistemas de VLC (*Visible Light Communication*) tratam-se de modelos de comunicação que usam a faixa de luz visível do espectro eletromagnético (380 nm a 750 nm) para transferir dados. Neste trabalho foi proposta a criação de um sistema de comunicação de baixo custo baseado em luz visível utilizando componentes eletrônicos acessíveis e uma plataforma de código aberto, tornando o projeto facilmente replicável. Os protótipos desenvolvidos funcionam através da modulação OOK, transmitindo informação por pulsos de luz. Através de testes nota-se que, mesmo com sua limitação de tempo de bit, o sistema transfere informação com sucesso e abre margem para novas melhorias, explorando de forma acessível o conceito de comunicação através do espectro de luz visível.

1 Introdução

Comunicação por luz visível (VLC, *Visible Light Communication* refere-se ao uso da faixa de luz visível do espectro eletromagnético para transmissão de informação. A criação de sistemas de comunicação que usam esta faixa de luz visível vem se tornando cada vez mais interessante devido à alta ocupação do espectro de rádio, à necessidade de transmitir maior volume de informação com mais dispositivos em rede e à possibilidade de utilizar equipamentos de iluminação tradicionais para fins de transferência de dados. A aplicação do VLC que será trabalhada funciona através do envio de sequências de pulsos luminosos por um LED (*Light Emitting Diode*, descrito na seção 2.5.1) e pela captação deste sinal por um sensor luminoso: um LDR (Light Dependent Resistor) ou uma placa solar, descritos respectivamente nas seções 2.6.1 e 2.6.2.

A luz visível vem sendo usada para fins de comunicação de longas distâncias desde os tempos da civilização romana [3] através de sistemas de reflexão da luz solar em placas polidas. De acordo com [3], outras aplicações de comunicação também usaram a luz visível, como por exemplo os sistemas de semáforos criados em 1790, os telégrafos visuais criados por Claude Chappe em 1792 na França, o heliógrafo (um sistema de comunicação sem fio baseado na reflexão de luz solar por espelhos) criado pelas forças armadas americanas em 1800) e o photophone criado por Graham Bell nos anos de 1800 que transmitia voz através de um feixe de luz.

Inicialmente, para criar uma fonte de luz branca de alto rendimento eram necessários LEDs que forneciam luz vermelha, verde e azul. O LED vermelho foi criado na década de

1950 através de dispositivos eletrônicos que emitiam luz com comprimentos de onda curtos. Em seguida, a cor verde foi obtida na década de 1960 [4].

Sistemas mais complexos de comunicação não usavam a luz até o desenvolvimento do LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) [5]. Este acabou por possibilitar a criação de uma das maiores infraestruturas de comunicações já vistas, que são as redes de fibras ópticas. Já em 1970 criaram-se sistemas comerciais de redes de fibras. Em 1989 foi criado o amplificador de fibras ópticas, permitindo o progresso do que se tornaria a revolução na área de telecomunicações do século XX [7].

Finalmente, na década de 1980, Isamu Akasaki e Hiroshi Amano, trabalhando na Universidade de Nagoya, e Shuji Nakamura, na Nichia Corporation, focaram seus estudos no semicondutor baseado no nitreto de gálio (GaN) para a criação de LEDs azuis. Em 1993, Shuji Nakamura foi capaz de criar o primeiro LED azul de alto brilho [4].

Trabalhos se iniciaram em 2003 no laboratório de Nakagawa, da universidade japonesa de Keio, tratando especificamente da transmissão de dados através de sinais de luz visível [8].

Em 2010, uma equipe de pesquisadores do instituto Siemens e Fraunhofer de Telecomunicações atingiu uma transmissão de 500 Mbit/s com um LED branco a uma distância de 5 metros e 100 Mbit/s usando cinco LEDs em um sistema VLC [9].

Em 2015, a Philips e a rede de supermercados Carrefour se uniram para implementar um sistema de localização baseado em VLC usado em *smartphones* de compradores de um hipermercado em Lille, na França [10].

Recentemente ocorreram grandes progressos com sistemas de comunicação ópticos sem fio. Na seção 1.1 serão descritos alguns tipos de aplicações que utilizam o VLC.

1.1 Aplicações

Os sistemas VLC funcionam através da transmissão de informação por luz visível usando emissores e transmissores luminosos. Nesta seção serão descritas algumas aplicações que baseiam seu funcionamento na propagação sem fio de luz visível para transferência de informação.

1.2 Li-Fi

O termo Li-Fi foi criado por Harald Haas e significa Light Fidelity [11]. Li-Fi trata-se do uso do VLC juntamente com protocolos de rede de computadores, permitindo abstrair a parte física da comunicação entre transmissor e receptor para a comunicação entre elementos de uma rede, de forma semelhante ao que acontece com o WiFi (*Wireless Fidelity*). Algumas faixas de frequência do espectro eletromagnético usadas em comunicações de radiofrequência (RF) podem causar interferência em sistemas externos: Sinais de celulares, por exemplo, podem comprometer a comunicação de aviões com uma torre de transmissão ou prejudicar a operação de aparelhos hospitalares, comprometendo a saúde dos pacientes [5]. Como a intensidade do sinal de sistemas Li-Fi é facilmente limitada por paredes, esta tecnologia acaba se tornando uma solução muito simples e interessante para estas situações críticas de interferência eletromagnética. De acordo com [6], é possível atingir a taxa de 224 gigabits

por segundo somente utilizando lâmpadas LED (Light Emitting Diode) caseiras.

1.3 Comunicação entre veículos

Com a tendência de se criar veículos inteligentes com direção autônoma, a possibilidade de otimizar a comunicação entre os próprios automóveis para além das setas e luz de freio torna-se cada vez mais interessante. Um novo recurso seria o envio de um aviso ao carro logo atrás da detecção uma possível colisão à frente (como mostrado na Figura 2). Este tipo de aplicação exige que a comunicação entre os sistemas seja de baixa latência e confiável. Outros alertas podem ser enviados como, por exemplo, um aviso de frenagem, aviso de curva ou problemas mecânicos. Existe também a possibilidade de usar as luzes das vias como forma do automóvel receber informações, como mostrado na Figura 1.

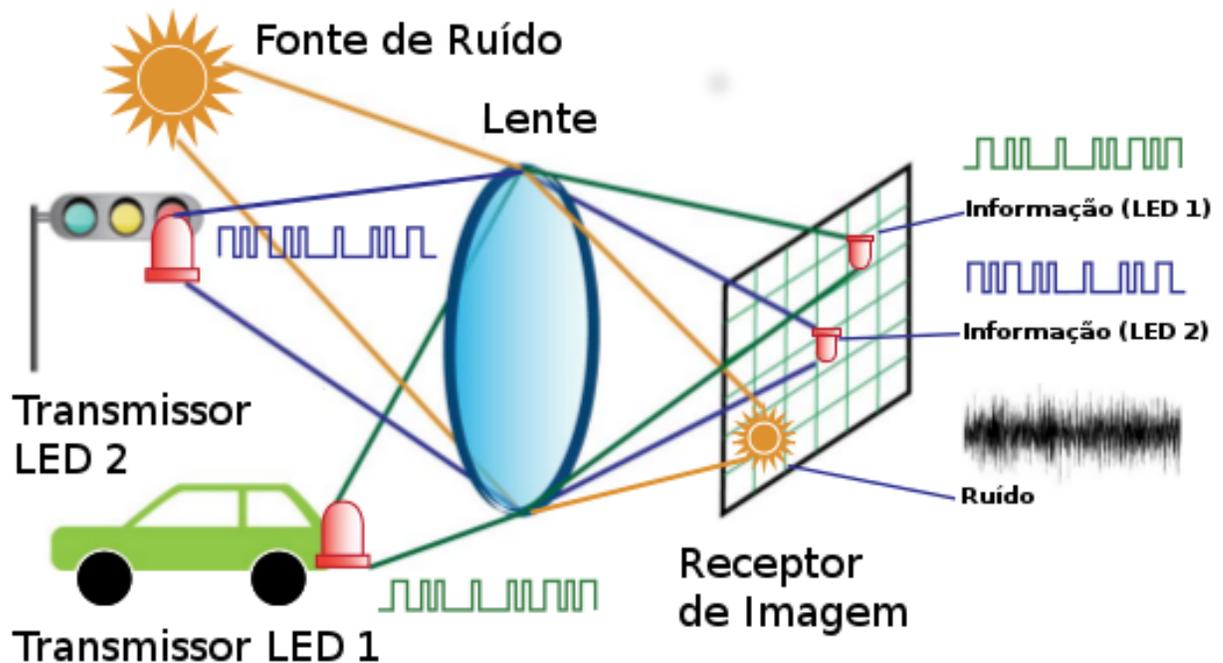


Figura 1: Sistema de comunicação entre automóveis de acordo com [1].

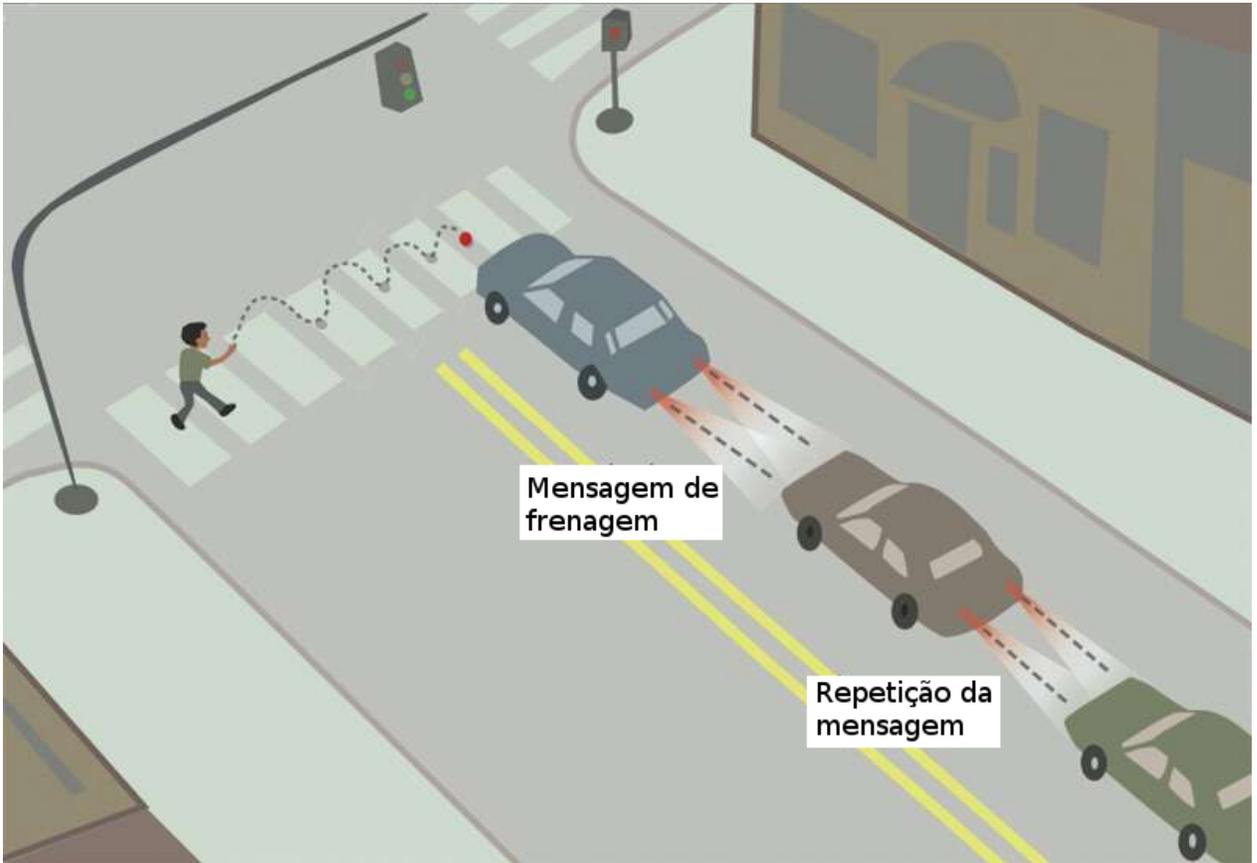


Figura 2: Estrutura de comunicação entre automóveis de acordo com [2].

1.4 Comunicação submarinas

Ondas de radio-frequência não costumam ser um bom meio de comunicação submarina devido a alta condutividade da água. Isso faz com que o VLC seja usado em diversos sistemas de comunicação submarina, como mostrado na Figura [3].

De acordo com [3], o projeto *Un Tethered Remotely Operated Vehicle* (UTROV) é um exemplo de uma destas aplicações do VLC. Uma das funções do ULTROV inclui a manutenção de observatórios oceânicos e a manutenção de navios. A direita da Figura 3 é exemplificado o cenário onde ocorre a comunicação do UTROV através de um canal óptico para uma infraestrutura fixa no fundo do mar. Ao centro da Figura 3, a comunicação ocorre

através de um cabo orientado. A esquerda da Figura 3, é exemplificado o cenário onde ocorre a comunicação do UTROV usando baixa largura de banda.

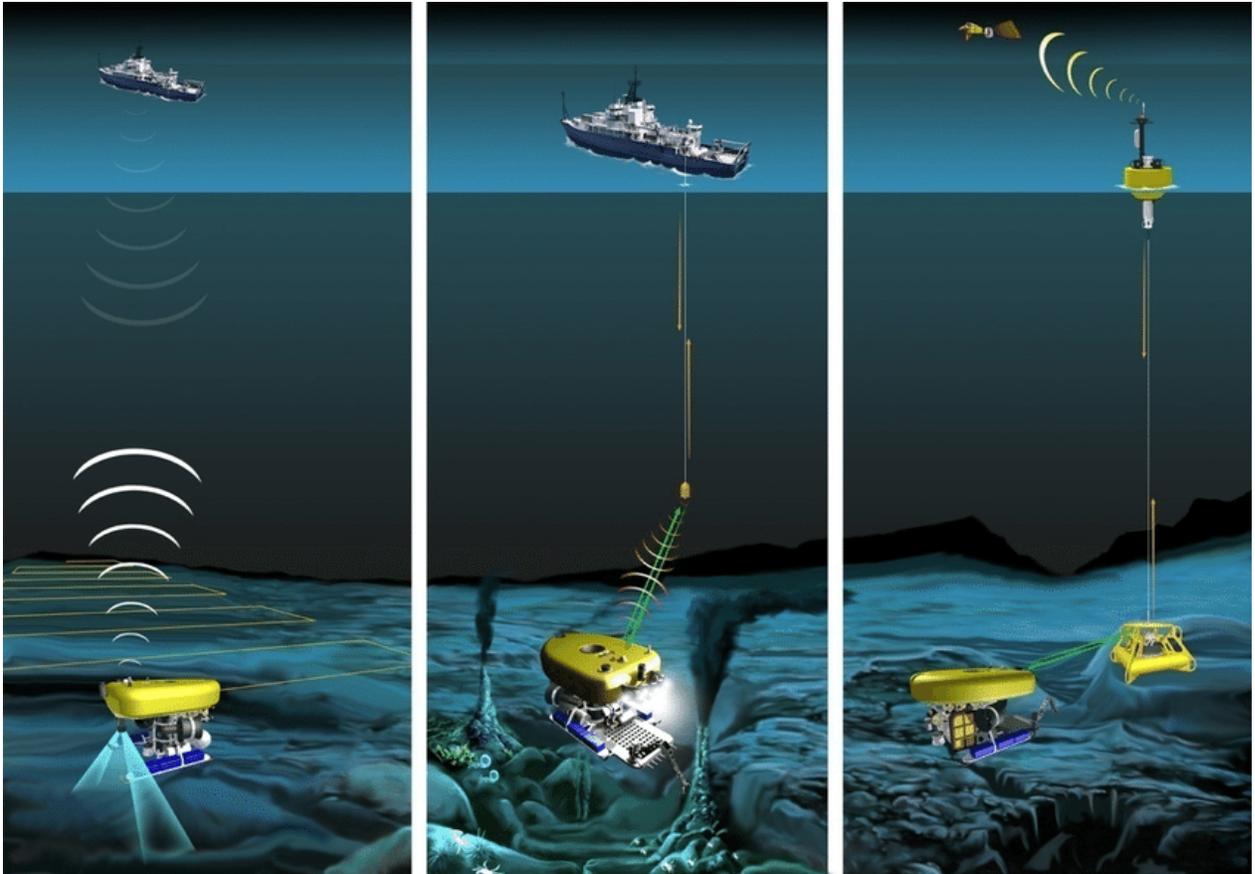


Figura 3: Comunicação submarina de acordo com [3].

No capítulo 3 serão apresentados alguns conceitos importantes para a compreensão do funcionamento e do desenvolvimentos de um sistema VLC.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão abordados alguns princípios teóricos utilizados para sistemas VLC. Primeiro será descrita a faixa de luz visível através do espectro eletromagnético em que está contida. Em seguida será abordada a ideia de comunicação digital e os componentes usados para isso no contexto de VLC. Por fim, será discutido o posicionamento relativo entre emissor e receptor.

2.1 Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético trata-se do conjunto de frequências que podem ser assumidas por uma onda eletromagnética, como mostrado na Figura 4. Neste conjunto existem intervalos de frequência que são relacionados ao comportamento da onda. A faixa utilizada pelo VLC é a faixa de luz visível, que varia de 430 THz (equivalente a cor vermelha) a 790 THz (equivalente a cor violeta).

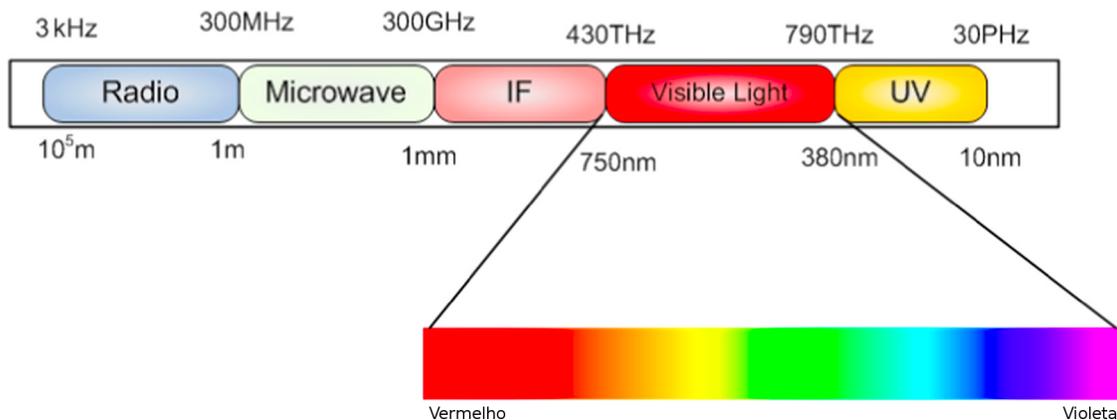


Figura 4: Luz visível no espectro de frequências obtida de [3].

Nas seções 2.2 e 2.3 serão descritos, respectivamente, o funcionamento de um sistema

de comunicação digital e os componentes deste tipo de sistema. Com as ideias dessas seções, poderemos abordar as opções de emissor e receptor óptico, respectivamente, nas seções 2.5 e 2.6.

2.2 Sistema de comunicação digital

De acordo com [3], um sinal é um conjunto de informações que podem variar de acordo com o tempo (onda sonora) ou com o espaço (sinal de radar).

Um sinal pode ser classificado como analógico ou digital. O sinal é digital quando possui um conjunto finito de possíveis valores que pode assumir no eixo y para valores no eixo x . Podemos dar um exemplo em que um sinal digital tem uma mudança de valores de 0 a 1, onde não existe valor intermediário, como mostrado nos sinais retangulares do lado direito da Figura 5. Já o sinal analógico pode ser definido através do conjunto infinito de possíveis valores que podem ser tomados no eixo y para qualquer valor no eixo x . Quando ocorre a variação do sinal contínuo (eixo y) de 0 a 1, ele conseqüentemente precisa assumir todos os valores decimais do intervalo no eixo y [0.10, 0.11, 0.12, ... , 0.98, 0.99], como mostrado no sinal ao lado esquerdo da Figura 5.

Na seção 2.3 serão discutidos detalhes do tipo de formato de modulação que foi aplicado neste projeto para que o receptor óptico pudesse compreender a mensagem enviada pelo emissor.

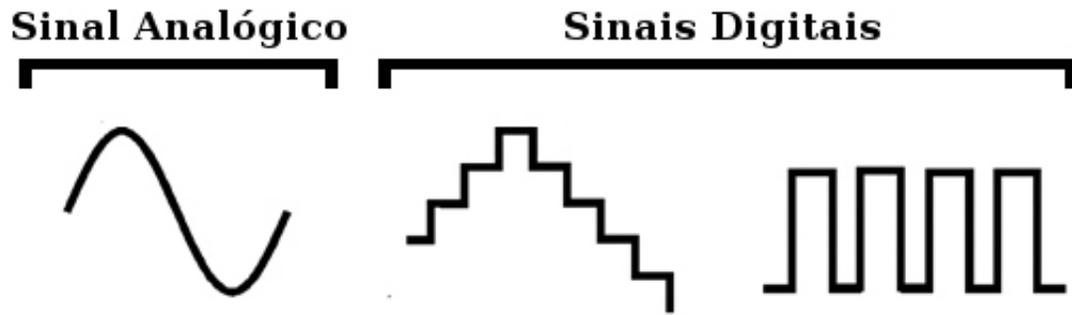


Figura 5: Comparação entre um sinal analógico e alguns sinais digitais.

2.3 Componentes de sistema de comunicação

Para que um sinal possa ser transmitido é necessária a existência de uma propriedade (mecânica ou eletromagnética) que permita que a informação se propague entre dois pontos diferentes do espaço. O elemento responsável pela leitura desta propriedade física é chamado de receptor, enquanto o elemento responsável pelo envio do sinal através desta propriedade de um canal qualquer é chamado de transmissor como mostrado na Figura 6. No caso do VLC, uma faixa do espectro eletromagnético é usada para que seja possível propagar o sinal entre um emissor óptico (um LED ou um Laser, por exemplo) e um receptor óptico (um LDR, fotodiodo ou placa solar, por exemplo).

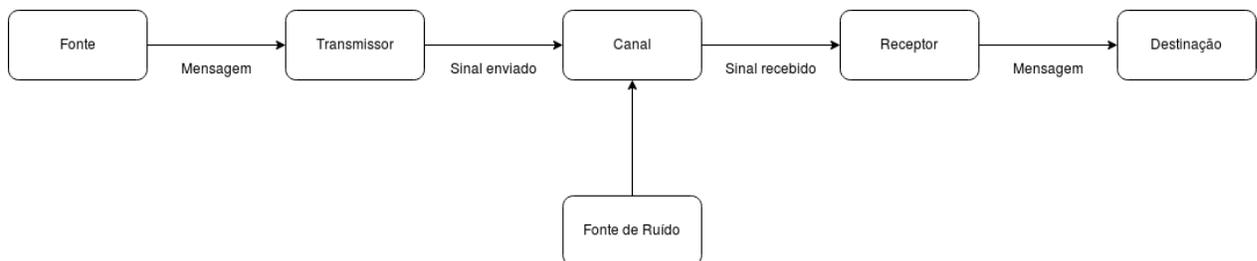


Figura 6: Componentes de um sistema de comunicação.

Para que o emissor e o receptor possam se comunicar é necessário que ambos estejam trabalhando com o mesmo tipo de onda na mesma faixa de frequência. No caso dos protótipos

construídos neste projeto, a fonte de informação equivalente à ilustrada pela Figura 6 é o *buffer* lido pelo Arduino emissor. O componente transmissor é um Arduino equipado de um LED (descrito na seção 2.5). O canal é tido como o espaço livre entre os dois componentes (tendo a luz externa como ruído). Por fim, o componente receptor é um outro Arduino equipado de um LDR ou uma placa solar (ambos explicados na seção 2.6) que escreve a mensagem em um *buffer* do computador (destinação).

Para que esta mensagem seja transmitida e compreensível ao emissor e receptor, é necessário definir um formato de modulação, que será discutido na seção 2.4.

2.4 Modulação

Quando vamos transmitir um sinal qualquer precisamos tratá-lo para que se adapte ao tipo de canal usado. De acordo com [17], este tratamento pode ser entendido como modulação. Em sistemas de comunicação digital, a modulação pode acontecer de duas formas: Em banda base ou através de uma portadora. Na modulação em banda base, o espectro de frequências do sinal se mantém centrado no espectro. Já quando a modulação ocorre através de uma portadora, o sinal original tem seu espectro deslocado no domínio de frequências para melhor se adaptar ao meio. As modulações também podem ser classificadas em binária ou multi-nível. A modulação binária funciona com somente dois símbolos, enquanto a multinível possui mais de dois.

Um exemplo de modulação binária de banda base seria o caso da modulação OOK (*On-Off-Keying*), que se baseia no envio dos símbolos 0 e 1. De acordo com [17], “os dois

símbolos consistem em duas amplitudes de uma grandeza física tal como a corrente ou a tensão de um sinal elétrico”.

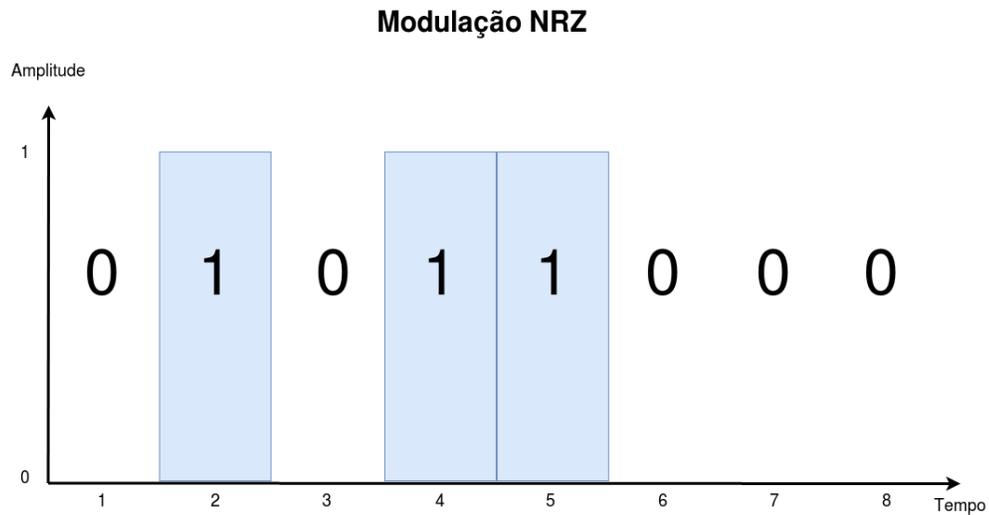


Figura 7: Comportamento do sinal NRZ no tempo

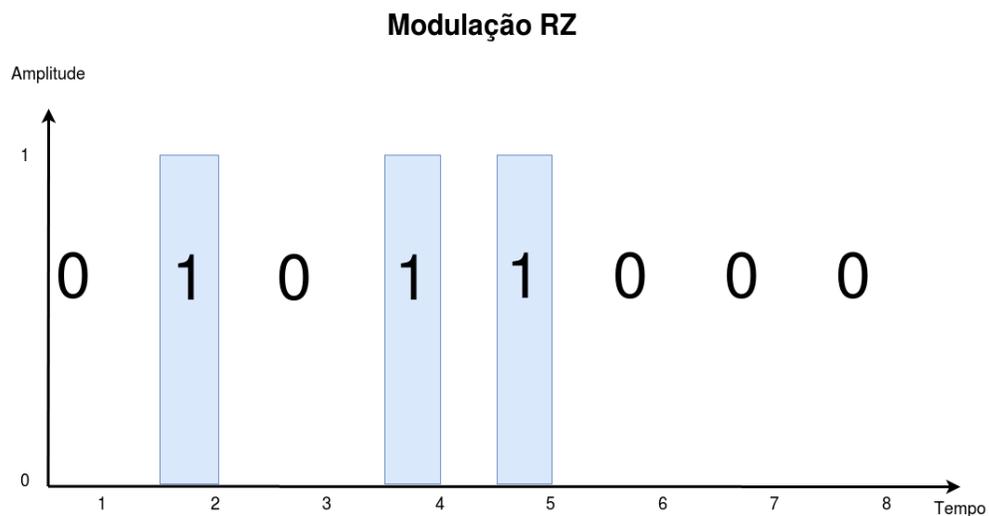


Figura 8: Comportamento do sinal RZ no tempo

Ainda de acordo com [17], “quando o impulso que representa o bit “1” tem uma duração igual ao período de um bit, diz-se que o sinal é do tipo não-retorno-a-zero (NRZ - *Non-Return-to-Zero*). Quando a duração dos impulsos é inferior à duração de um bit, o

sinal é do tipo retorno-a-zero (RZ - *Return-to-Zero*)”, como mostrados respectivamente nas Figuras 7 e 8. Define-se o tempo de bit (T_b) de acordo com a equação (1), onde R é a taxa de bit do sistema, M é a quantidade de símbolos e T_b é o tempo de cada símbolo:

$$T_b = \frac{1}{R} = \frac{T_s}{\log_2 M} \quad (1)$$

Quando o sinal é lido pelo receptor, é necessário definir intervalos do sinal recebido que vão corresponder a cada símbolo usado pelo sistema. Este processo é chamado de quantização. Como somente existem dois símbolos no caso OOK, podemos definir um limiar que separa os dois intervalos correspondente aos símbolos “0” e “1” como mostrado na constelação binária da Figura 9. Este limiar também pode ser tomado de forma empírica levando em conta o ruído que será somado na recepção do sinal.

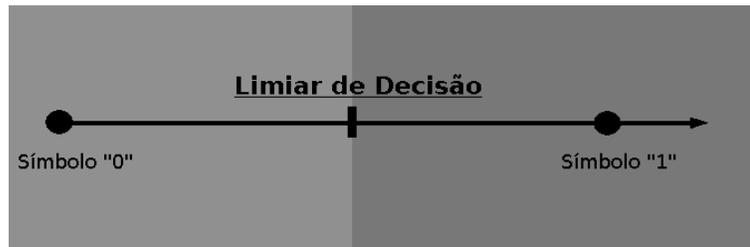


Figura 9: Limiar de decisão entre os símbolos “0” e “1” em relação à amplitude do sinal

Como mencionado, na seção 2.5 será descrito o componente de emissão óptica e na seção 2.6 será descrito o componente responsável pela recepção óptica.

2.5 Emissor Óptico

Existem dois principais emissores ópticos citados por [7]: O diodo emissor de luz (LED) e o Laser. Devido à facilidade de obtenção e baixo custo, este trabalho usa o LED como transmissor. Na seção 2.5.1 vamos explicar o funcionamento deste componente

2.5.1 LED

O LED é um tipo de diodo que tem como seu comportamento característico a emissão de luz ao ser polarizado. Como mostrado na Figura 10, o LED é feito a partir de uma junção p-n, ou seja, através de um material semicondutor que pode ser dividido em duas partes: A primeira é composta por cargas positivas equivalentes às lacunas geradas pela ausência de um dos elétrons na camada de valência do átomo do material semicondutor. A segunda parte é feita a partir de cargas negativas equivalentes aos elétrons livres.

De acordo com [12], a emissão de fótons ocorre devido à aplicação de uma tensão que gera um campo eletromagnético e faz com que as cargas positivas da junção p e as cargas negativas da junção n se direcionem a uma região intermediária neutra, onde ocorre a recombinação das cargas e conseqüentemente a liberação de energia através de fótons.

Na seção 2.6 falaremos sobre o funcionamento de receptores ópticos na faixa de luz visível.

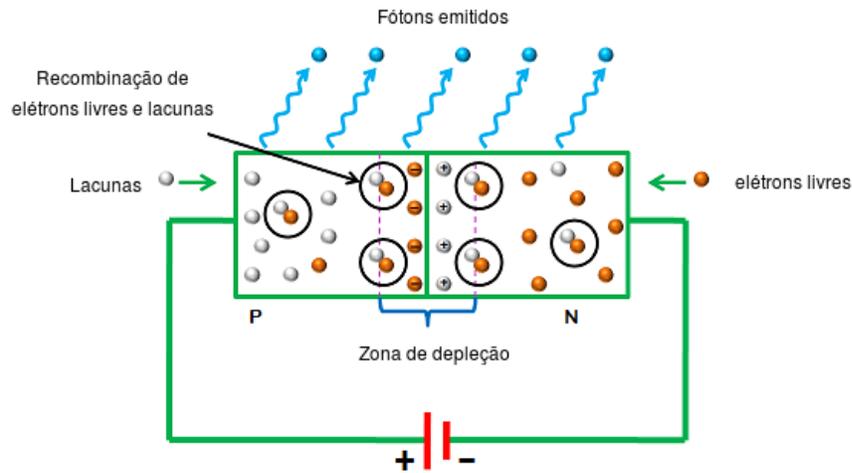


Figura 10: Estrutura do LED de acordo com [13]

2.6 Receptor Óptico

Para receber o sinal enviado, foram utilizados dois tipos de dispositivos eletrônicos: Um LDR (Light Dependent Resistor) e uma placa solar. Nas seções 2.6.1 e 2.6.2 será explicado o funcionamento do LDR e da placa solar, respectivamente.

2.6.1 LDR

O LDR (*Light Dependent Resistor* ou resistor dependente de luz), também chamado de fotorresistor, é um tipo de resistor cuja resistência é variável de forma inversamente proporcional à quantidade de luz incidente. Os LDRs geralmente são fabricados com Sulfeto de Cádmio (CdS) ou Sulfeto de Chumbo (PbS). Ao movermos um LDR de uma área com alta iluminação para uma área escura, sua resistência deve aumentar. A incidência de luz causa a saída dos elétrons da camada de valência para a camada de condução, aumentando a condutividade e reduzindo a resistência. Quando a incidência de luz cessa, ocorre o retorno dos

elétrons para a camada de valência, reduzindo a condutividade e aumentando a resistência do componente. Esta variação da resistência (medida em $k\Omega$) pela iluminância (medida em Lux) é linear e pode ser visualizada na Figura 11.

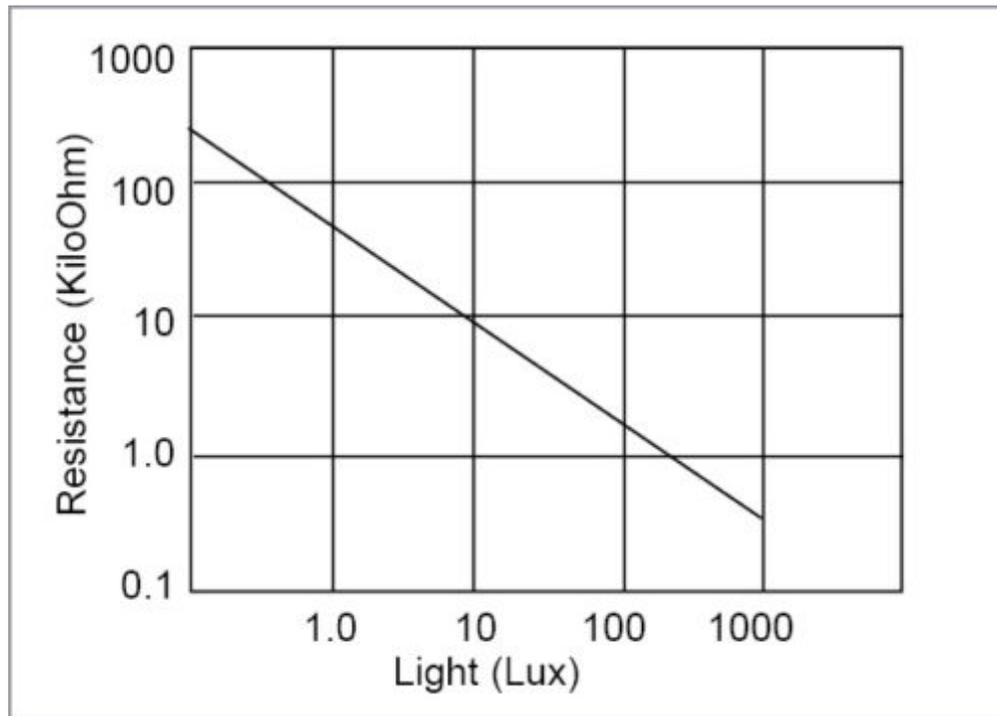


Figura 11: Comportamento linear da resistência do componente (em $k\Omega$) pela iluminância (em Lux) de acordo com [15].

De acordo com [14], a resistência também depende do comprimento de onda incidente, como evidenciado na Figura 12. Por ter maior resposta relativa na faixa da luz visível verde-amarela, o LDR é um componente muito utilizado para detectar o nascer e o por do sol.

Ainda de acordo com [14], a variação de resistência não acontece ao mesmo tempo que a variação de iluminância. Quando ocorre a troca de um ambiente claro para um ambiente escuro, a latência geralmente está em torno de 1 segundo para cada $200k\Omega$ de resistência. Já a variação de um ambiente escuro para um ambiente claro costuma ser muito mais rápida,

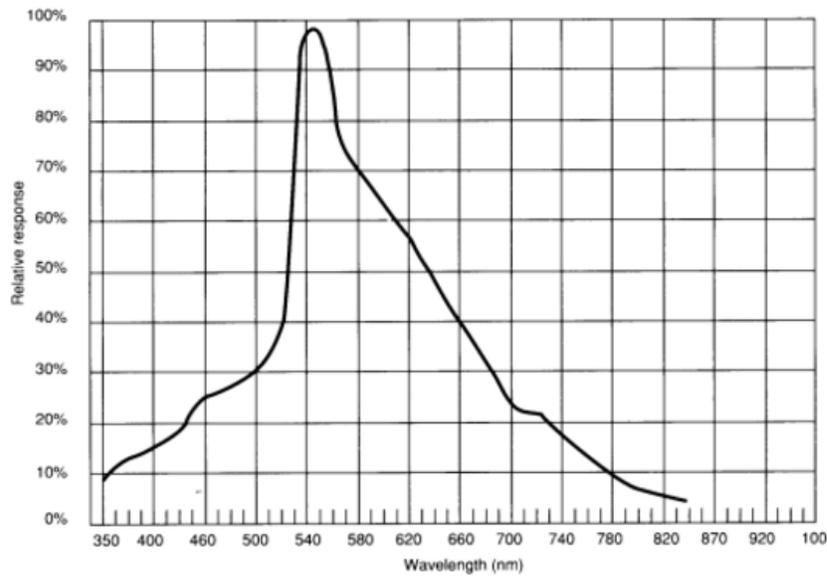


Figura 12: Resposta da variação da resistência de acordo com o comprimento de onda incidente de acordo com [16]

em torno de 10 ms.

2.6.2 Placa solar

O efeito fotovoltaico acontece quando os fótons são absorvidos pelo material semicondutor da célula fotovoltaica, geralmente baseada em compostos de silício.

Quando o fóton incide sobre o material, os elétrons da camada de valência passam para a camada de condução, de forma análoga ao LDR. Com os elétrons livres, temos cargas negativas e positivas que podem fluir pelo material. As cargas positivas são oriundas da lacuna deixada pela saída do elétron para camada de condução e se movem através da recombinação frequente das lacunas com outros elétrons. Com a diferença de polaridade no material, os elétrons livres são atraídos para uma região de carga negativa, onde será gerada uma diferença de potencial em relação ao polo positivo.

Embora a aplicação tradicional para placas solares seja a geração de energia, neste projeto será testada a hipótese de usá-las para receber informação luminosa.

Na seção 2.7 serão discutidas diferentes configurações de posicionamento de emissores e receptores em um sistema VLC e sua influencia no desempenho do sistema.

2.7 Posicionamento do sistema VLC

A principal análise do canal VLC feita em [12] envolve principalmente o posicionamento relativo entre emissor e receptor. O principal fator usado para definir este posicionamento é chamado de LOS (*Line Of Sight*). Diz-se que um sistema possui LOS quando existe uma linha imaginária ligando diretamente o emissor e o receptor, fazendo com que a reflexão da luz não seja necessária ao funcionamento do sistema. Sendo assim, podemos classificar os sistemas VLC em três tipos:

- Podemos considerar que o sistema possui LOS, ou seja, o receptor e o transmissor são direcionados para um ponto específico. Este tipo de configuração aumenta a eficiência energética, bem como a imunidade aos efeitos de distorção ambiental (luz do sol ou lâmpadas).
- Podemos considerar que o sistema não possui LOS, ou seja, o receptor e o transmissor não são direcionados para um ponto específico. Neste caso são necessários transmissores com um grande campo de visão (FOV, *field of view*) para que seja melhorada a captação da luz refletida pelo ambiente. A principal desvantagem é a alta potência de emissão

necessária para compensar as altas perdas e distorções causadas por pela incidência de diversos raios que percorreram caminhos diferentes.

- Outra possibilidade seria uma configuração híbrida, considerando como exemplo um transmissor de feixe direcionado a um ponto específico e um receptor com uma grande FOV que não está alinhado a uma direção específica.

Outro tipo de classificação seria feita através da LOS entre o par transmissor-receptor. Existem três opções nesta categoria de configuração.

- A primeira seria considerar que a LOS não encontra interrupções ou obstáculos entre transmissor e receptor, desconsiderando reflexão e mantendo uma alta eficiência de transmissão, como mostrado em 13.a.
- Já no caso que a LOS encontra interrupções, os sinais que emergem da fonte não chegam diretamente ao receptor. Eles são refletidos de diferentes superfícies ou objetos e chegam em intervalos de tempo diferentes para o receptor. Isso causa distorções multi percurso e torna a estimativa da perda de trajetória muito mais difícil, como mostrado em 13.b.

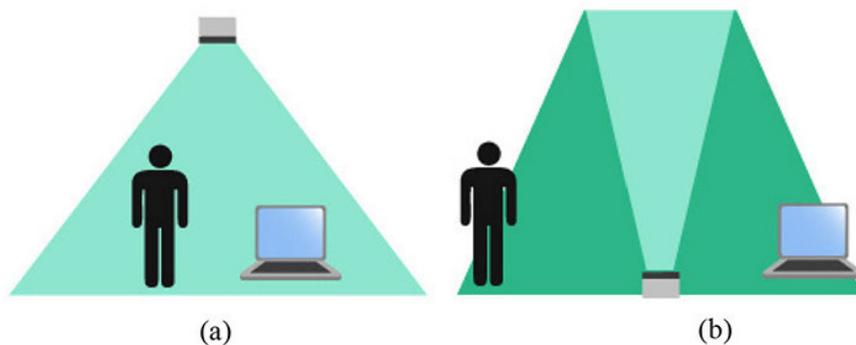


Figura 13: Situações de iluminação respectivamente sem e com obstáculo de acordo com [19].

3 Metodologia

Neste trabalho optamos por desenvolver um sistema de comunicação de luz visível facilmente replicável e com o uso de plataformas abertas e acessíveis. Sendo assim, nesta seção serão descritas as plataformas e abordagens utilizadas para a criação deste sistema.

3.1 Configuração usada

Para seguir com o protótipo do sistema foi usada a plataforma Arduino. Um Arduino foi usado para a montagem do transmissor, lendo os dados do *buffer* USB do computador conectado a ele (através do diretório `/dev/ttyUSB0`) e convertendo-os em sinais elétricos que são enviados ao LED usado no emissor. De forma similar, outro Arduino foi usado na construção do receptor, que recebia o sinal elétrico a partir do sensor luminoso (LDR (Light Dependent Resistor) ou uma placa solar) e, após decodificar a mensagem, escreve-a no *buffer* de USB do computador conectado (através do diretório `/dev/ttyUSB1`), como mostrado na Figura 14.

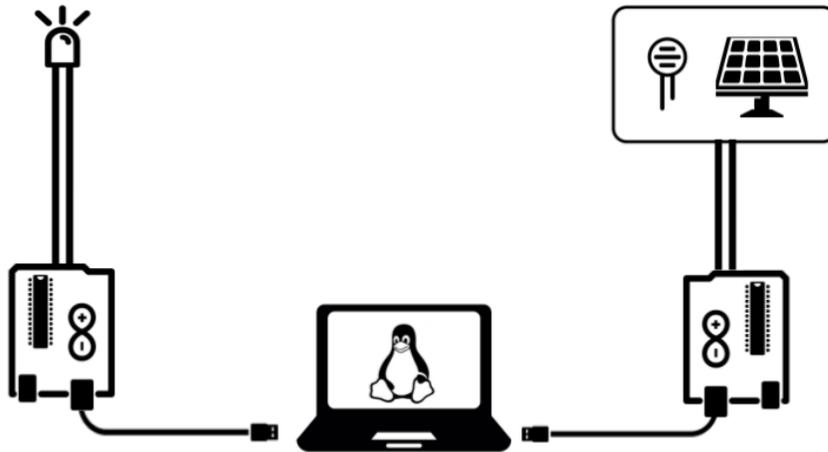


Figura 14: Configuração usada para montagem e teste do sistema

Todos os componentes de emissão e recepção, incluindo o Arduino e os dispositivos, foram fixados dentro de uma caixa escura e conectados a partir de uma *protoboard*. Na seção 3.1.1 falaremos sobre a plataforma Arduino.

3.1.1 Plataforma Arduino

De acordo com o site oficial [18], “O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em *hardware* e *software* fáceis de usar. Placas Arduino são capazes de ler entradas - luz em um sensor, dedo em um botão ou uma mensagem no Twitter - e transformá-lo em uma saída - ativando um motor, ligando um LED, publicando algo on-line. Você pode dizer à sua placa o que fazer enviando um conjunto de instruções para o microcontrolador na placa”.

O Arduino usado neste projeto é o modelo UNO, feito a partir de um microcontrolador Atmel ATmega328 de 8 bits que possui 2 KB de RAM, 1 KB de EEPROM e opera a

16 MHz (embora outras placas Arduino operem a até 20MHz).

Nas seções 3.2, 3.3 e 3.4 serão discutidas as diferentes abordagens utilizadas para criar um protótipo funcional. No primeiro protótipo foi utilizado um LDR como sensor luminoso. No segundo, foi utilizado um canal infravermelho adicional. Por fim, no terceiro protótipo utilizamos uma placa solar como sensor.

3.2 Primeiro Protótipo

Neste protótipo foi feito um sistema composto por um conjunto de emissor e de receptor com o propósito de transmitir uma sequência simples de bits (zeros e uns), sem o uso de nenhuma codificação de caracteres.

A comunicação acontece através do uso de uma modulação binária cujo sinal não retorna a zero (NRZ). Para que o sinal seja entendido pelo receptor como 0 ou como 1, precisa ser definido um limiar de decisão, assim como mostrado na Figura 9. Se o sinal lido for maior que este limiar, o símbolo recebido será compreendido como 1, caso contrário será compreendido como 0.

O emissor é constituído de um Arduino que aplica tensão sobre um LED junto a um resistor, como mostrado na Figura 15. Este Arduino faz a leitura do *buffer* `/dev/ttyUSB0` do computador com sistema operacional Linux e faz o LED emitir um sinal luminoso ao enviar o bit “1” e se apagar ao enviar o bit “0”. O byte “10101010” é enviado no início e no fim da mensagem para que o receptor saiba quando começar e terminar de armazenar os valores.

Já o receptor é composto de um Arduino que faz a leitura da tensão sobre um LDR que está em um divisor de tensão junto a um resistor, como mostrado na Figura 16. A faixa de amostragem do *input* do Arduino varia de 0 a 1023. Através da leitura deste valor escrito pelo Arduino receptor no buffer `/dev/ttyUSB0`, foi verificado experimentalmente que o valor de 200 seria um limiar que permitiria distinguir os dois símbolos recebidos (considerando a transmissão em um tempo de bit de 3 a 4 segundos, taxa de aproximadamente 0.25 bits por segundo). Este valor foi usado como limiar de decisão durante todo este trabalho.

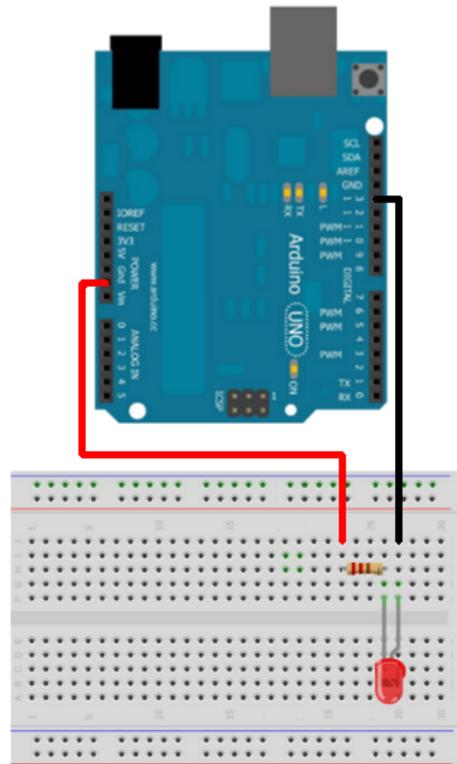


Figura 15: Esquema emissor inicialmente montado.

A transmissão dificilmente acontecia sem erros quando o tempo de bit era colocado a menos de 1 segundo. Ao verificar os valores escritos pelo Arduino de recepção no *buffer* `/dev/ttyUSB1` do computador, foi possível notar que as falhas eram causadas pela dessin-

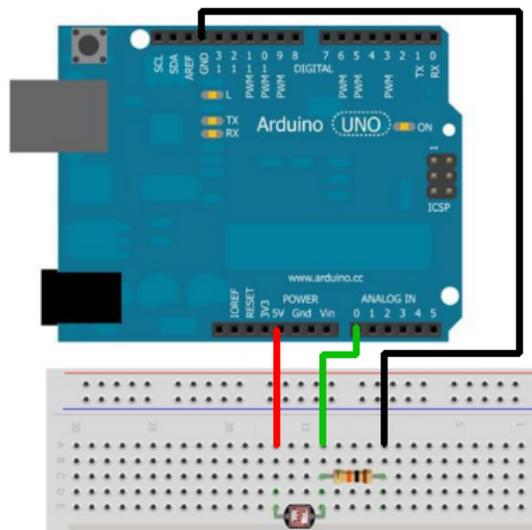


Figura 16: Esquema receptor inicialmente montado.

cronização entre os sistemas de emissão e recepção, possivelmente causado pelo tempo de descarga tomado pelo LDR ao retornar de um valor alto e um valor baixo, como explicado na seção 2.6.1.

Ao olhar a luz emitida fica evidente a separação entre os pulsos devido ao grande tempo de bit adotado. Com a ideia de tornar a luz mais próxima a um sinal contínuo constante quando percebido a olho nu, no protótipo 3 (seção 3.4) o LDR será trocado por uma placa solar. Na seção 3.3 será desenvolvido o protótipo 2 que tem como objetivo resolver o problema de sincronização através da adição de um canal infravermelho que sinaliza ao receptor o momento em que uma mensagem está sendo enviada pelo canal VLC.

3.3 Segundo Protótipo

Este protótipo foi desenvolvido com o intuito de controlar melhor a sincronização entre início e fim da sequência de bits enviada. Continuando a partir do projeto anterior, foi inserido um emissor e um receptor infravermelho nas placas Arduinos como mostrado na Figura 17, adicionando um canal infra-vermelho.

O novo canal inserido deve ser usado para que o emissor sinalize ao receptor o momento em que o envio dos bits por luz visível ocorre. Se a sequência de bits não está sendo enviada, nenhum sinal infravermelho deve ocupar o novo canal. Porém, no momento em que ocorre o envio da mensagem, o emissor deve enviar uma potência nesta faixa do infravermelho, sinalizando ao receptor que deve começar a guardar as amostras dos pulsos de luz visível enquanto o sinal de infravermelho também continuar presente.

Ao testar o protótipo com o canal adicional, foi notado que a leitura do sinal luminoso não ocorre com sucesso devido à influência de um sinal periódico de origem desconhecida. Tendo esta situação em vista, voltamos a considerar o sistema sem o canal infravermelho no protótipo 3, desenvolvido na seção 3.4.

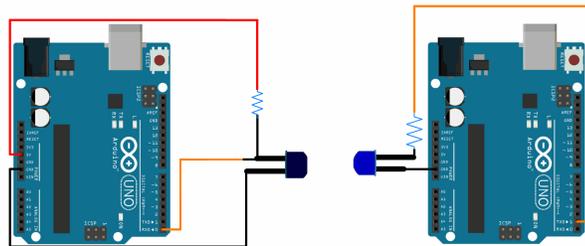


Figura 17: Sistema elétrico associado à adição do canal de infravermelho baseado em [20].

3.4 Terceiro Protótipo

Dada a falha do canal de infravermelho testado no segundo protótipo, voltamos toda a eletrônica da mesma forma em que estava no primeiro protótipo, trocando somente o LDR pela placa solar para que o sensor usado tenha um tempo de leitura menor.

Ao testar a transmissão da sequência de bits, com o mesmo tempo de bit de 2 segundos e com o mesmo limiar de quantização de 200 utilizado no primeiro protótipo, nota-se que a transmissão ocorre com sucesso em todos os momentos.

Neste protótipo também foi trabalhada a forma estabelecida entre o emissor e o receptor para determinar o tamanho da mensagem. No protótipo 1, o fim da mensagem era detectado através do envio e recepção de um determinado *byte*, correspondente à sequência “10101010”. Sendo assim, o receptor do protótipo 1 se mantém lendo cada novo bit da mensagem até que receba tal caractere (sem ter conhecimento do tamanho da mensagem enviada até que receba o *byte* final). No protótipo 2, que não chegou a funcionar, a ideia era definir o intervalo entre o primeiro e o último *byte* através do envio de um sinal infravermelho em um canal paralelo, o que evitaria de carregar a mensagem com informação de cabeçalho (como *bit* inicial ou tamanho da mensagem). Já neste protótipo, a informação do tamanho está em um dos dois *bytes* do cabeçalho da mensagem enviada. O primeiro *byte* do cabeçalho é usado somente para sinalizar o início do envio da mensagem e o segundo deles usado para enviar o valor correspondente ao tamanho total da mensagem, como mostrado na Figura 18.

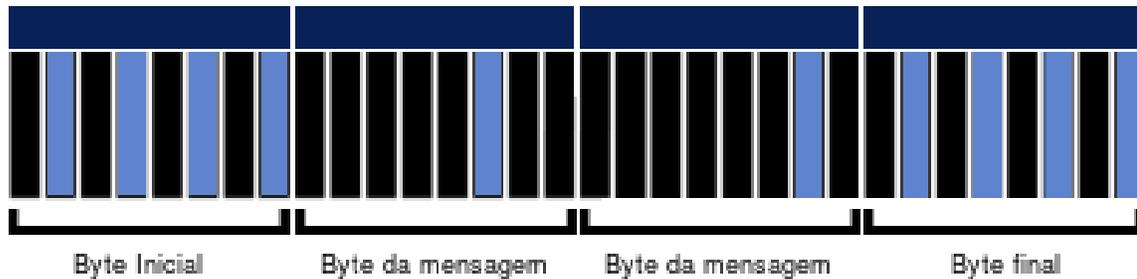
Notando que a transmissão acontece com sucesso, os passos realizados para o envio da mensagem são:

- O Arduino emissor faz a leitura dos dados colocados no *buffer* `/dev/ttyUSB0` do computador conectado;
- Ocorre envio de um byte que sinaliza o início da comunicação por sinal luminoso, através do envio sequencia “10101010”, correspondente ao caractere “a” de acordo com a tabela ASCII;
- Ocorre o envio por sinal luminoso do número de bytes total da mensagem lida do *buffer* a ser transmitida (se formos transmitir uma mensagem com 2 bytes, devemos enviar a sequencia correspondente ao caractere 2 obtido a partir da tabela ASCII, “00000010”);
- Ocorre o envio bit a bit através de sinal luminoso da mensagem inicialmente lida.
- Por fim, o Arduino receptor escreve a mensagem recebida no buffer `/dev/ttyUSB1` do computador, finalizando o envio do pacote

Ao testar o sistema, foi possível observar que quanto maior a mensagem enviada, maior a chance de ocorrer algum erro na leitura de algum dos bits. Quando um destes bits é amostrado no momento errado por algum problema de sincronização, todos os bits seguintes até o final da mensagem também sofrerão o mesmo erro de amostragem. Sendo assim, vemos que é interessante subdividir as mensagens grandes em outras menores para reduzir a propagação de eventuais erros de sincronização.

Durante o envio de mensagens curtas, o sistema funcionou sem erros em todas as tentativas depois de implementar os padrões descritos acima, manter o limiar da quantização binaria em 200 e reduzir o tempo de bit para aproximadamente 500 ms (frequência de 2

Sequência de bits do protótipo 1



Sequência de bits do protótipo 3

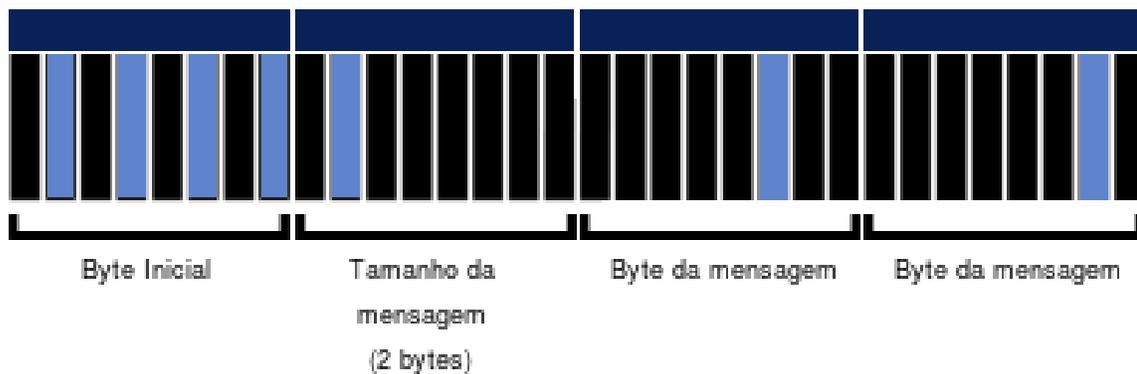


Figura 18: Comparação de mensagem enviada no primeiro e no terceiro protótipo, onde o espaço azul representa um bit “1” e o espaço preto representa o bit “0”

Hz). Este tempo de bit varia de acordo com a troca de componentes do circuitos por outros com valores equivalentes, possivelmente devido à imprecisão gerada na fabricação destes. Observado o sucesso na transmissão, na seção 3.5 analisa-se através de um osciloscópio o sinal elétrico aplicado ao LED e gerado pela placa solar do protótipo 3.

3.5 Comportamento do sinal enviado e recebido

Notado o funcionamento do protótipo 3, algumas observações são feitas através do osciloscópio no sinal elétrico incidente no LED emissor e gerado pela placa solar receptora. Ao colocar o canal 2 do osciloscópio (verde) nos polos do LED emissor e o canal 1 (amarelo) nos polos da placa solar receptora, foi possível obter as leituras das figuras 19 e 20.

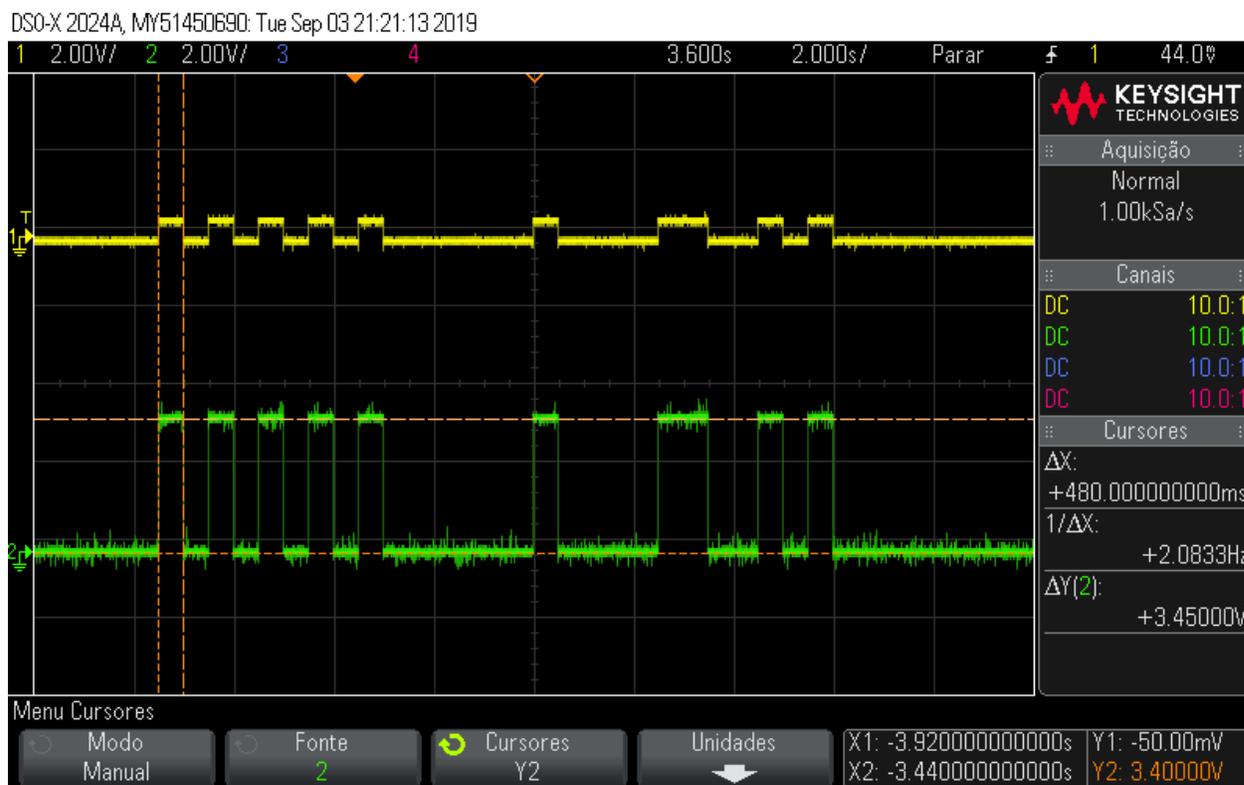


Figura 19: Medição no osciloscópio do sinal elétrico aplicado ao LED

Nota-se que cada degrau de amplitude de 3.45 V aplicado ao LED no canal 2 é percebido pela placa solar no canal 1 através de um salto de amplitude de 550 mV que mantém o formato de degrau. Nota-se que o estado baixo do sinal recebido é relativamente próximo a zero (-125 mV). Isto acontece devido ao isolamento luminoso de todo o sistema de transmissão em caixa fechada, permitindo a melhor visualização do comportamento do

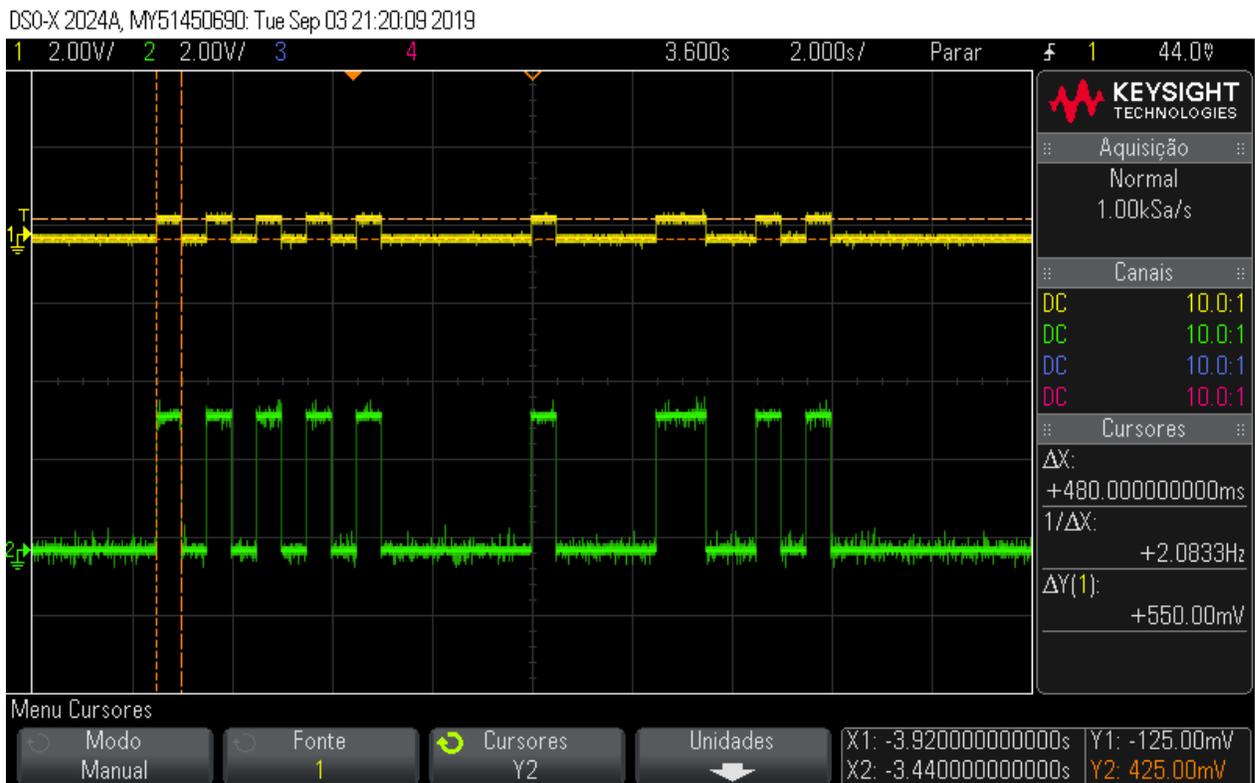


Figura 20: Medição no osciloscópio do sinal gerado pela placa solar

sistema sem o ruído causado pela luz externa.

De forma parecida com o protótipo feito em [21], é possível notar uma alta cintilação no LED emissor que pode ser incômoda para ambientes usados por pessoas.

Protótipo	1	2	3
Emissor	LED	LED e emissor IR	LED
Receptor	LDR	LDR e receptor IR	Placa solar
Fim da mensagem	Sinalizado por bit especial	Sinalizado através da falta do sinal de IR	Tamanho da mensagem definido no segundo byte enviado
Tempo de bit em funcionamento	3 segundos	-	500 ms
Percepção visual em funcionamento	Pulsos demorados	-	Cintilante

Tabela 1: Diferenças de configuração e funcionamento entre os protótipos

A Tabela 1 sintetiza as principais diferenças de configuração e funcionamento entre os protótipos desenvolvidos. A Figura 21 mostra o protótipo 3 montado e a seção 4 aborda seus resultados.

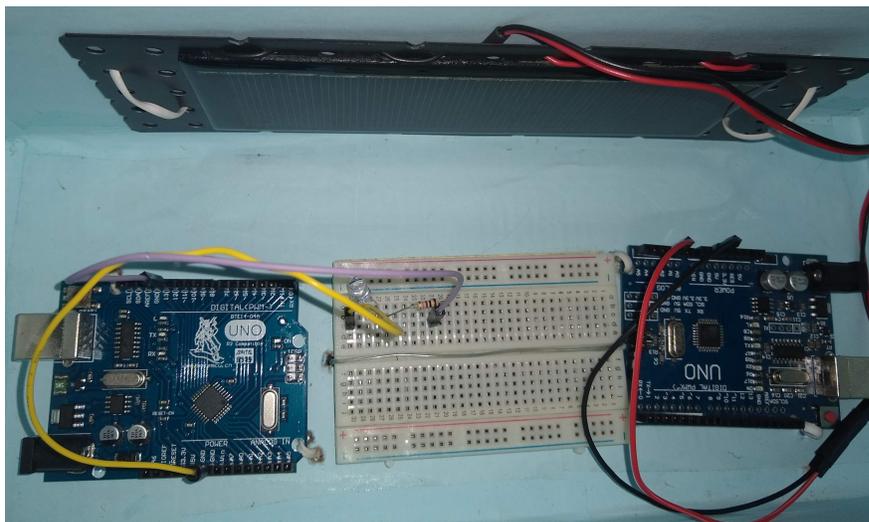


Figura 21: Foto da montagem do protótipo 3.

4 Resultados e Conclusão

Foi possível construir um sistema de emissão e recepção baseado em luz visível a partir da eletrônica e da lógica implementada no Arduino. Na transmissão das mensagens inseridas na entrada `/dev/ttyUSB0` do Linux lidas pelo Arduino responsável pela emissão e colocadas no buffer `/dev/ttyUSB1` pelo Arduino de recepção, o tempo de bit foi definido como 500 ms (frequência de 2 Hz), este tempo é consequência do intervalo tomado para iterar sobre os bits da mensagem e do intervalo levado para trocar o estado das portas do emissor e receptor. Nota-se também que, conforme maior a cadeia de caracteres enviada, maior a chance de ocorrer um erro na transmissão, afetando não só o caractere enviado no momento do erro assim como toda a sequência seguinte até o final do *buffer*.

Para reduzir a propagação de erros de bits causados por dessincronização, é interessante dividir mensagens grandes em outras menores. Caso um dos bits de uma das mensagens menores seja transmitido com erro, a sequência seguinte de bits tende a ser menor que em uma mensagem grande, reduzindo a taxa de erro.

Uma característica desejável de um sistema de VLC que possa ter uso doméstico é a ausência de cintilação no LED. Para que a transição entre os níveis de luminosidade emitidos não sejam perceptíveis, é necessário que o tempo de bit seja menor ou igual a 10 ms, sendo que o protótipo com menor tempo de bit possui 500 ms. Reduzir este tempo de bit é interessante para possibilitar que este sistema possa ser utilizado como um canal para sistemas de Li-Fi doméstico.

Mesmo com esta cintilação perceptível, o sistema ainda pode ser usado em ambi-

entes de baixa interação humana, como uma fábrica altamente automatizada, sistemas de comunicação submarinos e locais remotos (como plataformas de petróleo por exemplo).

Os próximos pontos de continuidade para melhorar a eficiência do sistema seriam:

- Obter componentes emissores e receptores com menor constante de tempo, permitindo reduzir o tempo de bit e aumentar a frequência do sistema que idealmente estaria aproximado a 60 Hz, frequência hoje usada em sistemas de iluminação.
- Otimizar o algoritmo para iterar diretamente sobre os bits da string ao invés de iterar sobre cada bit de cada caractere.
- Migrar a lógica implementada no Arduino diretamente para um hardware, uma FPGA (Field-programmable Gate Array) por exemplo, aumentando o tempo de processamento da mensagem nos Arduinos.

Referências

- [1] IEEE. A New Automotive VLC System Using Optical Communication Image Sensor. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7454688?reload=true>. Acesso em: 02 nov. 2019.
- [2] TURAN, Bugra; UCAR, Seyhan. Vehicular Visible Light Communications. Disponível em: shorturl.at/fGIRZ. Acesso em: 02 nov. 2019.
- [3] KHAN, LATIF ULLAH. Visible Light Communication: Applications, Architecture, Standardization and Research Challenges. Disponível em: <https://goo.gl/uuD1Yg>. Acesso em: 24 mar. 2019.
- [4] JOHNSTON, Hamish. Isamu Akasaki, Hiroshi Amano and Shuji Nakamura win 2014 Nobel Prize for Physics. Disponível em: <https://bit.ly/33htq27>. Acesso em: 5 nov. 2019.
- [5] POHLMANN, CHRISTIAN. Visible Light Communication. Disponível em: <https://goo.gl/6RnKDY>. Acesso em: 24 mar. 2019.
- [6] TECHWORLD. What is Li-Fi? Everything you need to know. Disponível em: <https://www.techworld.com/data/what-is-li-fi-everything-you-need-know-3632764/>. Acesso em: 02 dez. 2019.
- [7] Agrawal GP. Fiber-optic communication systems; 2012 Feb 23.
- [8] KITANO, Shogo. LED road illumination communications system. Disponível em: <https://bit.ly/32fDXcR>. Acesso em: 5 nov. 2019.

- [9] ZIGA, Lisa. Siemens Sets New Record for Wireless Data Transfer using White LEDs. Disponível em: <https://bit.ly/2JOdMDu>. Acesso em: 5 nov. 2019.
- [10] PHILIPS. Indoor positioning for superior customer service at Carrefour. Disponível em: <https://philips.to/2NfdK9W>. Acesso em: 5 nov. 2019.
- [11] HAAS, Harald; YIN, Liang; WANG, Yunlu. What is LiFi? Disponível em: <https://goo.gl/JNRzoS>. Acesso em: 24 mar. 2019.
- [12] Cevik, Taner. An Overview of Visible Light Communications Systems. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1512.03568.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2019.
- [13] PHYSICS AND RADIO ELECTRONICS. Light Emitting Diode (LED). Disponível em: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/lightemittingdiodeledconstructionworking.html>. Acesso em: 02 nov. 2019.
- [14] Tudo sobre LDR (Resistor Dependente da Luz). Disponível em: <http://mundoengenharia.com.br/tudo-sobre-ldr-resistor-dependente-da-luz/>. Acesso em: 24 mar. 2019.
- [15] ELECTRONICSFORU.COM. How to Play With Light Using LDR. Disponível em: <https://electronicsforu.com/electronics-projects/play-light-using-ldr/>. Acesso em: 2 dez. 2019.
- [16] LEDNIQUE. Light dependent resistor (LDR). Disponível em: <http://lednique.com/opto-isolators-2/light-dependent-resistor-ldr/>. Acesso em: 02 dez. 2019.

- [17] Técnicas de modulação. Disponível em:
|<http://www3.dsi.uminho.pt/adriano/Teaching/Comum/TecModul.html>|. Acesso em: 24 mar. 2019.
- [18] ARDUINO. What is Arduino? Disponível em:
|<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>|. Acesso em: 24 mar. 2019.
- [19] THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. Rate-adaptive visible light communication at 500Mb/s arrives at plug and play. Disponível em: |<https://spie.org/news/5196-rate-adaptive-visible-light-communication-at-500mb/s-arrives-at-plug-and-play?SSO=1>|. Acesso em: 02 dez. 2019.
- [20] ELECTRONIC WINGS. IR Communication using Arduino UNO. Disponível em: |<https://www.electronicwings.com/arduino/ir-communication-using-arduino-uno>|. Acesso em: 02 dez. 2019.
- [21] BOEN, Luisa. Estudo e construção de um sistema de comunicação por luz visível (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION).