

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

LUÍSA BOEN

ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ
VISÍVEL (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION)

Santo André

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

LUÍSA BOEN

ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ
VISÍVEL (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION)

Texto apresentado à Universidade Federal do ABC como requisito para a conclusão do curso de graduação em Engenharia de Informação, junto ao Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas.

Orientador: Prof. Doutor Murilo Bellezoni Loiola

Santo André

2017

Resumo

Um sistema de comunicação por luz visível, do inglês *Visible Light Communications* (VLC), é um sistema de comunicação digital óptico que utiliza a luz visível para a transmissão de informação. Sua implementação é discutida na literatura pelos diversos benefícios que oferece como, por exemplo: baixo custo de implementação, podendo ser aplicada em infraestruturas de iluminação já implementadas e baixa complexidade dos componentes, como LEDs e sensores de luminosidade; dentre outros. A ideia se torna relevante no contexto atual, com a alta demanda por conectividade e altas taxas de transmissão. Apesar de aparentar a simplicidade para implementação, o sistema VLC tem características mínimas a serem respeitadas para o seu funcionamento perfeito e, como qualquer sistema digital de comunicação, se beneficia de técnicas que melhoram a robustez do sistema. Nesse contexto, o trabalho visa o entendimento das características de um sistema VLC e propõe a construção de um sistema baseado na placa de prototipagem Arduino, com recepção por fotodiodo, capaz de transmitir com sucesso a uma taxa de 100 bits/segundo.

Palavras-chave: Comunicação por luz visível, sistema de comunicação digital, comunicação óptica, Arduino

Abstract

A visible light communication system (VLC) is an optical digital communication system that uses visible light for information transmission. Its implementation is discussed in the literature because of the many benefits it offers, such as: low implementation costs, by using lighting infrastructures already implemented; low component complexity; such as LEDs and light sensors; among others. The idea becomes relevant in the current context, with the increasing demand for connectivity and high transmission rates. Although its implementation seems simple, the VLC system has minimal characteristics to be respected for its perfect operation, and like any digital communication system, it benefits from techniques that improve the robustness of the system. In this context, the work aims at understanding the characteristics of a VLC system, and proposes the construction of a system based on the Arduino prototype board, with photodiode reception, capable of successfully transmitting bits at rates of 100bits/second.

Keywords : Visible Light Communications, digital communications, optical communications, Arduino

SUMÁRIO

RESUMO.....	II
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Sistemas de comunicação por luz visível	6
2.2 Transmissores ópticos.....	7
2.3 Receptores ópticos.....	11
3. PROVAS DO CONCEITO	12
3.1 Sagotra e Aggarwal (2013): Visible Light Communication.....	12
3.2 Komine e Nakagawa(2010): Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights	13
4. IMPLEMENTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO.....	14
4.1 Primeiro Protótipo.....	14
4.1.1 Definições Teóricas	14
4.1.2 Componentes e Montagem	16
4.1.2.1 Transmissor.....	17
4.1.2.2 Receptor - Fotoresistor	18
4.1.3 Informação Transmitida.....	19
4.1.4 Resultados Obtidos com o Fotoresistor.....	20
4.2 Segundo Protótipo.....	21
4.2.1 Componentes e montagem do sistema.....	21
4.2.1.1 Receptor – Fotodiodo	22
4.2.2 Etapas de construção do sistema VLC baseado no fotodiodo	23
4.2.2.1 Codificação de linha	23
4.2.2.2 Sincronização.....	25
4.2.2.3 Codificação de canal	4
4.2.3 Resultados obtidos com o sistema baseado em fotodiodo.....	7

4.3 Teste de Desempenho do Sistema por Luz Visível.....	11
4.3.1 Taxa de erro de símbolo (SER) pela distância entre TX e RX	11
4.3.1 Influência da cor no sistema VLC.....	18
5. CONCLUSÃO.....	21
REFERÊNCIAS.....	23
ANEXO I: Algoritmo transmissor	25
ANEXO II: Algoritmo receptor	29

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação por luz visível, do inglês *Visible Light Communications*–VLC, se apresentam como uma alternativa atrativa para transmissão de dados sem fio por apresentar vantagens sobre os métodos tradicionais. A capacidade de rápida transição entre os estados ligado e desligado dá aos diodos emissores de luz (LED, do inglês *Light Emitting Diode*) a dupla funcionalidade de iluminar e transmitir dados ao mesmo tempo, permitindo o desenvolvimento de sistemas baseados em iluminação. Os sistemas VLC possuem como atrativos baixo custo dos componentes e de operação, simplicidade da infraestrutura requerida e largura de banda não regulamentada (SAGOTRA; AGGARWAL, 2013)

Neste contexto, este trabalho visa o estudo e implementação de um sistema de comunicação por luz visível.

O presente trabalho foi dividido em quatro partes: a primeira parte consiste na apresentação da revisão teórica sobre os aspectos do sistema VLC, detalhando seu funcionamento, vantagens e componentes; a segunda parte apresenta provas do conceito encontradas na literatura; a terceira parte discute a metodologia utilizada para a construção de um sistema de comunicação por luz visível e também apresenta os resultados de testes de desempenho do sistema; por fim, a quarta parte conclui o trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, o crescente aumento da troca de dados e informações na nossa sociedade a partir de computadores pessoais, *laptops* ou *smartphones* conectados a redes sem fio ou mesmo a redes celulares, vem aumentando a necessidade de altas taxas de transmissão de dados e, conseqüentemente, cresce também a necessidade de se encontrar novas tecnologias para o envio de informação.

Ao encontro dessa necessidade, as comunicações ópticas vêm se mostrando como alternativa viável e eficiente após as taxas de transmissão obtidas por sistemas de comunicação baseados micro-ondas atingirem o limite que a tecnologia podia oferecer. O esforço em desenvolver sistemas de comunicação utilizando a luz como portadora de informação resultou em uma revolução nas áreas de telecomunicações e microeletrônica, sendo considerada responsável pela “era da informação”. (AGRAWAL, 2002; AGRAWAL, 2005)

2.1 Sistemas de comunicação por luz visível

Sistemas de comunicações ópticas são aplicados principalmente em sistemas com altas taxas de transmissão. Este é o caso dos sistemas VLC, no qual diodos emissores de luz são usados como fonte de transmissão em redes *ad-hoc*, ou acesso à internet, integrando a tecnologia de comunicações ópticas em sistemas de iluminação por LEDs, podendo atingir taxas de até 100Mbps, quando usado o padrão IEEE 802.15.7 (PATHAK et al., 2015). Sistemas VLC também surgem como uma forma de transmissão de dados onde sistemas de rádio frequência não conseguem atingir, seja por limitações físicas ou por limitações de banda. (SAGOTRA; AGGARWAL, 2013; SCHMID et al., 2012)

A iluminação por LEDs apresenta um baixo consumo de energia para sua operação, sendo comumente preferidas em comparação as lâmpadas fluorescentes, e também apresentam uma vida útil superior as mesmas. Aproveitando a dupla funcionalidade dos LEDs, baseadas na facilidade do LED em cintilar em frequências superiores ao limite de percepção humana, e a possibilidade de modular o sinal de luz, abre-se a oportunidade de desenvolver um sistema de baixo custo e altamente aceitável, dada a necessidade de iluminação frequente no dia a dia. (SAGOTRA; AGGARWAL, 2013; KOMINE; NAKAGAWA, 2010). Utilizando esquemas de

multiplexação, os LEDs podem, além de transmitir, atuar como receptores, criando um canal bidirecional de comunicação com pouca complexidade. (SCHMID et al., 2012)

Os sistemas VLC também são atrativos por outros diversos fatos como, por exemplo: segurança, pois a informação transmitida é visível, sendo simples determinar quem recebe aquela informação, uma vez que a mesma está confinada a espaços fechados ou pré-definidos, tornando o sistema seguro de forma simples; e a aplicação segura em ambientes hostis. Por exemplo, os sistemas VLC são seguros por não interferirem em equipamentos e áreas sensíveis a explosões (como minas, plantas petrolíferas, etc.). (SAGOTRA; AGGARWAL, 2013)

A partir deste cenário, este capítulo tem o objetivo de desmembrar e explicar as partes fundamentais de um sistema de comunicação por luz visível, começando pela geração de luz no LED e a conversão de informação, de pulsos elétricos para pulsos de luz, partindo para a transmissão do sinal de luz, sua codificação e modulação e, por fim, a detecção e recepção dos pulsos de luz. Após a explanação do sistema, serão apresentados alguns trabalhos que mostraram a eficiência dos sistemas VLC.

2.2 Transmissores ópticos

Independente da forma de informação a ser transmitida pelo sistema de comunicação, o transmissor tem a função de preparar a mensagem a ser transmitida pelo canal. De tal forma que a informação transmitida possua uma formatação resiliente aos efeitos degradantes do canal, e permita a total recuperação da mensagem. (ZIEMER, 2009)

No caso de sistemas de comunicação digitais, as mensagens são compostas por sequências discretas de símbolos pertencentes a um alfabeto pré-definido. O alfabeto depende do tipo de modulação utilizada na transmissão, e, por fim, o transmissor envia a mensagem através do meio de comunicação adequado, isto é, o canal. (GALLAGER, 2008; WESOLOWSKI, 2009).

No caso dos sistemas VLC, a fonte do sinal é proveniente de fontes geradoras de luz. Transmissores ópticos têm como funções converter o sinal elétrico em óptico e enviar a luz pelo espaço livre, sendo este o canal de comunicação. (AGRAWAL, 2002)

Os transmissores ópticos necessitam ter sensibilidade em relação aos níveis de pulso elétricos e ao nível de decisão, resposta rápida às mudanças de níveis do sinal elétrico, e serem altamente confiáveis não introduzindo ruídos ao sinal. (AGRAWAL, 2002)

O processo de liberação de luz nos sistemas VLC é dado pela emissão de fótons pelos diodos emissores de luz, que são as fontes de luz no sistema. O processo de emissão dos LEDs é classificado como espontâneo, no qual os fótons são emitidos em direções aleatórias e sem relação de fase entre eles, o que também é chamado de emissão não-coerente. (AGRAWAL, 2002)

O LED é um dispositivo semicondutor, que possui como característica condutividade elétrica dependente de bandas de valência não preenchidas por completo. Dessa forma, a Figura 1 apresenta dois processos inerentes a LEDs. A Fig. 1 (a) representa o processo de absorção de fóton por um átomo e a Fig. 1(b), o processo de emissão espontânea de luz. (AGRAWAL, 2002)

Nesta figura, os níveis de energia são representados por E_1 e E_2 , onde E_1 representa o estado fundamental de um átomo presente no material semicondutor, chamado de banda de valência, e E_2 o estado excitado, a banda de condução. A diferença de energia entre esses dois níveis é dada por $E_g = E_2 - E_1$.

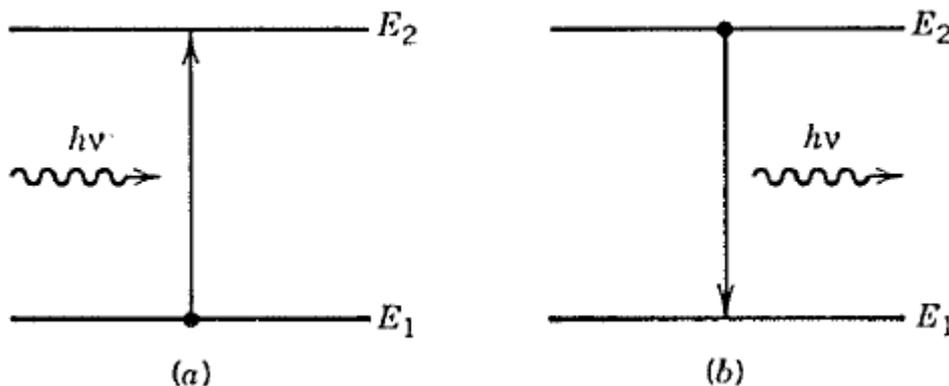


Figura 1: Processos de absorção (a) e emissão espontânea (b) entre dois níveis de energia em um átomo de material semicondutor. Adaptado de Agrawal (2002)

O processo de absorção de um fóton ocorre se a energia do fóton incidente de frequência ν for igual ou maior que E_g . A energia de um fóton de frequência ν é dada pela equação 1, onde h é a constante de Planck e ν é dada pela razão entre a velocidade da luz, c , e o comprimento de onda.

$$E_{fóton} = hv \quad (1)$$

Nesse caso, a energia do fóton excita um elétron na banda de valência, levando-o para a banda de condução.

O processo de emissão espontânea ocorre quando, eventualmente, um elétron livre na camada de condução retorna à banda de valência e, durante o decaimento, o elétron libera energia emitindo luz, a energia da onda eletromagnética da luz corresponde a diferença entre os níveis de energia. (AGRAWAL, 2002)

Sendo o diodo emissor de luz um semicondutor, este possui uma estrutura fundamental chamada de junção P-N. As junções p-n são constituídas pelo contato de semicondutores do tipo-p e do tipo-n. Semicondutores de tipo-p são definidos como semicondutores dopados com impurezas com falta de elétrons, i.e., com excesso de lacunas; já os de tipo-n são definidos pelo o excesso de elétrons.

Quando polarizada diretamente, a junção P-N permite a difusão de elétrons dada a recombinação de elétrons e lacunas. Quando em equilíbrio, a junção P-N possui um campo elétrico, dada as impurezas dopantes polarizadas, suficiente para não permitir a difusão de elétrons. Logo, não permitindo o fluxo de corrente elétrica pelo material.

A recombinação acontece quando a junção p-n é polarizada diretamente com a aplicação de uma tensão, reduzindo o campo elétrico na junção. Durante o processo de recombinação é necessário liberar a energia do elétron, podendo ocorrer por liberação térmica ou, nos casos de semicondutores emissores de luz, em forma de fótons, sendo possível a emissão de luz. (AGRAWAL, 2002)

Portanto, a junção P-N permite que LEDs emitam luz dada a aplicação de uma tensão entre seus terminais, convertendo sinais elétricos em sinais luminosos.

É desejável que o sinal seja modulado antes de enviá-lo pelo canal. Dessa forma, o sinal elétrico é modificado antes de ser convertido em pulsos de luz.

De acordo com Ziemer (2009), o processo de modulação é utilizado para produzir um sinal que possa ser facilmente acomodado pelo canal. A modulação traduz o sinal de entrada para uma forma que seja transmitido eficientemente.

Para os sistemas VLC, Pathak et al. (2015) apresenta quatro formatos de modulação possíveis de serem aplicados: OOK, do inglês *On-Off Keying*, no qual o sinal modulado apresenta dois estados, ligado e desligado; modulação por largura

de pulso; OFDM, do inglês *orthogonal frequency division multiplexing* e modulação por chaveamento de cores, CSK, do inglês *Color Shift Keying*.

Como os sistemas de comunicação por luz visível, além de transmitir informação, também precisam oferecer iluminação, se torna necessário que dois outros requisitos sejam satisfeitos para a modulação: a questão da diminuição de intensidade para algumas atividades e a cintilação de luz. Por exemplo, a grande maioria das atividades humanas pode ser realizada com uma iluminância entre 30 a 100 lux em ambientes públicos, mas já para aplicações em escritórios ou residências, é requerida uma iluminância na faixa de 300 a 1000 lux. (KOMINE; NAKAGAWA, 2010; PATHAK et al.,2015)

Além disso, a percepção humana de luminosidade não é linear, torna-se necessário que a modulação empregada também seja resistente a diminuições de intensidade da iluminação disponível. No caso da cintilação, a modulação usada não pode resultar em percepção humana de flutuação de luminosidade, uma vez que a flutuação intensa pode ser psicologicamente danosa aos humanos (PATHAK et al.,2015).

A norma IEEE 802.15.7 aconselha que a cintilação deva estar acima de 200 Hz para que não haja percepção aos olhos humanos. Por isso, a modulação precisa garantir uma melhor distribuição dos níveis de iluminação, o que também pode ser atingida com a codificação de linha do sinal. (SCHMID et al., 2012; PATHAK et al.,2015)

A codificação de linha consiste em modificar o pulso de luz para minimizar os efeitos degradantes do canal, como adição de um ruído e perda de potência do sinal , permitindo que perfil do sinal não seja destruído. Códigos, como Manchester, fazem a distribuição de níveis por eliminar longas sequências de níveis altos ou baixos, minimizando a percepção de cintilação. (GALLAGER, 2008; WESOLOWSKI, 2009; PATHAK et al.,2015)

Quando a codificação de linha é insuficiente para prevenir a degradação do sinal, pode-se adicionar uma codificação de canal. A codificação de canal consiste em adicionar redundância ao sinal digital para corrigir os erros causados pelo ruído do canal. (GALLAGER, 2008; ZIEMER & TRANTER, 2009).

2.3 Receptores ópticos

A conversão de pulsos de luz em sinais elétricos é feita pelos receptores ópticos pelo processo de fotodeteção. O processo de fotodeteção ocorre quando a energia de um fóton incidente é suficiente para a recombinação de um elétron e uma lacuna.

Quando um semicondutor se apresenta sob a influência de um campo elétrico, dada a aplicação de uma tensão, a recombinação de um elétron e uma lacuna produz uma foto corrente diretamente proporcional a potência óptica incidente. (AGRAWAL, 2002)

Os receptores ópticos mais comuns são os baseados em junções p-n reversamente polarizadas. Quando reversamente polarizadas, as junções p-n apresentam uma região de depleção, onde não há cargas livres (elétrons e lacunas) e apresenta um forte campo elétrico que não permite a difusão de corrente. (AGRAWAL, 2002). Na incidência de um fóton, há a recombinação de um par elétron-lacuna, mas dado o alto campo elétrico formado na junção, as cargas geradas na região de depleção são rapidamente separadas e enviadas para lados opostos, gerando a movimentação de cargas. A corrente resultante desse processo é oriunda da potência óptica incidente. Portanto, junções p-n reversamente polarizadas atuam como fotodetectores e receptores ópticos.

3. PROVAS DO CONCEITO

A utilização de sistemas de iluminação como sistemas capazes de transmitir informação não é uma ideia inédita. Diversos autores, alguns já referenciados neste trabalho, apresentaram propostas de sistemas baseados no VLC e analisaram sua eficácia perante as necessidades atuais. Este capítulo visa apresentar alguns dos trabalhos nessa área.

3.1 Sagotra e Aggarwal (2013): Visible Light Communication

Sagotra e Aggarwal (2013) propõem um sistema baseado em VLC utilizando multiplexação por divisão de comprimento de onda, ou multiplexação por frequência, onde utilizam a característica de cada LED apenas para gerar corrente quando absorvem luz proveniente de uma frequência determinada. Utilizando LEDs de cores distintas, se torna possível possuir diversos canais independentes no sistema VLC.

No trabalho supracitado, são utilizados três LEDs: um vermelho, um amarelo e um verde. A implementação física foi realizada transmitindo a informação entre dois laptops com LEDs simples e de baixa potência de irradiação e o sistema foi testado para dois tipos de sinal, um sonoro e outro visual.

O sistema foi avaliado apenas pelo sucesso ou não da recepção da informação transmitida. Para curtas distâncias, cerca de 50cm, foi possível receber e reproduzir em tempo real o sinal sonoro, mostrando que o sistema, mesmo utilizando componentes simples e de baixo custo, é capaz de transmitir informação ao mesmo tempo que ilumina o ambiente.

As dificuldades encontradas por Sagotra e Aggarwal (2013) na implementação dos sistemas VLC foram baseadas principalmente nas limitações físicas dos componentes, tais como a baixa capacidade de irradiar luz dos LEDs simples, o que limita a distância de operação entre o transmissor e receptor, restringindo a aplicação do sistema para locais pequenos; a pequena oferta de sistemas de iluminação capazes de suportar um sistema VLC dado que LEDs de alta potência não são comumente utilizados na iluminação pública, necessitando modificações na infraestrutura; e a incapacidade do LED em transmitir e receber informação ao mesmo tempo.

3.2 Komine e Nakagawa (2010): Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights

Komine e Nakagawa (2010) abordam o sistema VLC sobre uma perspectiva de integração do sistema com layouts mais realistas de iluminação. Essa análise é feita considerando a utilização de diversas fontes de luz em um mesmo ambiente e como a distribuição física das fontes de luz pode contribuir para o desempenho do VLC.

Para tal, os autores levam em consideração como os diferentes caminhos que o sinal de luz pode percorrer no espaço livre e a reflexão do feixe luminoso influenciam na interferência intersimbólica que o sinal recebido apresenta.

Considerando a distribuição da iluminação, dada as dimensões do LED e o campo de visada do feixe de luz, foi possível obter a distribuição da potência do sinal pela sala. As medidas foram realizadas cobrindo um espaço de 5m por 5m, onde o receptor permanecia a uma distância 0.85m do chão, e o transmissor permanecia fixo no teto a 3m de distância do chão.

Quando os autores consideram a interferência intersimbólica, o sistema apresentou uma queda de 3dB na potência média recebida, mas apesar da grande degradação do sinal ainda foi capaz de transmitir com taxa de 100Mb/s. Por fim, Komine e Nagã a (2010) mostram que para aumentar a capacidade de transmissão do sistema é necessário diminuir o grau da linha de visada da fonte de luz, diminuindo a quantidade de luz capaz de ser refletida pelo ambiente.

Os artigos expostos mostram a capacidade dos sistemas VLC em implementar um sistema de comunicação com altas taxas e boa confiabilidade, confirmando a importância de estudos na área.

4. IMPLEMENTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

Nesta seção serão abordados os conceitos definidos para o desenvolvimento do sistema de comunicação por luz visível, os componentes necessários para sua construção e suas características. Além disso, serão discutidos os esquemáticos inicial e final do sistema de comunicação por luz visível.

4.1 Primeiro Protótipo

O primeiro protótipo do sistema VLC foi construído baseado em um fotoresistor como receptor do sinal luminoso. Dada as limitações físicas do componente, o protótipo inicial apresentou dificuldades na sincronização do sinal, com interferência intersimbólica e alta cintilação. O detalhamento do sistema e seus pontos de falha são descritos a seguir.

4.2 Definições Teóricas

Como abordado na revisão bibliográfica, existem várias formas de aplicar modulação em sistema VLC. Dada a facilidade de implementação da modulação OOK, esta foi a escolhida para o desenvolvimento do primeiro protótipo.

A modulação OOK (do inglês *On-Off Keying*, chaveamento ligado-desligado) é a modulação por amplitude mais utilizada em sistemas de comunicação por luz, dada sua simples associação com a existência, ou não, de luz. A modulação por chaveamento de amplitude, conhecida popularmente como ASK (do inglês, *Amplitude Shift Keying*) é aquela na qual a portadora carrega a informação no chaveamento da amplitude do sinal. (AGRAWAL, 2002)

As modulações NRZ (do inglês *Nonreturn-to-Zero*, sem retorno a zero) e a RZ (do inglês *Return-to-Zero*, retorno a zero) são as modulações do tipo OOK mais utilizadas, isso porque ambas são simples de implementação podendo ser geradas diretamente da fonte luminosa.

Em comparação, a OOK-NRZ apresenta metade da largura de banda ocupada pela modulação OOK-RZ pelo simples fato de apresentar menos transições entre os níveis alto e baixo, sendo uma escolha mais vantajosa em sistemas com

escassez de banda. Entretanto, OOK-NRZ necessita de um controle mais rigoroso da largura de pulso para permitir uma recuperação precisa da mensagem.

Apesar da vantagem em banda da OOK-NRZ, a modulação OOK-RZ se tornou mais interessante na aplicação de sistemas de comunicação ópticos mais complexos e de maior capacidade, permitindo a minimizar os efeitos não lineares presentes em fibras ópticas. (AGRAWAL, 2002)

No caso do protótipo inicial, empregou-se a modulação OOK -NRZ para a definição dos bits 0 e 1. A Figura 2 mostra a diferença entre as modulações com retorno a zero (OOK-RZ) e sem retorno a zero, através de um fluxo de bits e sua representação em relação ao tempo.

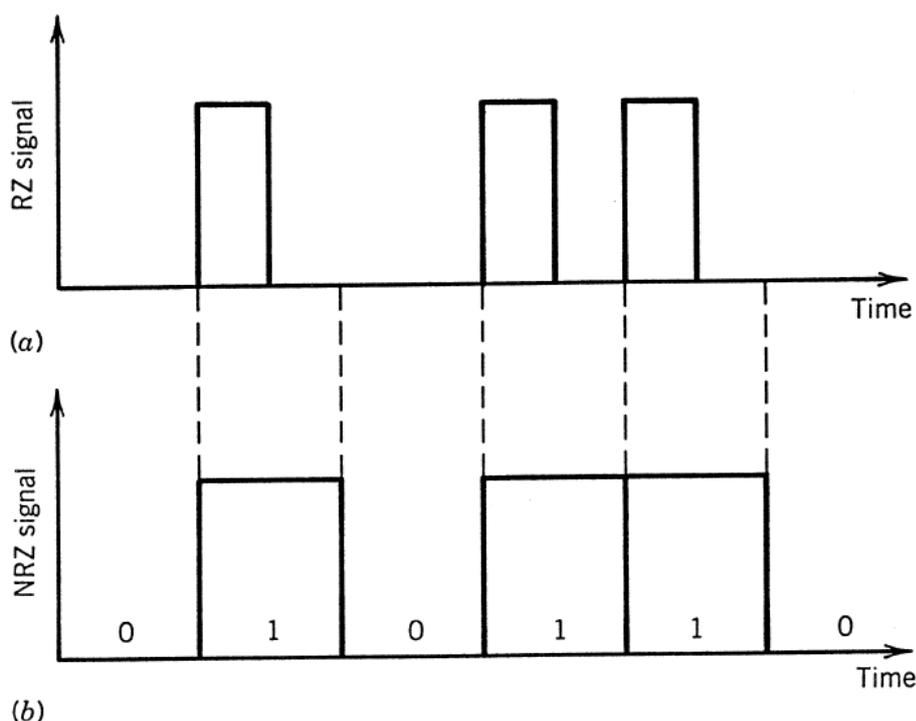


Figura 2: Fluxo de bits 010110 usando modulação (a) OOK-RZ e (b) OOK-NRZ. Fonte: AGRAWAL, 2002, pág. 14

Além da definição da modulação empregada, outro conceito que se faz necessário definir é a taxa de bits e a taxa de amostragem na recepção do sinal.

Nesta questão, preocupou-se primeiramente em garantir que era possível transmitir e receber algum dado através da modulação da luz, deixando de lado a questão da percepção de cintilação do LED. Logo, não foi intuito inicial garantir que, aos olhos humanos, o LED permanecesse sempre ligado.

Desta forma, o período de duração de cada bit foi definida como 10ms, sendo possível observar a troca de estados do LED, entre ligado e desligado, conforme o fluxo de bits.

Considerando que o sistema VLC é digital e o sinal é limitado no tempo, não há como definir uma frequência mínima de amostragem, mas é necessário que o período de amostras escolhido seja capaz de capturar as mudanças do nível do sinal. Dado que o sinal pode mudar de estado a cada bit novo, o período entre amostras deve ser no mínimo igual ao tempo de bit. Entretanto, amostrar o sinal no período de bit deixa o sistema suscetível a possíveis erros caso a sincronização seja perdida, ocasionando perda de símbolos durante a transmissão.

Para garantir que tais erros de sincronização não afetem a recepção, o período de aquisição no receptor do sistema VLC proposto foi definido de modo que fossem capturadas duas amostras por bit.

Considerando o cenário proposto, onde o tempo de bit é igual a 10ms, o período entre amostras deverá ser, no máximo, 5ms, conforme equacionamento abaixo:

$$T_{TX} = 10ms \quad \Rightarrow \quad T_{amost} \leq \frac{10}{2}$$

$$\therefore T_{amost} \leq 5ms \quad e \quad f_{amost} \geq 200Hz$$

4.2.1 Componentes e Montagem

Como forma de iniciar a discussão acerca do sistema VLC, foi construído um sistema de comunicação simples constituído por duas plataformas Arduino UNO atuando como os blocos de transmissão e recepção do sistema.

A plataforma Arduino UNO é uma placa de prototipagem relativamente barata, que permite a rápida construção de sistemas. Consistindo em um microcontrolador baseado no processador ATmega328, a placa possui pinos para comunicação digital e entradas analógicas, além de possuir um cristal de quartzo de 16MHz. Para realizar a programação da placa, é utilizada a linguagem de programação própria do Arduino, baseada na linguagem C (ARDUINO, 2016).

Para todas as placas Arduino, a instrução de leitura de uma entrada analógica leva aproximadamente 100 microssegundos, resultando em uma taxa máxima de amostragem de 10kHz. A amostragem do protótipo inicial foi configurada para 100Hz, valor bem abaixo da frequência máxima do dispositivo (ARDUINO, 2016).

Além das placas Arduino Uno, foram utilizados alguns componentes simples para montagem do sistema VLC, conforme a lista abaixo:

- 2 resistores, 100 Ω e 330 Ω
- 1 LDR (*light dependent resistor*)
- 1 LED branco de alta intensidade
- Fios para conexão.

4.2.1.1 Transmissor

A montagem do bloco do transmissor utilizou um LED para emissão de luz, utilizando a própria plataforma Arduino para realizar o processamento e geração do sinal modulado. A Figura 3 mostra a montagem do bloco transmissor.

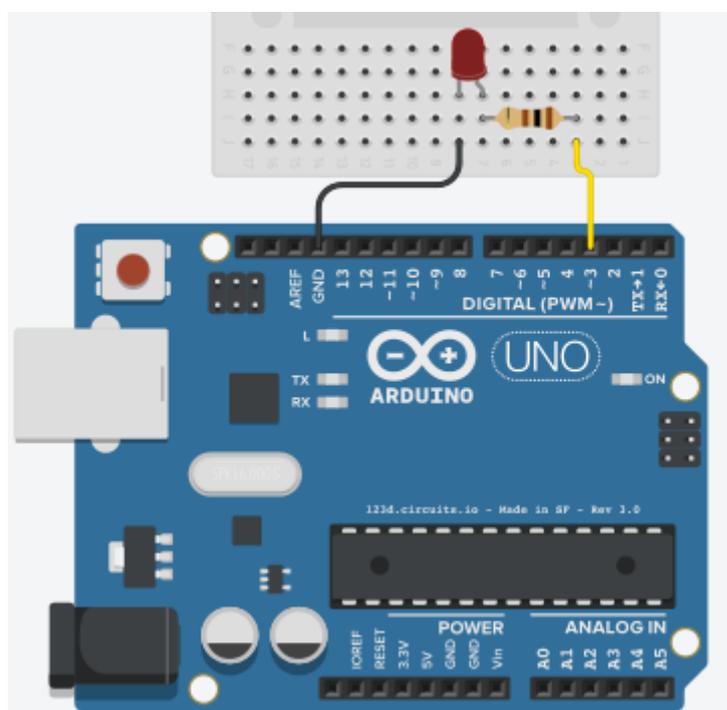


Figura 3: Montagem do bloco transmissor. Gerado através do site <https://circuits.io>.

As GPIO, do inglês *General-Purpose Input/Output*, são portas digitais do Arduino UNO que oferecem uma tensão de 5 volts, caso estejam configuradas no

nível alto, representado como o bit 1. A Figura 3 mostra o LED de alta intensidade conectado a uma saída digital, GPIO 3. Conforme o sinal binário, 1 ou 0, é enviado à saída digital, o LED é acionado. O resistor presente entre a GPIO 3 e o LED é responsável pela proteção do LED contra altas tensões.

Dado que o LED de alta intensidade atua com uma tensão entre 2,4V e 4V e a máxima corrente direta em cima de cada LED é de 25mA, pode-se calcular a resistência mínima necessária para não danificar o LED. Logo, para que o LED atue de forma segura, o resistor deve ter uma resistência mínima de 40Ω. Desta forma, foi escolhido o resistor de 100Ω, pois permite a atuação segura do LED e oferece boa intensidade luminosa.

Como é possível observar, o bloco transmissor é extremamente simples, o que mostra a vantagem do sistema VLC pela facilidade e baixo custo da montagem. A complexidade dos sistemas VLC está nos algoritmos utilizados para preparação dos bits, como a modulação e codificação do sinal.

4.2.1.2 Receptor - Fotoresistor

Para a recepção dos sinais luminosos, decidiu-se investigar a capacidade de um LDR para detecção de luz. Um LDR (do inglês *Light Dependent Resistor*) é um dispositivo resistivo dependente da luz, isto é, sua resistência se modifica conforme a intensidade de luz incidente no dispositivo, sendo possível medir a diferença de tensão sob ele.

Desta forma, para construir o bloco receptor do sinal foi utilizada uma placa Arduino UNO, um LDR e um resistor. A Figura 4 a seguir mostra a montagem do bloco receptor.

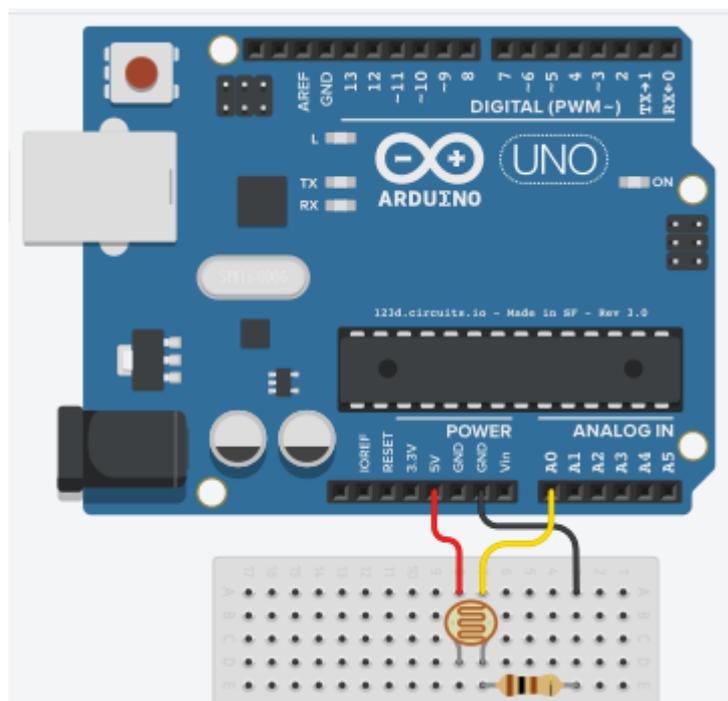


Figura 4: Montagem do bloco receptor. Gerado através do site <https://circuits.io>.

Observando o bloco receptor, vemos que o LDR é alimentado por uma tensão de 5V, oferecida pelo pino de alimentação da placa Arduino e há um divisor de tensão dado pelo resistor de 300Ω conectado entre o LDR e GND (pino terra). Desta forma, o pino de leitura analógica A0 consegue a leitura da tensão em cima do LDR, podendo captar as variações decorrentes da incidência de luz.

Igualmente ao transmissor, o bloco receptor do sistema VLC é extremamente simples, com baixa complexidade de construção e utiliza-se de componentes de baixo custo.

4.2.2 Informação Transmitida

A informação utilizada para iniciar o estudo do sistema VLC foi de uma sequência de caracteres. A escolha do formato da informação a ser transmitida não influencia no entendimento e desenvolvimento do sistema, uma vez que toda e qualquer informação precisa ser digitalizada, sendo convertida em uma sequência de bits antes de ser enviada através do sistema de comunicação digital.

Como a programação da placa Arduino, baseada em C/C++, possui bibliotecas e funções pré-estabelecidas para a conversão de caracteres para binário,

utilizando a tabela ASCII (padrão americano de codificação de caracteres utilizada na troca de informações e amplamente utilizada na indústria), o processo de preparação dos dados para envio apresentou baixa complexidade e se mostrou ideal para iniciar a discussão sobre o sistema VLC.

No protótipo inicial, cada caractere de uma mensagem foi traduzido para um número binário de 8 bits. Na programação da placa Arduino, a mensagem era armazenada em um vetor do tipo char e uma estrutura de laço era responsável em acessar cada posição, ou seja, cada caractere, converter o valor em inteiro pela tradução da tabela ASCII e transmitir os níveis de luz de acordo com as posições binárias do valor convertido.

A mensagem teste utilizado no desenvolvimento do protótipo será “*absque sudore et labore nullum opus perfectum est*”, que contém 49 caracteres.

4.1.4 Resultados Obtidos com o Fotorresistor

O sistema VLC baseado em um fotorresistor atingiu a taxa de transmissão de 100 bps o que, considerando a literatura analisada na primeira parte desse trabalho, pode ser considerada uma taxa extremamente baixa para um sistema VLC.

Além disso, a amostragem do sinal e a conversão dos bits em caractere se mostraram deficitárias e altamente dependentes da sincronização inicial, do instante de amostragem e do sinal enviado. Essa dificuldade foi percebida pela perda de símbolos durante a transmissão da mensagem e a necessidade de diversas tentativas para capturar o início de cada transmissão, impossibilitando uma aplicação com taxas de transmissão suficientemente alta para combater a cintilação.

Analisando os componentes do sistema, vê-se que o principal obstáculo para atingir taxas de transmissão mais altas é a resposta do sensor. O LDR é um sensor de resposta lenta e que gera sinais de amplitude muito pequena, tornando-o não ideal para a detecção de variações tão rápidas de luz. Portanto, para o sucesso do trabalho e construção do sistema VLC se torna necessário a substituição do componente por um sensor com resposta mais rápida, como por exemplo, um fotodiodo.

4.2 Segundo Protótipo

Dada as dificuldades físicas encontradas utilizando um fotoresistor, o segundo protótipo utilizou um fotodiodo para a recepção do sinal. As características do fotodiodo permitiram a recuperação completa do sinal, além de permitir a implementação de codificação de linha, codificação de canal e sincronização por mensagem e por símbolo.

Durante a construção do sistema baseado no fotodiodo, percebeu-se que apesar da boa recepção do sinal binário, o sistema ainda era muito sensível a pequenas perturbações, como interferência da intensidade da luz ambiente e sincronização dependente da inicialização da rotina em instantes específicos. Em consequência, foram implementadas formas de manter o sistema mais robusto e que serão detalhadas mais à frente.

Abaixo, na Figura 5, está representado o diagrama de blocos para o sistema de comunicação digital por luz visível resultante.

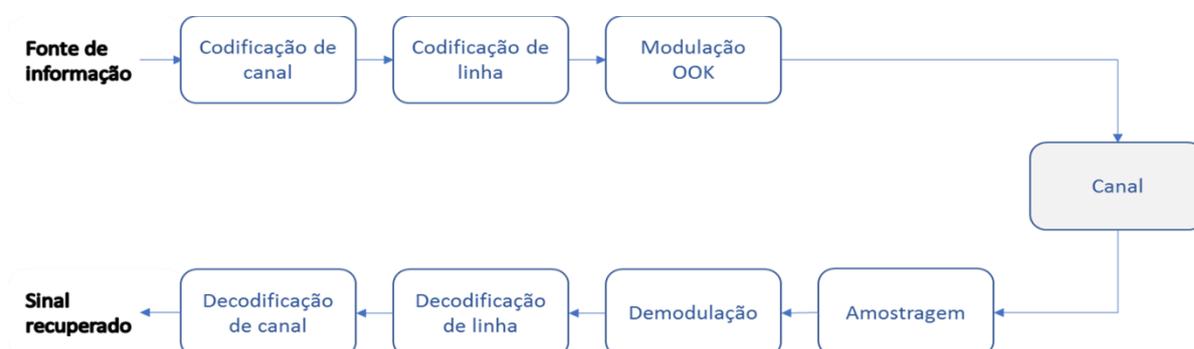


Figura 5: Sistema de comunicação digital por luz visível

4.2.1 Componentes e montagem do sistema

A construção do sistema VLC baseado em fotodiodo continuou a utilizar a plataforma Arduino para transmissão e recepção do sinal. Contudo, para manter o sistema independente e capaz de processar toda informação sozinho, foi necessário mudar o receptor para uma placa Arduino Mega2580, pois a placa Arduino UNO apresenta pouca memória para processar a quantidade de informação trafegada pelo sistema VLC construído.

O transmissor se manteve o mesmo definido na seção 4.1.2.1 deste trabalho, utilizando um LED branco e um resistor de 100Ω junto a placa Arduino UNO.

Dada a modificação de plataforma e de sensor, o receptor baseado em fotodiodo será descrito a seguir.

4.2.1.1 Receptor – Fotodiodo

A placa Arduino Mega 2560, como a placa Arduino UNO, é uma placa de prototipagem, possuindo um processador ATmega2560 e 8 kB de memória SRAM (do inglês *Static Random Access Memory*), 6 kB a mais em relação a placa UNO, permitindo que todo o processamento da amostragem, decisão, correção de erros e conversão seja feita no próprio Arduino Mega.

A Figura 6 mostra a montagem do receptor utilizando o fotodiodo e a placa Mega2560.

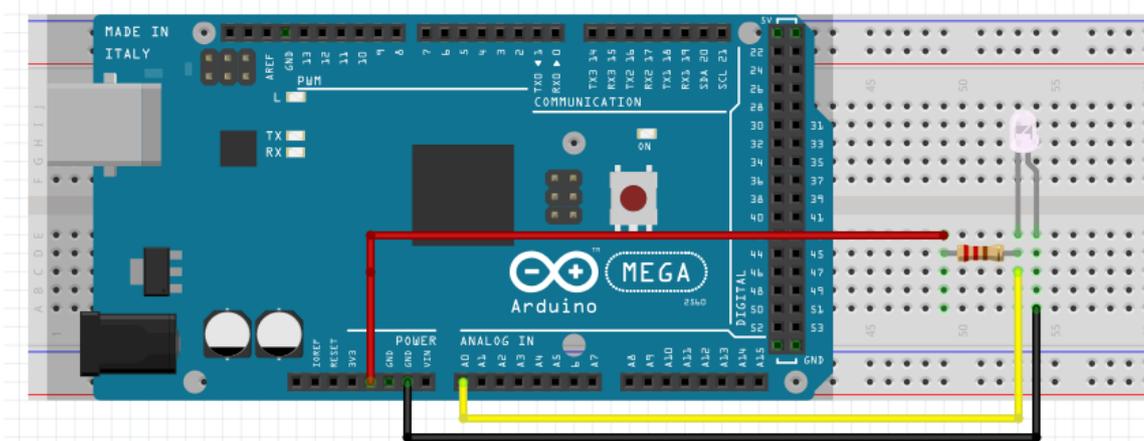


Figura 6: Montagem do bloco receptor baseado na placa Arduino Mega2580. Gerado através do software Fritzing.

Na figura acima é possível ver o sinal de 5V, fio vermelho, conectado ao resistor de 330Ω ; o resistor é conectado ao pino negativo do fotodiodo, catodo, e o terra, fio preto, é conectado ao terminal positivo, anodo. O fio amarelo faz a aquisição da tensão sob o fotodiodo e é conectado a GPIO analógica da placa Mega2580.

O fotodiodo é uma junção p-n, como discutido anteriormente. Portanto, ao sofrer a incidência de um feixe luminoso, o fotodiodo irá gerar uma corrente em direção ao catodo, caso o fotodiodo esteja polarizado. O sinal de 5V faz a

polarização do fotodiodo e, de acordo com a intensidade de luz, é possível medir a queda de tensão no fotodiodo decorrente da corrente reversa que flui entre a junção p-n do fotodiodo.

A GPIO analógica da placa Mega2560 já possui um conversor analógico-digital para a entrada, com 1024 níveis entre 0 e 5V por definição. Por consequência, a placa Mega2560 recebe a tensão e já a converte em um nível numérico a ser utilizado pela programação da rotina.

4.2.2 Etapas de construção do sistema VLC baseado no fotodiodo

Após o entendimento da montagem do sistema VLC baseado no fotodiodo, serão abordadas as etapas que levaram ao desenvolvimento das rotinas, a fim de dar maior robustez ao sinal e visando o aumento da taxa de transmissão.

A ordem de apresentação dos temas corresponde à ordem de implementação de cada técnica nas rotinas de transmissão e recepção.

4.2.2.1 Codificação de linha

Após a introdução do fotodiodo como receptor do sinal luminoso e mantendo as configurações da montagem anterior para o sistema baseado no fotoresistor, a recuperação dos bits enviados se fez de forma mais robusta, com menor perda de bits, e maior facilidade de recepção mesmo sem sincronização ao utilizar taxas de transmissão mais baixas. Entretanto, o sinal de saída do LED ainda apresentava cintilação perceptível aos olhos. Logo, a primeira etapa de melhoria em relação ao primeiro protótipo foi a utilização de codificação de linha para combater a cintilação.

Anttalainen, T. (2003) afirma que a codificação de linha tem como objetivo a adequação da forma do espectro de um sinal digital para o meio de transmissão do mesmo.

Na literatura, autores como Schmid et al.(2012) e Pathak et al. (2015) apontam o código de linha Manchester como forma de combater a cintilação, uma vez que este é capaz de eliminar o nível DC do sinal binário pois todo o bit enviado possui um transição entre os níveis alto e baixo e, assim, combate sequências

longas de bits zeros que possam afetar na percepção de cintilação. Além dos benefícios quanto ao combate da cintilação, a codificação de linha auxilia a sincronização entre transmissor e receptor, isto porque o sinal codificado traz informação relevante a sincronização, como por exemplo: tempo de *clock*, e sinalização de começo ou fim de símbolo.

Considerando a literatura, foi implementado um código Manchester na etapa de codificação de linha, no qual o bit 1 é codificado pela transição do nível “alto” para o nível “baixo” e o bit 0 é codificado pela transição entre do nível “baixo” para o nível “alto”. A Figura 7 mostra o sinal resultante da codificação em comparação a codificação NRZ empregada anteriormente.

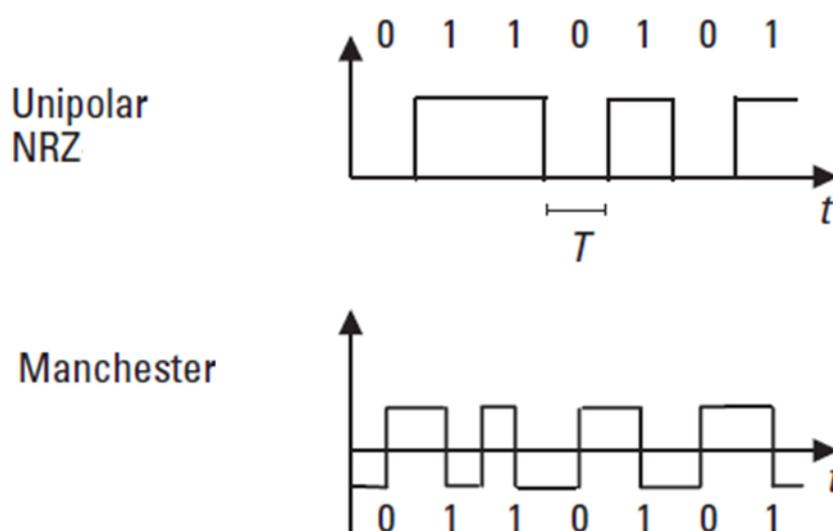


Figura 7: Comparação entre o sinal NRZ e sinal Manchester. Fonte: Adaptado de Anttalainen, T. (2003), pág. 154

Ao inserir a codificação Manchester, foi possível observar uma diminuição na cintilação do LED transmissor, dado que a quantidade de piscadas do LED durante a transmissão foi inferior ao observado ao utilizar OOK-NRZ. Entretanto, apesar de menor, a cintilação ainda era perceptível aos olhos.

A intuição inicial seria que com o aumento da taxa de bits a cintilação ficaria menos evidente. Ao aumentar a taxa de transmissão para aproximadamente 1kHz, que corresponde a um tempo de bit por volta de 1000 μ s, o LED eliminou a cintilação perceptível aos olhos. Entretanto, o receptor não conseguiu decodificar o sinal, com perda de bits durante a transmissão do símbolo e dificuldade de sincronização da mensagem.

Como a percepção de cintilação também pode ser afetada pela diferença entre os níveis altos e baixos, de acordo com o Stolfi (2004), foram realizados testes utilizando dois níveis de luminosidade: alto, definido como luminosidade máxima oferecida pelo LED, e baixo, definido como luminosidade média oferecida pelo LED.

Os testes utilizaram as GPIO analógicas da placa Arduino UNO para modular o sinal que oferecem uma modulação de largura de pulso (do inglês *Pulse Width Modulation, PWM*) capaz de controlar a luminosidade oferecida pelo LED. Ao configurar a saída com modulação PWM adicional com duração de pulso 50% do total da duração do símbolo do PWM, a luminosidade do LED pode ser mantida na metade da luminosidade total, pois o sinal oferecido para alimentação do LED é a média do sinal PWM, logo 50% da luminosidade total. (ARDUINO, 2016)

Os testes não evidenciaram uma melhora significativa na cintilação e a pouca diferença entre níveis alto e baixo dificultou a recepção do sinal, resultando no não prosseguimento com essa abordagem.

Como os problemas de cintilação e sincronização não foram totalmente resolvidos com a codificação de linha, fez-se necessário procurar por outras formas de deixar o sistema robusto.

4.2.2.2 Sincronização

Com o aumento da taxa de transmissão, notou-se que há alta dependência de sincronização entre transmissor e receptor para obter sucesso de recepção.

A rotina de aquisição nesse estágio apresentava problemas na sincronização da mensagem e havia perda de bits durante a transmissão. Para combater esses problemas, foi implementado um pulso, de largura igual ao tempo de um símbolo, no início da mensagem para indicar ao receptor que a mensagem iria iniciar.

Ao adicionar um pulso constante no nível alto no início da mensagem, o receptor não aciona a aquisição da mensagem até que o sensor receba um pulso constante. Além disso, o mesmo pulso foi enviado no fim da mensagem para sinalizar o fim do bloco de mensagem. Cada pulso de sincronização inicial e final é composto por 12 bits sem codificação de linha Manchester, mantendo o sinal sempre em nível alto

O tamanho da mensagem é dependente da quantidade de caracteres presentes no texto original a ser transmitido. Como cada caractere é codificado em um total de 16 bits, considerando a codificação de canal e sincronismo de símbolo, que serão apresentados posteriormente, o tamanho total de mensagem será constituído pela quantidade de bits das sincronizações e pela quantidade de bits necessários para codificar todo o texto a ser transmitido. Portanto, o tamanho de cada mensagem será $24+(16*n)$, onde n é a quantidade total de caracteres presentes no texto.

No caso da mensagem teste que possui 49 caracteres, o tamanho total em bits é 808 bits.

A Figura 8 mostra a divisão do bloco de pulsos transmitido.



Figura 8: Bloco transmitido, com sequência de início e fim de bloco de mensagem.

Como o sinal analógico resultante da estimulação luminosa no fotodiodo foi convertido pelo Arduino em leituras discretas entre os valores 0 e 1023, foi necessário definir um limiar na rotina do programa para distinguir o pulso alto do baixo. Primeiramente, o limiar foi definido como a leitura em descanso do fotodiodo acrescido de um valor arbitrário igual a 250, de tal forma que a rotina de recepção não fosse inicializada por variações pequenas do ambiente. Entretanto, essa abordagem não foi suficiente para garantir a identificação de nível alto após a inicialização da rotina de recepção, isso porque dependendo do valor da inicialização do sensor em descanso era possível que alguma variação brusca de luminosidade ambiente pudesse ultrapassar o valor de limiar, mas ainda estar abaixo da luminosidade provida pelo LED.

Dessa forma, adicionou-se uma realimentação na definição de limiar. Após a recepção da sequência inicial de sincronização de mensagem, o valor do limiar é definido como o valor médio entre o valor alto obtido pelo fotodiodo durante o bit inicial e a luz de fundo. Dessa forma, o limiar fica referenciado aos valores de máximo e mínimo recebidos pelo sensor.

Após a inserção de sequências para a sincronização dos dados, o receptor apenas acionava a coleta de dados após o pulso de sincronização do transmissor. Aumentos pontuais de luminosidade sob o receptor não ativavam mais a captura de dados.

Apesar do ótimo resultado no início da mensagem, ainda havia perda de sincronismo durante a transmissão da mensagem. Primeiramente, houve a tentativa de resolver a questão adicionando codificação de canal, que será abordada na próxima seção, pois supôs-se que a perda de sincronização era resultante de erros na decisão de bits. Entretanto, ainda era possível observar perda de bits durante a transmissão dos símbolos, isso porque a perda de bits ocasionava o deslocamento do sinal. Assim, caso um bit fosse perdido durante a aquisição de um símbolo, todos os outros símbolos posteriores eram afetados, fazendo com que toda a mensagem fosse deslocada para $t+1$, perdendo a sincronia com a rotina de decodificação do código Manchester.

Para resolver tal questão, fez-se necessário implementar uma sincronização por caractere presente na mensagem. Desta forma, caso um bit fosse perdido, apenas o caractere em questão seria prejudicado.

Para cada caractere foi adicionado um bit 1 para indicação da inicialização do bloco de bits referente ao caractere, e foi adicionado um pulso alto de período igual a 3 períodos de bit como tempo de guarda para assegurar a decisão caso houvesse o deslocamento, totalizando um aumento de 4 bits por caractere enviado.

A Figura 9 mostra o detalhamento do frame de transmissão de cada caractere dentro da mensagem.

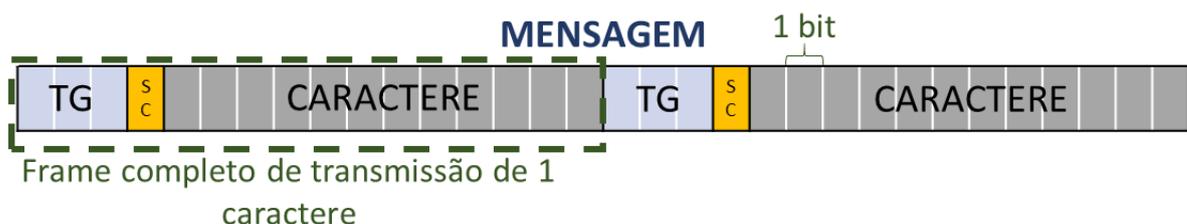


Figure 9: Detalhamento dos frames de transmissão de cada caractere, constituídos pelo tempo de guarda (TG), sincronização de caractere (SC) e bloco de bits codificado de cada caractere.

Dessa forma, cada símbolo foi transmitido utilizando 16 bits – a codificação de canal foi implementada antes da sincronização por caractere –, considerando que o tempo de bit é 10ms, cada bloco leva 160ms para ser transmitido. A Figura 9 mostra o resultado capturado pelo osciloscópio dos tempos de guarda e bit de sincronização, bem como o tempo de transmissão de cada bloco.

Na figura 10, o sinal visto no canal 1 do osciloscópio, de cor amarela, é a saída do transmissor, ou seja, é o sinal enviado pelo LED; o canal 2, de cor verde, mostra a resposta do fotodiodo à variação luminosa oferecida pelo LED; o canal 3, de cor azul, mostra o sinal gerado para acompanhar o começo e o fim da aquisição de símbolos. Os pontos destacados pelas caixas vermelhas mostram o tempo de guarda entre os símbolos.

Para captura do sinal 3, foi configurado no Arduino que no momento da inicialização da captura do frame de caractere um LED de apoio conectado ao circuito principal apagaria e acenderia, dessa forma foi possível observar os vales gerados no sinal. É possível observar pelo sinal 3, azul, que a rotina de captura está deslocada em relação ao início do frame, pois o vale gerado pela inicialização da captura se apresenta durante o período de guarda da sincronização de caractere. A caixa preta na Figura 10 destaca esse dado.

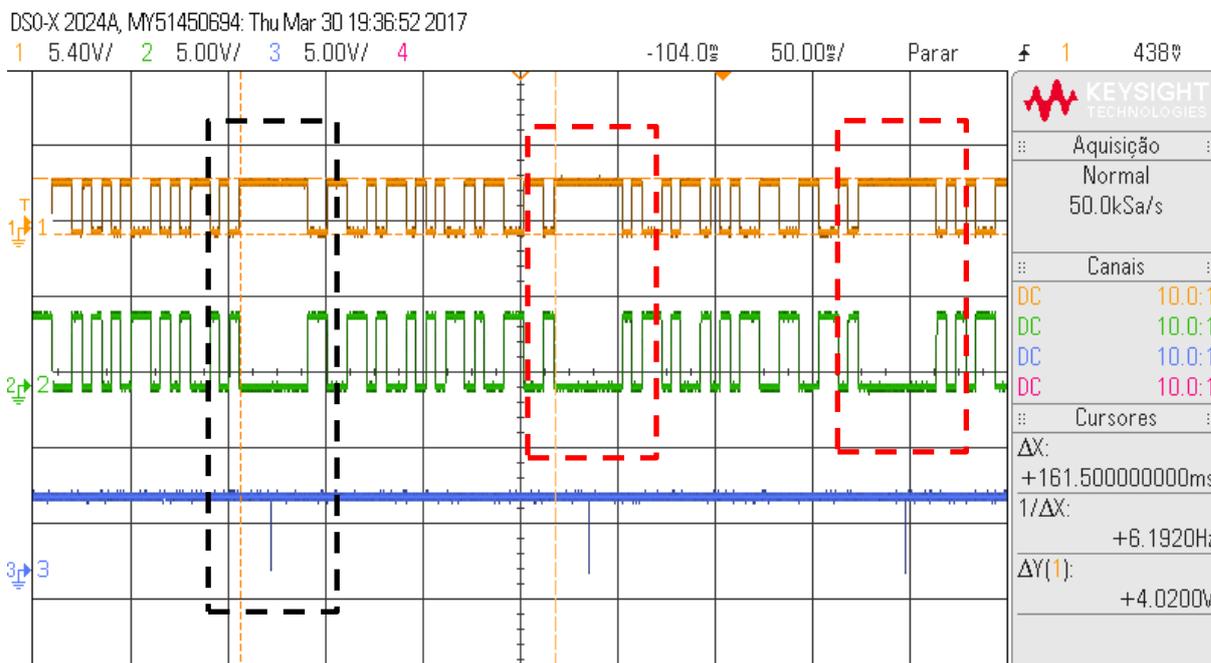


Figura 10: Aquisição visualizada pelo osciloscópio. As seções destacadas em vermelho apresentam tempo de guarda e bit de sincronização entre símbolos, enquanto que o deslocamento da rotina de aquisição de símbolos é indicado pela caixa preta.

Com a adição da sincronização por caractere houve uma melhora significativa da recuperação do sinal, além de mitigar a perda de sincronismo no meio da transmissão da mensagem.

Apesar da melhoria da recepção, a Figura 10 esclareceu o motivo da perda de bits. Dada a quantidade de instruções durante as rotinas na placa Arduino, um Δt era inserido em cada rotina de aquisição de símbolo. Com as diversas aquisições, esse valor era acumulado fazendo com o que o início da aquisição do frame de caractere fosse deslocado, e acarretava na perda do início real do frame de transmissão. Na figura 9, o vale resultante da inicialização da aquisição do caractere, observado no sinal 3, já se apresenta na metade da duração do tempo de guarda. Com o erro acumulado e propagado durante as diversas aquisições, o início da aquisição se aproxima cada vez mais do início real dos bits de codificação do caractere, ultrapassando o tempo de guarda entre caracteres.

Como o tempo de guarda apenas garantia a recepção para uma mensagem de tamanho igual ou menor que a mensagem de teste utilizada no protótipo, preferiu-se a correção do tempo de aquisição para tornar o receptor mais robusto.

Com o auxílio do osciloscópio, foram medidos os tempos de transmissão de um símbolo e o tempo de aquisição do mesmo pelo receptor. A diferença encontrada entre estes tempos foi dividida pela quantidade de amostras realizadas para um símbolo e o valor resultante foi subtraído do período entre aquisições das amostras.

$$\Delta t_{\text{aquisição}} = t_{\text{aquisição}} - t_{\text{transmissão}}$$

A Figura 11 mostra a medição do valor do sinal proveniente do transmissor, enquanto a Figura 12 mostra a medição do valor proveniente da rotina de aquisição do receptor.

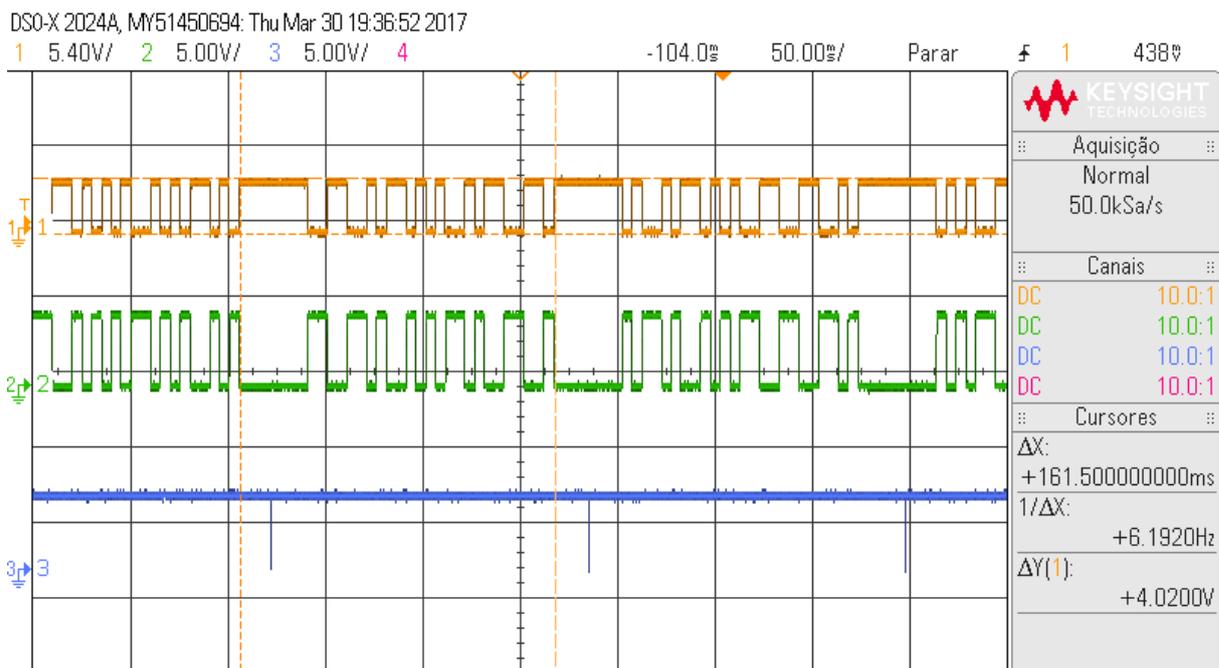


Figura 11: medição tempo total de transmissão de um frame de caractere, $\Delta X=161.5\text{ms}$

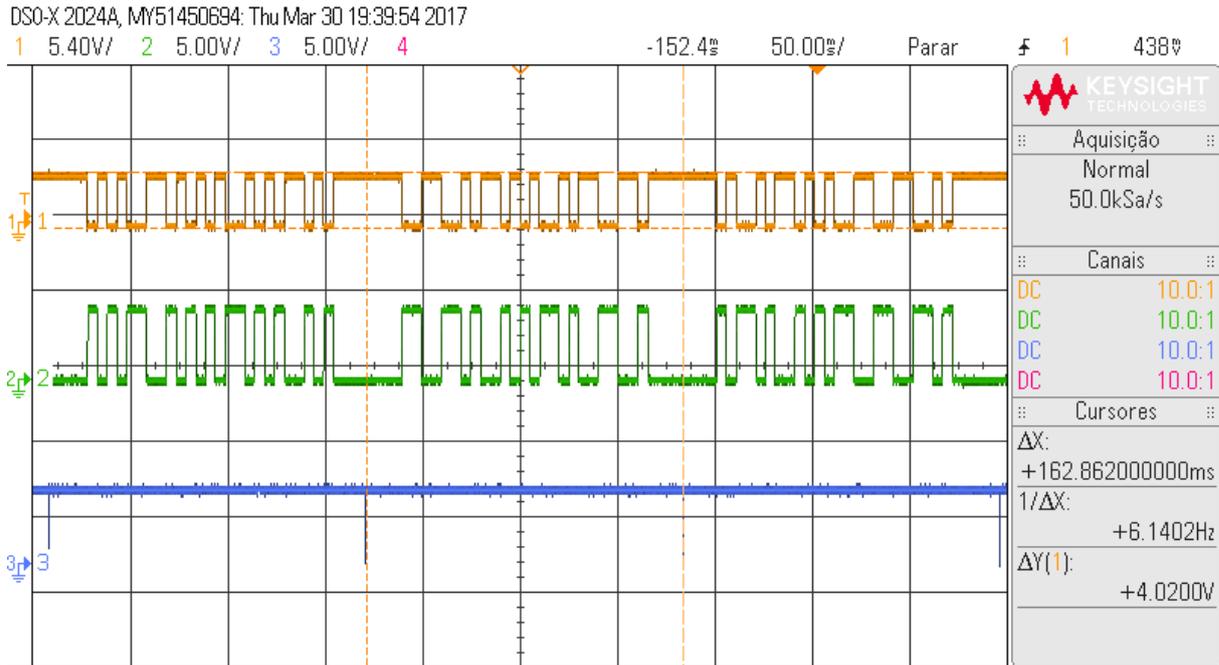


Figura 12: medição do período proveniente da rotina de aquisição do receptor para um frame de caractere, $\Delta X=162.862ms$

No caso dos períodos medidos nas figuras acima, temos que o tempo decrescido do tempo entre as aquisições foi dado por:

$$\Delta t_{aquisição} = 162,862 \text{ ms} - 161,200 \text{ ms} = 1,662 \text{ ms}$$

Dessa forma, mesmo que a mensagem transmitida possua mais caracteres que a mensagem teste, o sistema será capaz de receber o sinal sem perda de bits durante a transmissão.

Após finalizar a implementação de todas as rotinas necessários na placa Mega2560, o processo de medição e correção do período de aquisição foi repetido para garantir que a adição de novas instruções não iria influenciar no tempo de aquisição.

4.2.2.3 Codificação de canal

A adição da codificação de canal ao sistema visou aumentar a robustez do sistema frente a possíveis erros que possam ocorrer durante a transmissão do sinal pelo canal de comunicação.

Foi escolhido o código de Hamming por ser um código linear, de fácil implementação nas placas Arduino. O código de correção de Hamming é um código

linear de bloco, uma vez que a palavra resultante da codificação é proveniente de combinação linear dos símbolos da mensagem a ser codificada. (ZIEMER & TRANTER, 2009).

O código de Hamming é capaz de identificar e corrigir até um erro por bloco codificado. Isso por que o código de Hamming introduz, em posições específicas, bits de paridade, que carregam informação sobre o bloco original.

A teoria diz para que o código de Hamming seja capaz de corrigir um erro em um bloco de k bits, é necessário que quantidade de bits de paridade (m) adicionados ao bloco original de tamanho n , a relação na Equação 1 deve ser respeitada.

$$2^m \geq n + m + 1 \quad (1)$$

Dessa forma, para os 8 bits de cada caractere, são necessários, pelo menos, 4 bits de paridade, uma vez que $m=4$ produz um código capaz de corrigir um erro em uma palavra-código de tamanho k igual a 12 bits. Com essas características pode-se chamar esse código específico de Hamming (12,8), no qual representa que o bloco codificado terá tamanho de 12 bits e carregará informação relevante a 8 bits da mensagem (SONG, 2004; ZIEMER, 2009).

Considerando o bloco original com 8 bits:

$$m_1 m_2 m_3 m_4 m_5 m_6 m_7 m_8$$

E o bloco codificado em 12 bits:

$$x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} x_{11} x_{12}$$

Este código de Hamming mapeia a palavra-código de acordo com as equações abaixo (SONG, 2004)

$$\begin{aligned}
 x_3 &= m_1 \\
 x_5 &= m_2 \\
 x_6 &= m_3 \\
 x_7 &= m_4 \\
 x_9 &= m_5 \\
 x_{10} &= m_6 \\
 x_{11} &= m_7 \\
 x_{12} &= m_8
 \end{aligned}$$

Os bits de paridade nas posições 1, 2, 4 e 8 do bloco codificado podem ser calculados de acordo com as equações abaixo (SONG, 2004).

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_3 \oplus x_5 \oplus x_7 \oplus x_9 \oplus x_{11} \\
 x_2 &= x_3 \oplus x_6 \oplus x_7 \oplus x_{10} \oplus x_{11} \\
 x_4 &= x_5 \oplus x_6 \oplus x_7 \oplus x_{12} \\
 x_8 &= x_9 \oplus x_{10} \oplus x_{11} \oplus x_{12}
 \end{aligned}$$

Cada bit de paridade verifica os bits da mensagem respectivos a ele, por exemplo, o bit de paridade x_1 verifica as posições 3, 5, 7, 9, e 11.

Na recepção do sinal codificado, a mensagem recebida por ser representada como:

$$y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 y_6 y_7 y_8 y_9 y_{10} y_{11} y_{12}$$

Ao verificar os bits de paridade, o resultado dá a posição do bit com erro. A posição é dada em base binária, considerando o bit correspondente da verificação do bit de paridade y_1 como bit menos significativo e o correspondente ao bit de paridade 4 o mais significativo.

As equações para verificação dos bits de paridade são descritas abaixo, onde k é o bit resultante da verificação do bit de paridade.

$$\begin{aligned}
 k_1 &= y_1 \oplus y_3 \oplus y_5 \oplus y_7 \oplus y_9 \oplus y_{11} \\
 k_2 &= y_2 \oplus y_3 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_{10} \oplus y_{11} \\
 k_3 &= y_4 \oplus y_5 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_{12} \\
 k_4 &= y_8 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{11} \oplus y_{12}
 \end{aligned}$$

Em todos os casos mencionados acima, o símbolo \oplus significava a operação XOR, ou-exclusivo, bit-a-bit.

Caso k_i seja diferente de zero, é necessário mudar o valor do bit na posição $k_4 k_3 k_2 k_1$.

4.2.3 Resultados obtidos com o sistema baseado em fotodiodo

A substituição do fotoresistor por um sensor com resposta mais rápida, como o fotodiodo, apresentou resultados satisfatórios, no qual a transmissão e recepção podem ser realizadas de forma confiável e com pouca interferência.

A melhoria mais significativa em relação ao primeiro protótipo foi a possibilidade de empregar a codificação de linha Manchester, permitindo a diminuição da percepção da cintilação ao olho humano, mesmo com taxas de transmissão relativamente baixas.

Com a implementação das sequências de sincronização, foi possível proteger o sistema de iniciar rotinas de aquisição antes da mensagem ser enviada, garantindo a sincronização entre transmissor e receptor. Foi possível mitigar a interferência intersimbólica causada pelo deslocamento resultante da perda de bits durante a aquisição, através da adição do tempo de guarda entre símbolos e adição de bit de início para cada símbolo. Entretanto, ao encontrar a fonte da perda de sincronismo, preferiu-se também ajustar o tempo de aquisição considerando o tempo decorrido das instruções programadas na placa Arduino Mega2560.

Utilizar uma placa de prototipagem mais robusta permitiu o processamento total da recepção, como aquisição do sinal, amostragem, decodificações e correção de erros, direto na placa, permitindo um sistema independente de outras plataformas.

O sistema alcançou sucesso na transmissão e recepção com tempo de bit igual a 10ms, isto é, frequência de bit igual a 100Hz. Considerando 16 bits por símbolo, temos um tempo de símbolo igual a 160ms e frequência de símbolo igual a aproximadamente 6,25Hz.

As taxas alcançadas pelo sistema VLC foram muito baixas em relação ao observado na literatura. Dado que a instrução de leitura analógica nas plataformas Arduino leva cerca de 100 microssegundos, pensou-se que era possível diminuir o tempo entre as aquisições. Dessa forma, os únicos limitantes seriam: 1) a resposta do fotodiodo, no qual considerando as visualizações de osciloscópio ainda permitiriam taxas mais altas de transmissão e 2) a sincronização entre transmissor e receptor, que por diversas vezes foi o limitante para o sucesso do sistema apresentado neste trabalho. Entretanto, ao submeter o sistema ao limite de leitura de instrução da placa Arduino observou-se que a placa de prototipagem Arduino UNO não conseguia realizar a transição do LED entre alto e baixo na velocidade de instrução padrão.

A Figura 13 abaixo mostra a degradação do sinal quando submetido a um tempo de bit de 1 milissegundo, mostrando os pulsos em formato triangular e não quadrado, como esperando.

A Figura 14 mostra como a impossibilidade do Arduino em realizar a transição entre níveis alto e baixo gera a degradação do sinal, impossibilitando a geração correta da mensagem.

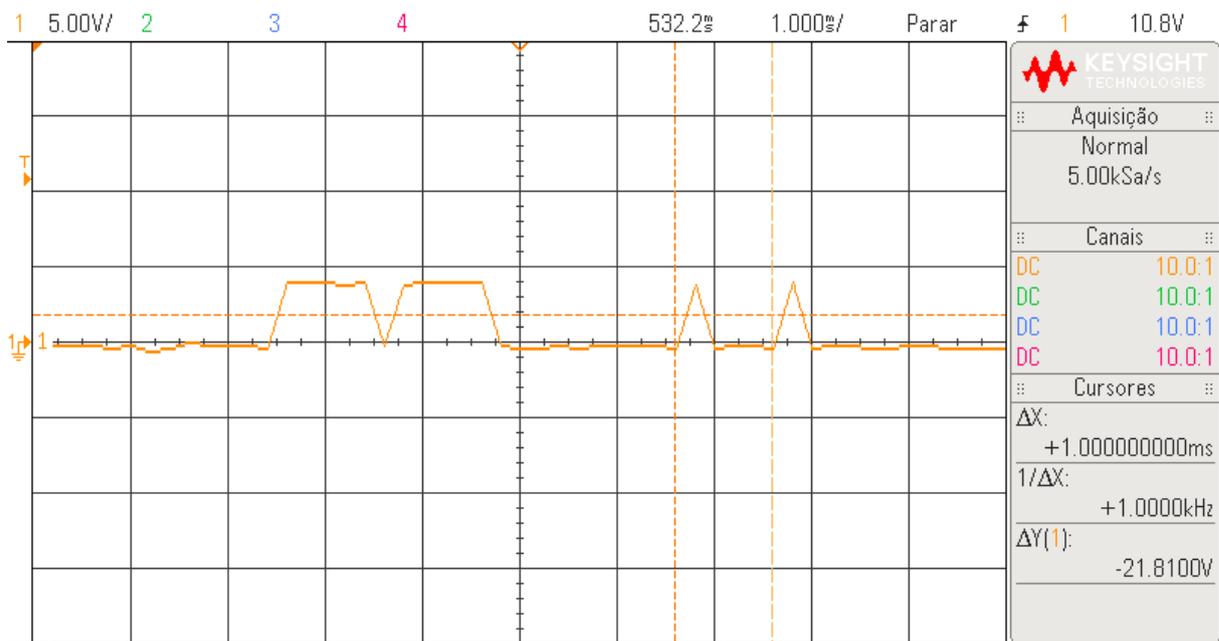


Figura 9: Sinal de saída do Arduino Mega256 degradado.

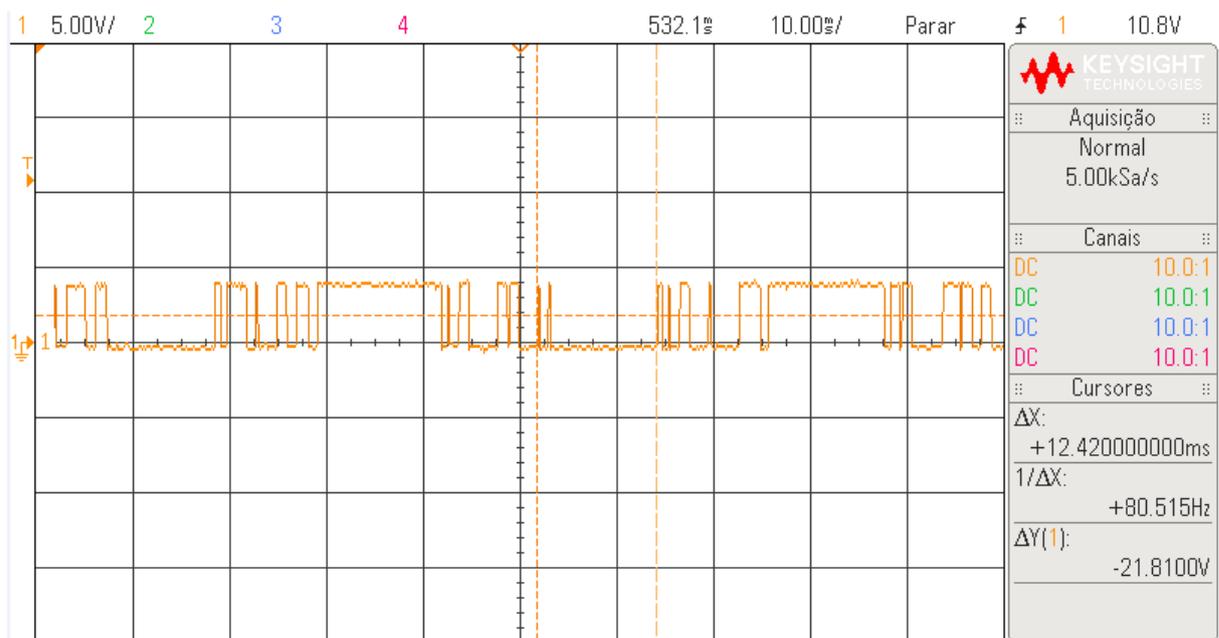


Figura 10: Símbolo gerado com tempo de bit igual 1 milissegundo.

Percebe-se, ao observar as Figuras 13 e 14, que o sinal medido na saída do Arduino foi degradado na geração, impossibilitando a diminuição do tempo de bit para combater a cintilação. É importante ressaltar que os sinais observados nas Figuras 13 e 14 foram obtidos diretamente das saídas dos pinos da placa de prototipagem. Logo, o resultado não teve influência dos outros dispositivos que pudessem apresentar alguma limitação como, por exemplo, se a medição fosse realizada no LED transmissor.

Isso leva a conclusão de que há limitações da placa UNO, demandando um estudo mais aprofundado, principalmente na questão de montagem eletrônica do sistema da placa de prototipagem para averiguar se, apenas com sua construção de fábrica, a mesma seria capaz de realizar a transmissão e recuperação do sinal em um sistema VLC no qual não houvesse cintilação perceptível. Dado que a premissa inicial deste trabalho era que a placa Arduino seria capaz de realizar tal proposta, este estudo serve como base para uma melhoria futura na implementação do sistema VLC.

Ao perceber que o sistema não conseguiria realizar a transmissão no limite proposto pela referência do dispositivo, fez-se necessário encontrar o menor tempo de bit no qual o sistema fosse capaz de realizar a transmissão completa.

Para tal, com o Arduino UNO conectado a um osciloscópio, o tempo de bit foi aumentado desde 1 milissegundo até que o sinal fosse gerado de forma correta.

Com o tempo de bit em 2 milissegundos já era possível observar a forma do sinal sem degradações muito severas, com um formato próximo a um pulso quadrado. A Figura 15 mostra o resultado obtido no osciloscópio

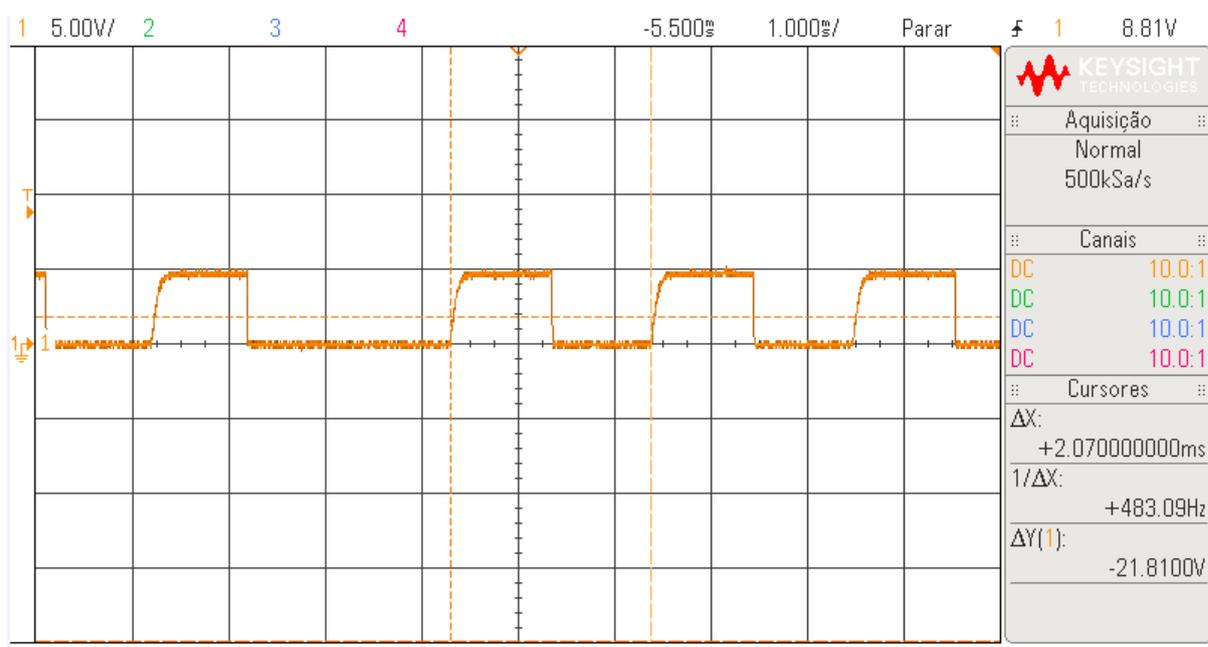


Figura 15: Sinal gerado com tempo de bit igual a 2 milissegundos

Em relação a cintilação, o sistema a 2 milissegundos conseguiu diminuir visivelmente a cintilação no sistema VLC, apesar de não a mitigar totalmente. Como o sistema VLC configurado a 10milissegundos já apresentava boa estabilidade, esta configuração foi escolhida para prosseguir com os testes de desempenho.

4.3 Teste de Desempenho do Sistema por Luz Visível

Visando analisar a capacidade de sistemas baseados em luz visível em transmitir informação de forma eficiente, foi aprofundado o estudo em questões qualitativas, como o comportamento do sistema em relação ao erro, verificando a taxa de erro de símbolo (SER) pela distância de operação e a influência da cor no sistema VLC.

As rotinas utilizadas para programação das placas de transmissão e recepção do sinal se encontram no Anexo I e Anexo II, respectivamente.

4.3.1 Taxa de erro de símbolo (SER) pela distância entre TX e RX

Para analisar o desempenho do sistema VLC baseado em fotodiodo, o sistema foi submetido a testes considerando a distância entre transmissor e receptor. Foi computada a taxa de erro de símbolo em relação à distância e a influência da distância no formato do sinal recebido.

O sistema final VLC baseado em fotodiodo está apresentado na Figura 16, onde é possível ver como a coleta de dados foi realizada.

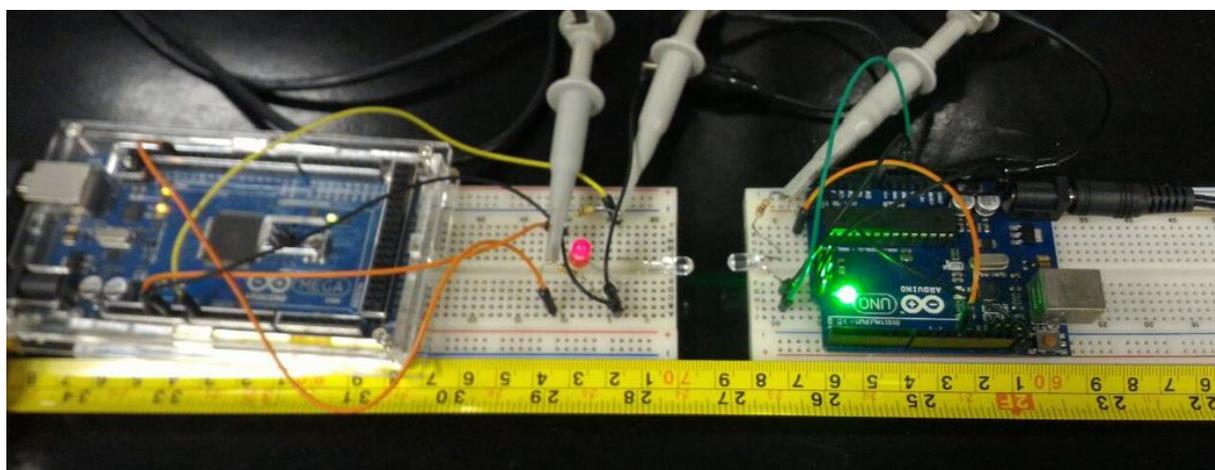


Figura 11: Sistema final VLC baseado em fotodiodo

Utilizou-se uma trena para medir as distâncias entre o LED e o fotodiodo e ambos os sinais de transmissão e recepção foram visualizados através do osciloscópio.

O experimento ocorreu da seguinte forma: para cada nova distância, a mensagem era transmitida 5 vezes para calcular o valor de SER por mensagem; era então, calculada a média entre as medidas; por fim, uma imagem do osciloscópio era capturada.

Como comentado anteriormente, a mensagem teste utilizada foi: “*absque sudore et labore nullum opus perfectum est*”. A mensagem possui 49 caracteres de tamanho, resultando na transmissão de 808 bits, incluindo aqui os bits de paridade do código corretor de erros e os bits de sincronismo.

A distância entre transmissor e receptor foi variada de 1,1 cm (mínimo entre o emissor do LED e receptor do fotodiodo) a 115 cm (referente ao segundo ponto consecutivo de medição no qual havia a perda total do sinal, impossibilitando a sincronização).

A Tabela 1 mostra os resultados adquiridos nos testes, sendo a quantidade de erro de símbolo por mensagem, a soma desse valor dividido pela quantidade de caracteres na mensagem inicial, resultando na taxa de erro de símbolo (SER). Conforme apresentado pela equação 2.

$$SER = \frac{(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5)}{5} \div tamanho(mensagem\ original) \quad (2)$$

Tabela 1: Resultado do teste de desempenho da recepção em relação à distância

Dist (cm)	Aquisição/ quantidade de erros					SER
	1	2	3	4	5	
1,1	0	1	0	0	1	1%
2	3	0	0	4	0	3%
3	1	1	0	0	1	1%
4	2	0	0	0	4	2%
8	0	4	0	0	1	2%
16	2	0	0	3	2	3%
18	1	0	4	1	0	2%
20	2	0	0	0	0	1%
22	0	0	0	0	2	1%
24	0	0	0	1	2	1%
26	2	0	2	2	0	2%
30	2	0	0	2	2	2%
35	0	0	0	0	0	0%
45	2	1	0	0	0	1%
55	0	0	3	2	0	2%
65	15	0	1	3	0	8%
75	2	0	0	1	2	2%
85	0	0	2	2	0	2%
95	2	4	3	2	0	4%
105	16	49	2	49	49	67%
115	49	49	2	49	4	62%

Com os dados apresentados na Tabela 1, podemos gerar o gráfico apresentado na Figura 17.

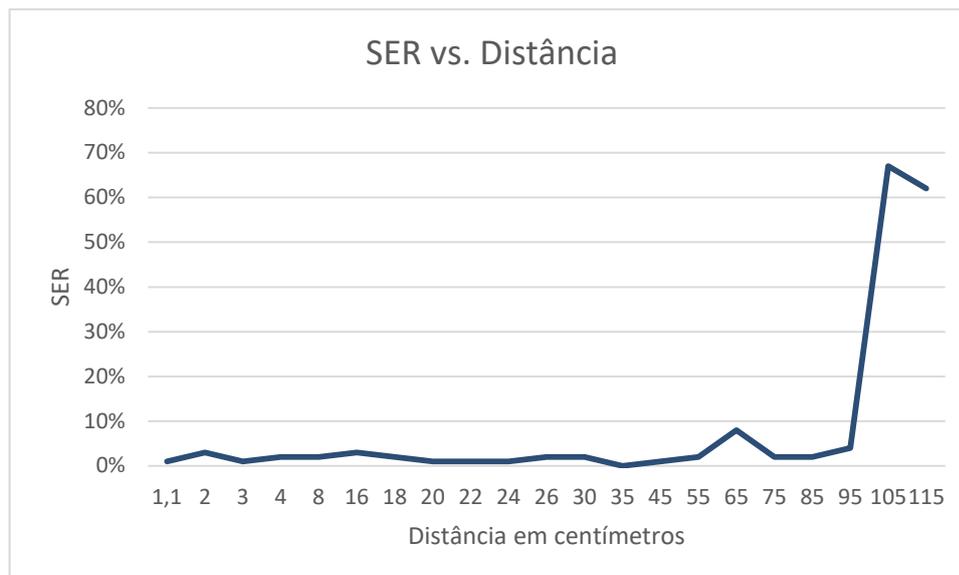


Figura 127: Curva resultante dos testes de SER versus distância entre transmissor e receptor

Ao observar a curva resultante da SER, percebe-se que o sistema é robusto e apresenta pouca perda de símbolos até chegar a uma distância limite de, aproximadamente, 1m.

Em distâncias no qual transmissor e receptor estão muito próximos, o alinhamento entre o feixe luminoso e o receptor de luz é mais difícil de obter. Apesar da distância aumentar e, conseqüentemente, diminuir a intensidade de luz recebida, ela aumenta a abertura do feixe luminoso, permitindo que a luz chegue ao fotodiodo mais facilmente.

Com uma distância próxima de 100 cm, a sincronização inicial é mais difícil de ser obtida e o sensor por diversas vezes aciona a rotina de aquisição após a primeira transmissão, pois a diferença entre máximo e mínimo do sensor é muito pequena, o que permite que o limiar seja diminuído e acabe por identificar a luz ambiente como um sinal alto.

Além da curva adquirida pelos testes, foram capturadas as formas de onda na recepção do sinal. As Figuras 18, 19, 20 e 21 apresentam as formas de onda nas distâncias 2cm, 16cm, 45cm e 105 cm, respectivamente.

O sinal no canal 1, de cor amarela, é o sinal proveniente da saída do transmissor, coletado em cima do LED. O sinal no canal 2, de cor verde, é a resposta do fotodiodo à iluminação, o sinal 2 é proporcional a luminosidade

oferecida pelo LED, e seu valor é correspondente a resposta do fotodiodo digitalizada entre os 1024 níveis da entrada GPIO do Arduino. Quando transmissor e receptor estão muito próximos, a estimulação do fotodiodo é máxima, alcançando a amplitude máxima oferecida pelo Arduino de 5V.

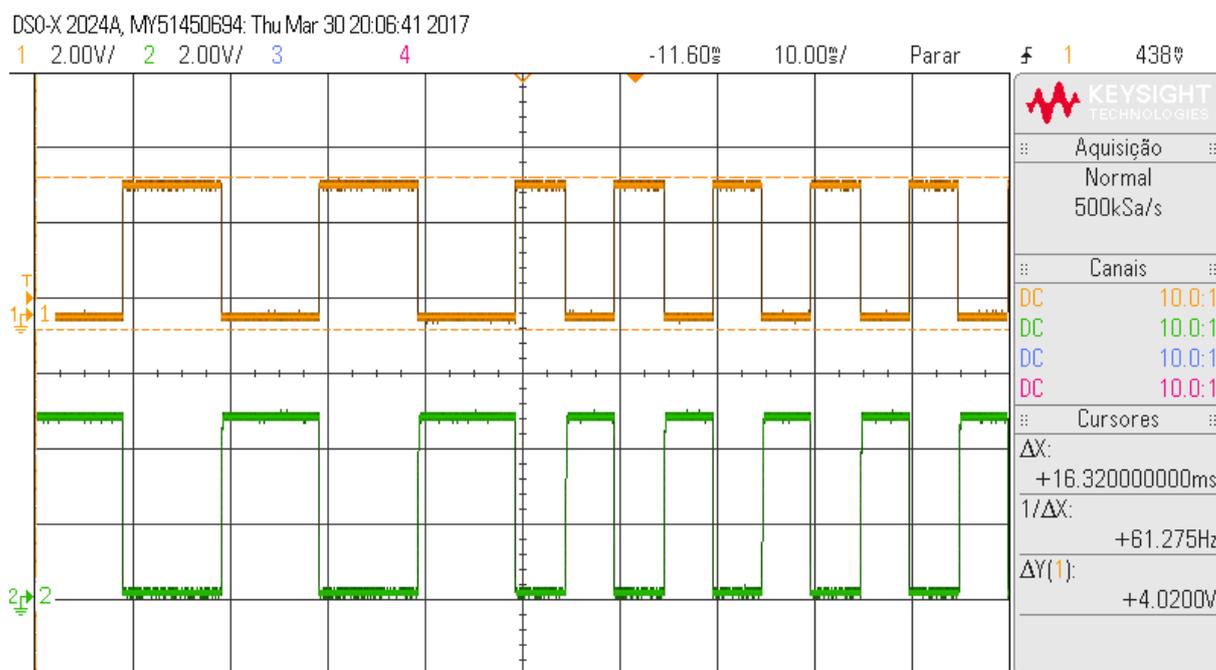


Figura 18: Resposta do fotodiodo a 2cm de distância do LED

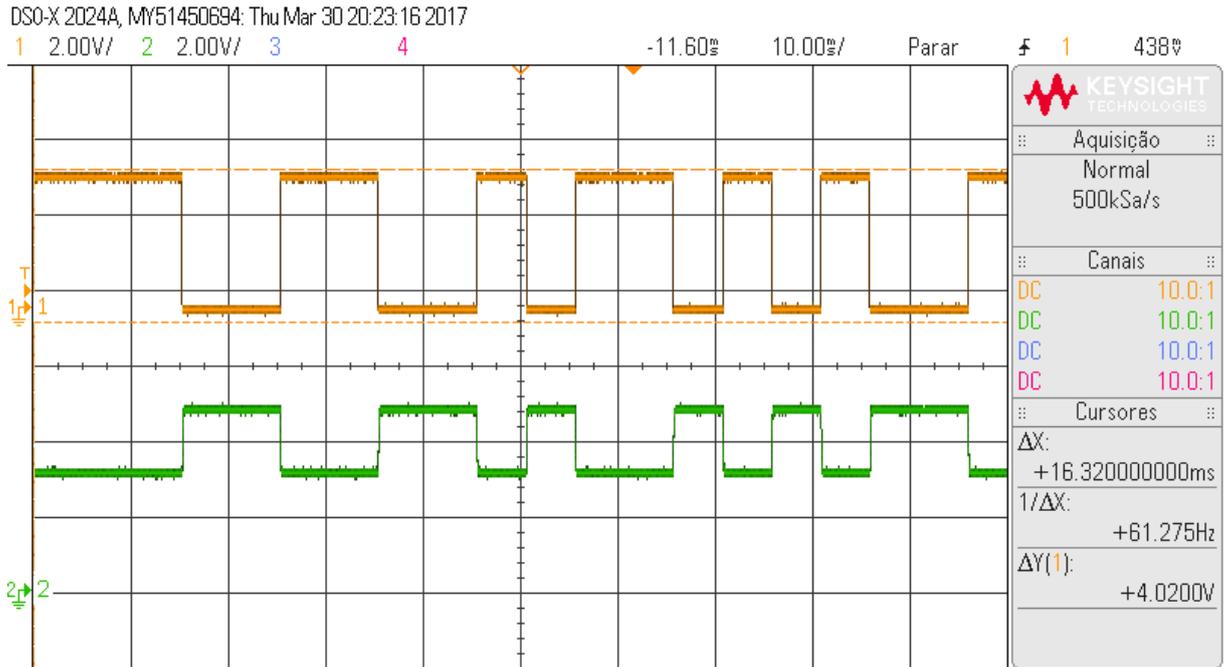


Figura 13: Resposta do fotodiodo a 16cm de distância do LED

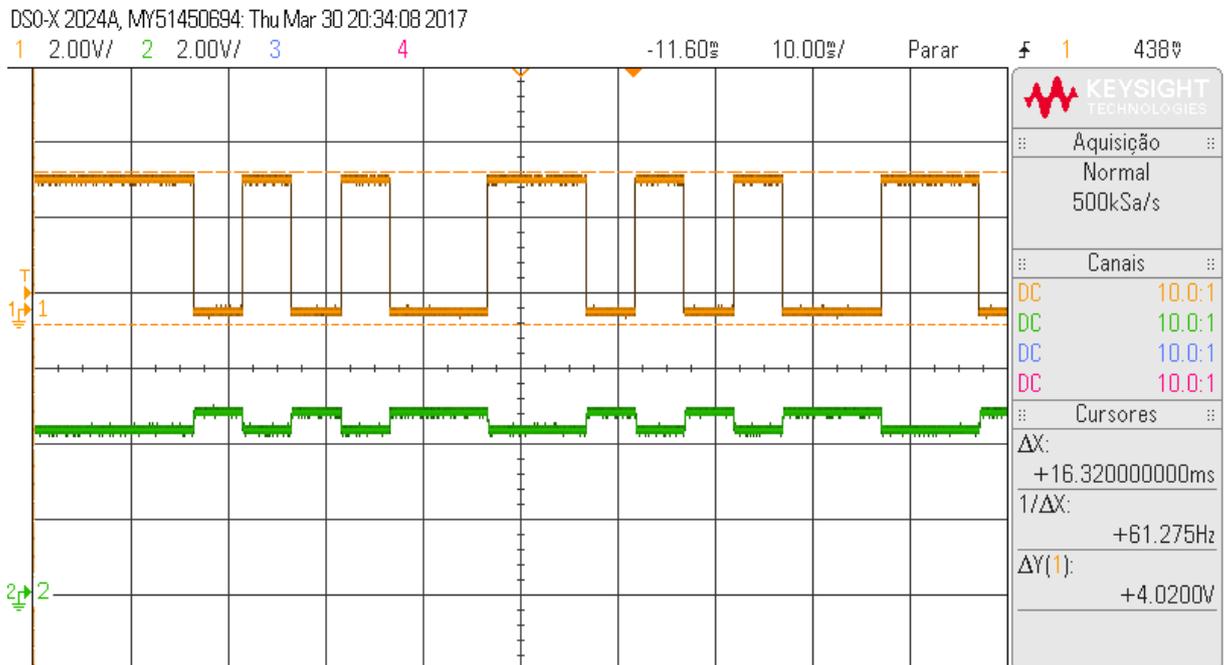


Figura 20: Resposta do fotodiodo a 45cm de distância do LED

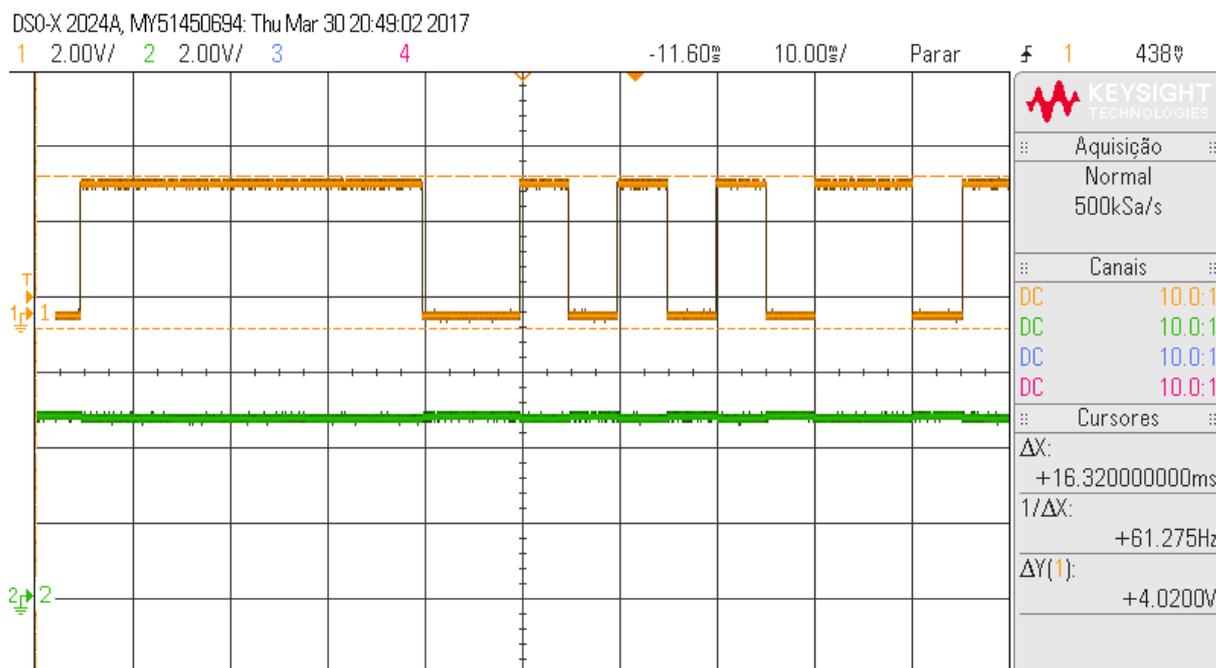


Figura 21: Resposta do fotodiodo a 105cm de distância do LED

Observando a progressão do sinal recebido com a distância, é possível confirmar o entendimento de que a distância diminui a intensidade luminosa sob o fotodiodo, acarretando diferenças cada vez menores entre os níveis alto e baixo. Dessa forma, entende-se o porquê de o sinal apresentar um aumento tão brusco na taxa de erro de símbolo, uma vez que ao atingir uma distância que resulta em uma amplitude não suficientemente grande para permitir a diferenciação entre os níveis alto e baixo, toda a mensagem é perdida e, muitas vezes, o sistema é incapaz de realizar a sincronização.

Ao realizar a repetição do experimento em outro local, percebe-se a influência das condições ambientais no alcance máximo do sistema. No primeiro experimento, a luz ambiente se mantinha constante e a superfície na qual o sistema se encontrava era fosca. Esses aspectos ambientais permitiram que o sistema permanecesse mais resistente a interferências e permitiram tal alcance máximo.

Na repetição do experimento, a superfície na qual o sistema se encontrava era brilhante e, por mais que a luz ambiente fosse controlada, o alcance do sistema foi prejudicado pela interferência causada pela reflexão do sinal na superfície. O alcance máximo do mesmo sistema chegou a 27 cm, bem abaixo do primeiro resultado obtido em condições mais controladas.

4.3.1 Influência da cor no sistema VLC

Como abordado anteriormente, a repetição do experimento mostrou a influência das condições ambientais no alcance máximo do sistema.

Outra questão interessante é entender a influência da cor no desempenho do sistema. Para averiguar isso, o experimento foi realizado como o anterior, cinco transmissões pelo sistema e apuração da taxa de erro de símbolo, SER, pela distância entre transmissor e receptor, porém alterando a cor do LED no transmissor e sob uma superfície brilhante ao invés de opaca.

O primeiro teste comparou as curvas de taxa de erro entre o LED branco e o LED verde. A Tabela 2 mostra os resultados atingidos.

Tabela 2: Resultados comparativos entre o LED branco e o LED verde

dist (cm)	Quantidade de erros - LED branco					SER	Quantidade de erros - LED verde					SER
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	0	0	0	2	0	1%	0	0	2	3	3	3%
2	2	2	1	1	0	2%	3	3	0	3	1	4%
3	2	0	0	2	0	2%	4	2	3	4	4	7%
4	2	0	0	0	0	1%	3	1	4	4	2	6%
5	0	0	0	0	0	0%	3	2	0	1	2	3%
6	0	2	0	2	1	2%	3	3	3	2	4	6%
7	0	0	0	0	0	0%	2	1	0	2	3	3%
8	2	0	0	2	3	3%	2	1	2	1	0	2%
9	3	0	0	4	3	4%	4	0	3	4	2	5%
10	0	1	0	0	2	1%	0	2	3	2	2	4%
11	1	0	0	0	0	0%	4	0	2	2	0	3%
12	0	0	0	0	1	0%	3	1	4	2	1	4%
13	1	1	0	1	1	2%	1	1	3	2	4	4%
14	0	3	1	0	3	3%	2	0	4	1	2	4%
15	2	1	0	3	2	3%	2	1	4	2	4	5%
16	4	0	1	4	1	4%	0	4	2	2	1	4%
17	1	1	1	4	1	3%	4	3	4	4	0	6%
18	1	0	0	1	1	1%	4	0	3	1	2	4%
19	1	0	0	0	1	1%	2	4	4	1	2	5%
20	2	1	3	0	4	4%	1	4	4	1	0	4%
21	4	4	0	1	1	4%	2	0	3	0	0	2%
22	3	1	1	2	0	3%	4	0	2	0	4	4%
23	0	2	0	0	1	1%	1	0	2	1	3	3%
24	3	1	3	3	3	5%	3	0	2	1	1	3%
25	2	0	0	0	4	2%	2	4	3	0	4	5%
26	4	1	1	0	1	3%	3	1	2	3	1	4%
27	3	49	49	1	49	62%	4	0	4	2	3	5%
28	-	-	-	-	-	-	3	3	3	0	0	4%
29	-	-	-	-	-	-	0	3	2	3	2	4%
30	-	-	-	-	-	-	2	3	1	1	0	3%
31	-	-	-	-	-	-	2	1	2	4	3	5%
32	-	-	-	-	-	-	1	3	0	0	0	2%
33	-	-	-	-	-	-	4	3	2	3	4	7%
34	-	-	-	-	-	-	3	1	49	2	49	42%
35	-	-	-	-	-	-	49	49	49	3	49	81%

Com os resultados da Tabela 2 foi gerada a Figura 22.

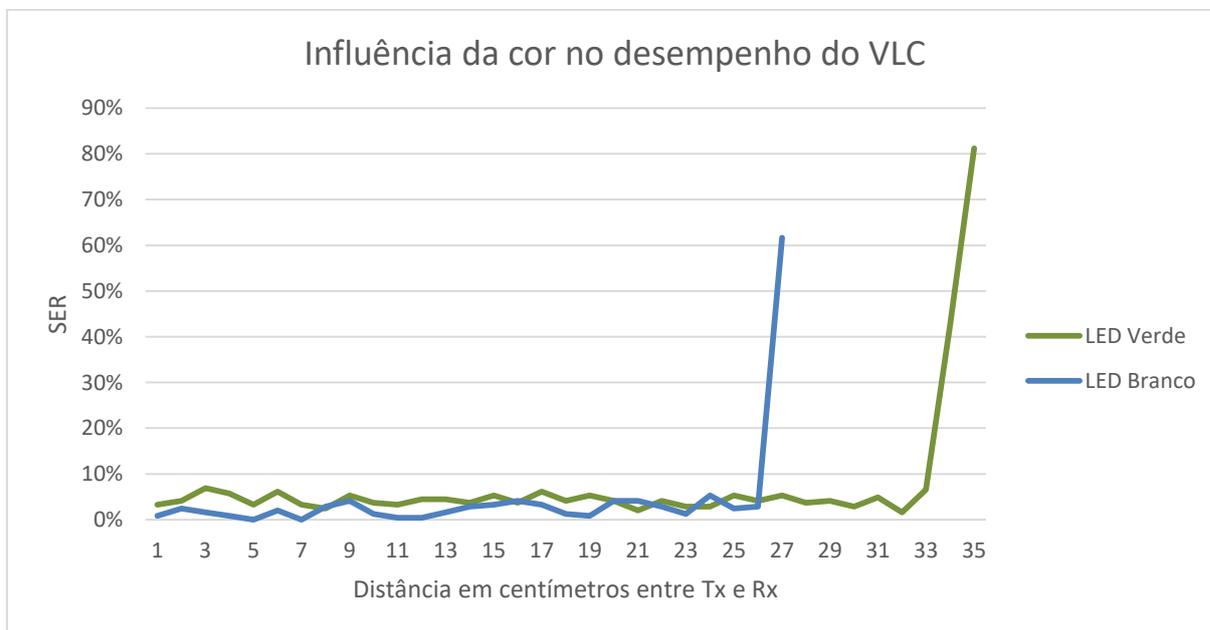


Figura 22: Curvas de taxa de erro, comparativo entre LED de cor verde e LED de cor branca

A definição de distância máxima neste experimento foi definida como a distância máxima na qual o sistema conseguia sincronizar e receber o sinal, mesmo que com erros durante a transmissão.

Observando os resultados da Tabela 2 e da Figura 22, vemos que o LED verde atingiu resultados superiores ao do LED branco, chegando a uma distância máxima de 33 cm, superior ao resultado obtido com o LED branco nas mesmas condições ambientais. O LED branco atingiu uma distância máxima de 25 cm para conseguir transmitir o sinal.

Percebe-se também pelos resultados que o sistema se mantém num patamar estável durante a variação da distância, apenas mostrando um aumento brusco da taxa de erro de símbolos quando o sistema já não era capaz de sincronizar com a sequência inicial, i.e, a amplitude do sinal foi atenuada de tal forma com a distância que não era mais possível ao receptor identificar pulsos altos.

Por mais que tenha havido o esforço de escolher componentes luminosos de com características similares, todos definidos como LED de 5mm, mesma tensão de

operação, entre 3V e 5V e definidos como LEDs de alta luminosidade, percebe-se que há diferença na luminosidade oferecida pelos LEDs.

Uma vez que não foi possível configurar um experimento de tal forma que fosse garantido que todos os LEDs oferecerem a mesma potência luminosa ao fotodiodo, não é possível afirmar a influência da cor no sistema VLC. Para que todos os diferentes LED oferecessem a mesma potência luminosa, seria necessária uma calibração na tensão aplicado em cada um deles.

Com este resultado, preferiu-se apenas testar a distância máxima de operação entre diferentes cores. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos.

Tabela 3: Distâncias máximas para sincronização do sistema

LED	Distância (cm)
Laranja	6,8
Verde	36
Branco	27
Azul	25,5
Vermelho	11,8

Como apresentado na Tabela 3, foram testados LEDs de cinco cores diferente. O LED de cor verde foi o que apresentou melhor desempenho do cenário testado e o LED laranja, o pior desempenho. O resultado foi esperado ao observar a luminosidade oferecida por cada um dos LEDs. Os LEDs verde, azul e branco apresentavam luminosidade superior quando comparados aos de cor laranja e vermelho.

Outro fato importante de ressaltar é que durante os testes percebeu-se como há dependência do sucesso da transmissão com o alinhamento entre transmissor e receptor. Pequenos desalinhamentos já eram suficientes para mitigar a possibilidade de identificação do sinal.

Apesar das pequenas distâncias obtidas neste experimento, vê-se que em comparação aos outros resultados, o LED branco apresenta bom desempenho. Este fato corrobora com a idealização de implementação de sistemas VLC nas infraestruturas de iluminação, mostrando que o sistema pode ser utilizado, desde

que obedecendo a amplitude de sinal e também uma linha de visada direta entre transmissor e receptor.

5. CONCLUSÃO

Um sistema de comunicação por luz visível, como o nome diz, permite a transmissão de informação por luz visível ao olho humano, com a premissa da utilização do sistema de iluminação já implementados para a difusão do sistema. Dito isto, uma das características principais notadas durante o estudo e construção de um sistema VLC é a importância da não cintilação durante a transmissão do sinal.

Esta necessidade principal do sistema VLC se traduz em componentes para transmissão, como lâmpadas de LED, e recepção (sensores de luminosidade) que apresentam capacidade de reagir a variações de intensidade em taxas bem altas.

O primeiro protótipo utilizado na construção do sistema VLC foi baseado em um sensor LDR, um fotoresistor. A resposta do sensor à variação de intensidade luminosa foi insuficiente para continuação da utilização do mesmo, não permitindo aplicação de altas taxas que combatessem a cintilação ou a aplicação de outras técnicas como codificação de linha.

O segundo protótipo apresentou taxas boas, menor cintilação e permitiu, após a melhoria de hardware, a aplicação de técnicas abordadas na literatura, como o código de Manchester para a cintilação, e técnicas para aumenta a robustez do sistema. A etapa de maior dificuldade durante o segundo protótipo foi atingir o sucesso na sincronização entre transmissor e receptor, sendo necessário diversas técnicas como: inserção de sequências indicando início e fim de mensagem; a atualização de limiar baseado nos níveis lidos do sensor, sincronização de símbolos e, por fim, correção de tempo de aquisição considerando instruções durante a rotina de aquisição.

O sistema VLC baseado em fotodiodo ainda apresentou cintilação perceptível, e apesar da literatura mostrar que o sistema baseado na plataforma Arduino poderia

mitigar completamente a cintilação ao diminuir o tempo de bit sem alterações à sua construção, viu-se que a plataforma não foi capaz de gerar o sinal perfeitamente ao ser submetido ao seu limite teórico. Além disso, as taxas encontradas no sistema construído foram bem abaixo do esperado teoricamente.

Os testes de desempenho confirmaram entendimentos iniciais quanto a recepção do sinal. O aumento da distância entre receptor e fonte resulta em uma diminuição de amplitude do sinal na recepção. Além disso, encontrou-se que a distância limite de operação do sistema descrito é dependente das condições ambientais, como luz e matérias ao redor da fonte de luz.

Dada a configuração do experimento de desempenho por cor LED, não foi possível definir a influência da cor no sistema VLC, sendo necessária adequação do experimento e repetição do mesmo para garantir um resultado correto.

Por fim, a construção de um sistema VLC foi baseada em componentes baratos e de baixa complexidade, confirmando a literatura quanto ao custo de implementação do sistema. A complexidade do sistema VLC encontra-se nas rotinas de sincronização e codificação, que tratam da robustez necessária ao sistema.

O sistema construído foi capaz de comprovar o conceito referente a comunicação por luz visível e mostrou a necessidade de melhorias para total sucesso na transmissão a taxas mais altas.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, Govind P. **Fiber-Optic Communications Systems**. 3 ed. Rochester, NY: John Wiley & Sons, 2002.
- ANTTALAINEN, Tarmo. **Introduction to Telecommunications Network Engineering**. 2 ed. Norwood, MA: Artech House, Inc., 2003.
- ARDUINO, **Arduino**. 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main>>. Acesso em: 6 de Dez. 2016
- AGRAWAL, Govind P. **Lightwave Technology: Telecommunication Systems**. Rochester, NY: John Wiley & Sons, 2005
- GALLAGER, Robert, G. **Principles of Digital Communication**. New York: Cambridge University Press, 2008.
- KOMINE, Toshihiko; NAKAGAWA, Masao. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**. p. 100-107. fev. 2010.
- PATHAK, Parth H. Et al. Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**,. p. 2047-2077. 2015.
- RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless communications: principles and practice**. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, c2002. 707 p. (Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series).
- SAGOTRA, Rajan; AGGARWAL, Reena. Visible Light Communication. **International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)**. p. 906-910. 04/2013.
- SCHMID, Stefan et al. An LED-to-LED Visible Light Communication System with Software-Based Synchronization. In: **3RD IEEE WORKSHOP ON OPTICAL WIRELESS COMMUNICATIONS**, 1., 2012, Anaheim, CA. p. 1264 - 1268.

SONG, Sian W. **Código Hamming**: Curso de Organização de Computadores. 8 de outubro de 2014. Notas de aula. Disponível em: < <https://www.ime.usp.br/~song/mac412/hamming.pdf> >. Acesso em 01 de abril de 2017.

STOFI, Guido. Percepção Visual Humana: Curso Princípios de Televisão Digital. Agosto de 2016. Notas de aula. Disponível em: < <http://www.lcs.poli.usp.br/~gstolfi/PPT/APTV0216.pdf> >. Acesso em 01 de Abril de 2017

ZIEMER, Rodger E; TRANTER, William H. **Principles of communications: systems, modulation and noise**. 6 ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2009. xvi, 736 p.

WESOLOWSKI, Krzysztof. **Introduction to digital communication systems**. Chichester, Inglaterra: Wiley, 2009. xiv, 561 p.

ANEXO I: Algoritmo transmissor

```

/* *
 *          UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
 *          CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIA SOCIAIS APLICADAS
 *
 *          TRABALHO DE GRADUAÇÃO
 *          ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DE LUZ VISÍVEL
 *          (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION)
 *
 *          LUÍSA BOEN
 *          luisaboen@gmail.com
 *
 *          ORIENTADOR: PROF. DOUTOR MURILO BELLEZONI LOIOLA
 *
 *          TRANSMISSOR DO SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL
 *          ABRIL/2017
 * PLACA: ARDUINO UNO
 */

//Definições gerais
#define TX_PIN 12 //Pino de transmissão - LED
int nBits=12;// tamanho do bloco a ser transmitido
int simb;
int ii=0;//contador
int bit;

//variáveis para codificação Hamming
int bit1=0;//mais significativo
int bit2=0;
int bit3=0;
int bit4=0;
int bit5=0;
int bit6=0;
int bit7=0;
int bit8=0;
int data_h[12];

//Definições para realizar o tempo de bit com Manchester
float th=0.5; // 50% duty cycle
float tl=1-th;//manchester bit time
int quantificador=10;//tempo de bit milissegundos

//DADOS
char data[]="absque sudore et labore nullum opus perfectum est" ;

//SETUP DA PLACA
void setup() {
    pinMode(TX_PIN,OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
}

```

```

//SINCRONIZAÇÃO
void seq_inicial(){

    data_h[0]=1;
    data_h[1]=1;
    data_h[2]=1;
    data_h[3]=1;
    data_h[4]=1;
    data_h[5]=1;
    data_h[6]=1;
    data_h[7]=1;
    data_h[8]=1;
    data_h[9]=1;
    data_h[10]=1;
    data_h[11]=1;
    for (i=0; i<=11 && i<nBits; i++) {
        bit=data_h[i];

        //bit = 1
        digitalWrite(TX_PIN, HIGH);
        delay((th+tl)*quantificador); //
        //sincronização não vai a zero

        Serial.print(bit);
    }
}

///CODIFICAÇÃO DE CANAL
// CÓDIGO HAMMING(12,8)
void conv_h(int n){
    //leitura dos bits do char
    bit1=bitRead(n, 8-1);
    bit2=bitRead(n, 8-2);
    bit3=bitRead(n, 8-3);
    bit4=bitRead(n, 8-4);
    bit5=bitRead(n, 8-5);
    bit6=bitRead(n, 8-6);
    bit7=bitRead(n, 8-7);
    bit8=bitRead(n, 8-8);

    //definição dos novos bits pelo código Hamming(12,8)
    data_h[0]=bit1^bit2^bit4^bit5^bit7;//BIT PARIDADE1
    data_h[1]=bit1^bit3 ^ bit4^ bit6^bit7;//BIT PARIDADE2
    data_h[2]=bit1;
    data_h[3]=bit2^bit3^bit4^bit6;//BIT PARIDADE4
    data_h[4]=bit2;
    data_h[5]=bit3;
    data_h[6]=bit4;
    data_h[7]=bit5^bit6^bit7^bit8;//BIT PARIDADE8
    data_h[8]=bit5;
    data_h[9]=bit6;
    data_h[10]=bit7;
    data_h[11]=bit8;

    //chama função piscar LED
    dispBinary(data_h);
}

```

```

}

//FUNÇÃO ESCREVE BIT -> LED
//Codificação de linha Manchester

void dispBinary(int n[]){

    //SINC SIMBOLO 3 BITS 1 SEM MANCHESTER
    // 1 BIT 1 COM MANCHESTER
    //sempre envia um bit 1 antes de todo símbolo 1 = 10
    digitalWrite(TX_PIN, HIGH);
    delay(th*quantificador*7); //
    digitalWrite(TX_PIN,LOW);
    delay(tl*quantificador);

    for (i=0; i<=n && i<nBits; i++) {
        bit=n[i];
        if(bit==1){
            //bit = 1 -> 10 MANCHESTER
            digitalWrite(TX_PIN, HIGH);
            delay(th*quantificador);

            digitalWrite(TX_PIN,LOW);
            delay(tl*quantificador);
        }else{
            //bit=0 -> 01 MANCHESTER

            digitalWrite(TX_PIN, LOW);
            delay(th*quantificador);

            digitalWrite(TX_PIN, HIGH);
            delay(tl*quantificador);
        }

        Serial.print(bit);//VISUALIZAÇÃO DO SINAL ENVIADO
    }

    Serial.println();
}

```

```
//TRANSMISSÃO
void loop() {

  //Inicia a sequência de transmissão
  seq_inicial();
  while(data[ii]!='\0'){
    //inicia sequência de dados
    Serial.println(data[ii]);
    simb=int(data[ii]);//conversão char to int
    Serial.println(simb);
    conv_h(simb);//codificação do canal
    ii++;
    if(data[ii]=='\0'){//CASO SEJA O FIM DA MENSAGEM
      digitalWrite(TX_PIN, LOW);
      ii=0;
      Serial.print("Tamanho do dado: ");
      Serial.println(sizeof(data));
      seq_inicial();//manda mesma mensagem de sequência inicial para
sinalizar o fim da transmissão
      //delay até o próximo trem de pulsos
      delay(10000);
    }
  }
}
```

ANEXO II: Algoritmo receptor

```

/* *
 *          UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
 *          CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIA SOCIAIS APLICADAS
 *
 *          TRABALHO DE GRADUAÇÃO
 *          ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DE LUZ VISÍVEL
 *          (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION)
 *
 *          LUÍSA BOEN
 *          luisaboen@gmail.com
 *
 *          ORIENTADOR: PROF. DOUTOR MURILO BELLEZONI LOIOLA
 *
 *          RECEPTOR DO SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL
 *          ABRIL/2017
 * PLACA: ARDUINO MEGA2580
 */
//Definições gerais
int RX_pin = A0;
int led_amostra=12;
int flag=1; //usado para a mostrar o tempo de amostragem
int luz_inicial=0;
int bit_thres=0;
int sensorValue = 0; //valor do sensor
int buffsim[56];
int flag_msg=0;
int tratado[12];
int dado[8];
int luzalta=0;
int contbuff=0;
int simb=0;
char simbchar="";
int erro=0;

//VARIÁVEIS CÓDIGO HAMMING (12,8)
byte k1=0;
byte k2=0;
byte k4=0;
byte k3=0;

//SETUP DA PLACA
void setup() {

  Serial.begin(9600);
  pinMode(led_amostra,OUTPUT);
  inicia_sensor();//inicia o sensor - fotodiodo

}

//INICIALIZAÇÃO DO SENSOR

```

```

void inicia_sensor(){

    luz_inicial = 1024-analogRead(RX_pin);

    bit_thres = luz_inicial+250;//valor arbitrário, atualizado após
    sincronização
    Serial.println("Sensor iniciado");
    Serial.print("Luz inicial: " );
    Serial.println( luz_inicial);
}

//DECODIFICAÇÃO BIN -> CHAR
void decodifica(int data[]){
    for (int j=0; j<8;j++)
    {
        simb=simb << 1;
        simb=simb+data[j];
    }
    simbchar=char(simb);

    if(simb!=255){//255 SIMBOLO FINAL - SEQUENCIA DE 1111 1111
    Serial.print(simbchar);
    }else{
        Serial.println("");
        Serial.println("FIM DA MENSAGEM");
    }
}

//CORREÇÃO DE ERROS POR HAMMING(12,8)
void corrige_erro(int y[]){
    //VERIFICAÇÃO DOS BITS DE PARIDADE
    //OPERAÇÃO XOR PARA VÁRIOS BITS
    k1=y[0]+y[2]+y[4]+y[6]+y[8]+y[10];
    k2=y[1]+y[2]+y[5]+y[6]+y[9]+y[10];
    k3=y[3]+y[4]+y[5]+y[6]+y[11];
    k4=y[7]+y[8]+y[9]+y[10]+y[11];

    if(k1>1){
        k1=0;
    }
    if(k2>1){
        k2=0;
    }
    if(k3>1){
        k3=0;
    }
    if(k4>1){
        k4=0;
    }

    if((k1==1)||k2==1||k3==1||k4==1){
        k4=k4<<3;
        k3=k3<<2;
        k2=k2<<1;
        erro=k4+k3+k2+k1;//POSIÇÃO DO ERRO EM BINÁRIO

//VETOR INICIA EM 0

```

```

        if (erro!=0){
            if(y[erro-1]==0){
                y[erro-1]=1;
            }else{
                y[erro-1]=0;
            }
        }
    }
}

//MAPEAMENTO DOS BITS RECEBIDOS
dado[0]=y[2];
dado[1]=y[4];
dado[2]=y[5];
dado[3]=y[6];
dado[4]=y[8];
dado[5]=y[9];
dado[6]=y[10];
dado[7]=y[11];

//DECODIFICA O SIMBOLO
decodifica(dado);
}

//AMOSTRAGEM SIMBOLO A SIMBOLO
void amostragem(int data[]){

    int cont=0;
    //SINCRONIZAÇÃO SÍMBOLO
    while(data[cont]==0){
        cont=cont+1;
    }
    cont=cont+1;

    for(int i=cont; i<cont+24; i=i+2){
        //DECODIFICA MANCHESTER
        if(data[i+1]==0){
            tratado[(i-cont)/2]=1;

        }else{

            tratado[(i-cont)/2]=0;
        }
    }

    corrige_erro(tratado);
}

//RECEPÇÃO E DECODIFICAÇÃO DA MENSAGEM

```

```

void recebe_sinal(){
//ATÉ FIM DA MENSAGEM
    while(simb!=255){

        //ARMAZENA, DECIDE AMOSTRAGEM, E DESCODIFICA CADA SIMBOLO
        unsigned long comeco=micros();//leitura de tempo oferecido pela placa
        digitalWrite(led_amostra, HIGH);//visualização no osciloscópio tempo
de aquisição

        for(int i=0; i<32; i++){

            sensorValue =1024- analogRead(RX_pin);
            if(sensorValue>bit_thres){
                buffsim[i]=1;
            }else{
                buffsim[i]=0;
            }
            delayMicroseconds((9900/2)-43);//tempo de amostragem para
sincronia - conseguido experimentalmente - OSCILOSCÓPIO

        }

        amostragem(buffsim);

        digitalWrite(led_amostra, LOW);//visualização no osciloscópio tempo
de aquisição
        unsigned long fim=micros();//leitura de tempo oferecido pela placa
        fim=fim-comeco;//leitura de tempo oferecido pela placa
        //Serial.println(fim);//Escreve o tempo de aquisição
    }
    contbuff=0;
    simb=0;
}

```

```

//PROGRAMA PRINCIPAL
void loop() {

```

```

    sensorValue =1024 - analogRead(RX_pin);
    //AGUARDA SINAL ALTO PARA INICIAR AQUISIÇÃO
    while(sensorValue<bit_thres){
        delayMicroseconds(500);
        sensorValue =1024 - analogRead(RX_pin);
    }delayMicroseconds(2500);
    //VERIFICAÇÃO SE ACIONAMENTO É
    while(flag_msg==0){

        //CASO RECEBE 12 BITS ALTOS - SINC OK
        if(contbuff==24){
            Serial.println();
            Serial.println("Sinc OK");
            //atualiza threshold
            bit_thres=(luz_inicial+luzalta)/2;
            //começa a recepção do sinal
            recebe_sinal();//-> DECISÃO -> CORREÇÃO DE ERRO ->
decodificação > visualização na serial
            flag_msg=1;

        }

        //VERIFICA SEQUENCIA INICIAL
        sensorValue =1024 - analogRead(RX_pin);
        if(sensorValue>bit_thres){

            contbuff=contbuff+1;

            luzalta=sensorValue;
            //atualiza
        }else{
            //ZERA O CONTADOR CASO HAJA UM 0 ATÉ AS PRIMEIRAS 24 AMOSTRAS (12
            BITS*2AMOSTRAS=24 AMOSTRAS)

            contbuff=0;

            flag_msg=1;//mensagem não recebida - disparo de verificação
errado

        }

        //PERIODO ENTRE AMOSTRAS
        delay(10/2);
    }
    flag_msg=0;
}

```