

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CAMOBI
CURSO TECNOLÓGICO EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Luis Felipe Viaro Rosa

Proposta Rede De Comunicação Para Controle Baseado Em VLC

Santa Maria, RS
2023

Luis Felipe Viaro Rosa

Proposta Rede De Comunicação Para Controle Baseado Em VLC

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Eletrônica industrial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Camobi, como requisito parcial para obtenção do título de **Tecnólogo em Eletrônica Industrial**.

Orientador: Prof. Lucas Teixeira

Santa Maria, RS
2023

Luis Felipe Viaro Rosa

Proposta Rede De Comunicação Para Controle Baseado Em VLC

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Eletrônica industrial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Camobi, como requisito parcial para obtenção do título de **Tecnólogo em Eletrônica Industrial**.

Aprovado em (dia) de (mês) de (ano):
14/12/2023

Lucas Teixeira
Membro 1 da banca de avaliação do trabalho (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Douglas Camponogara
Membro 2 da banca de avaliação do trabalho (UFSM)

Jonas Tibola
Membro 3 da banca de avaliação do trabalho (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao grupo GEDRE, por proporcionar a base de conhecimentos necessários para a proposta realizada.

Agradeço ao Professor Lucas, por realizar a devida orientação para a realização do trabalho.

Agradeço aos meus pais por proporcionar apoio e motivação para continuar no campo acadêmico .

Agradeço aos meus amigos que me apoiaram durante os momentos ruins durante a realização do artigo.

RESUMO

Proposta Rede De Comunicação Para Controle Baseado Em VLC

AUTOR: Luis Felipe Viaro Rosa

ORIENTADOR: Lucas Teixeira

Atualmente é cada vez mais notável a procura pela interconexão de dispositivos, seja para realizar a automação através de rotinas enviadas a atuadores, ou ao realizar o envio de mídia a ser reproduzida em um dispositivo externo, visto isso diversas implementações buscam fazer o uso das tecnologias e protocolos já estabelecidos para realizar uma conexão do tipo IoT/(Internet of Things). No entanto, a maioria das opções disponíveis como Wi-Fi/(Wireless Fidelity) ou Zigbee podem apresentar problemas ao disputar sua banda de transmissão no espectro de radiofrequência. Propõe-se uma utilização das tecnologias ainda não exploradas, utilizando o canal luminoso para realizar uma comunicação de dados a diversos dispositivos, aplicando-se uma tecnologia que permeia instalações luminosas através de lâmpadas LED, para realizar o controle de dispositivos próximos sem interferir nos demais canais de comunicação.

Palavras-chave: Comunicação de dados. Canal luminoso. Interconexão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Proposta de topologia para transmissão em VLC.....	13
Figura 2 - Proposta de topologia para transmissão em VLC.....	14
Figura 3 - Diagrama proposto para o software do controlador da rede.....	15
Figura 4 - Resposta da corrente reversa fornecida pelo sensor através da iluminância..	17
Figura 5 - Circuito de amplificação em 2 estágios propostos.....	18
Figura 6 - Resposta do circuito receptor para um sinal de 100Khz.....	18
Figura 7 - Layout do receptor realizado com a face de cobre de cima oculta.....	19
Figura 8 - Placa de circuito utilizada para validação do receptor.....	20
Figura 9 - Diagrama de software do receptor.....	21
Figura 10 - Diagrama de software do transmissor.....	21
Figura 11 - foto tirada durante os testes de funcionamento do receptor.....	22
Figura 12 - Aquisição na marca de 200 Lux sem interferência luminosa exterior. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.....	23
Figura 13 - Aquisição na marca de 200 Lux com interferência luminosa exterior. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.....	23
Figura 14 - Aquisição na marca de 100 Lux sem interferência luminosa exterior. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.....	24
Figura 15 - Aquisição na marca de 100 Lux com interferência luminosa exterior. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.....	24
Figura 16 - Aquisição de dados no limite aceitável para comunicação a 3m. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.....	25
Figura 17 - Imagem do receptor fabricado montado sobre o microcontrolador Tiva-C....	25
Figura 18 - Imagem do arranjo do receptor durante os testes de conexão.....	26

LISTA DE QUADROS

Tabela 1 - Comparação de tecnologias de interconexão de dispositivos.....	11
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de tecnologias de interconexão de dispositivos.....	11
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos:.....	12
2. PROPOSTA DE TOPOLOGIA.....	12
3. DESENVOLVIMENTO DA TOPOLOGIA.....	13
3.1. Controlador.....	13
3.2. Receptor.....	15
3.3. Dimensionamento do receptor.....	16
3.4. Montagem da placa de circuito do receptor.....	19
3.5. Elaboração do software.....	20
4. RESULTADOS.....	22
4.1. Validação do Transdutor de luz analógico.....	22
4.2. Validação da implementação completa do Receptor.....	25
5. CONCLUSÃO.....	26

1. INTRODUÇÃO

Com a constante evolução das tecnologias de comunicação, a realização da conexão de diversos dispositivos em uma rede interligada é cada vez mais estudada, seja para a implementação de uma rede IoT/(*Internet of Things* - internet das coisas), onde diversos componentes eletrônicos se comunicam entre si, ou para redes do tipo WLAN/(Wireless Local Area Network). Atualmente já existem maneiras eficientes de realizar essas conexões, através de tecnologias como zigbee, bluetooth ou até mesmo o protocolo WiFi/(*Wireless-Fidelity*), realizando a interconexão de dispositivos sem necessitar uma configuração prévia, podendo alcançar taxas de transmissões altas o suficiente para o envio constante de informações como em uma transmissão de áudio ou vídeo em alta definição, além de proporcionar uma ampla área de cobertura chegando até 100m em algumas aplicações.

Porém essas opções apresentam alguns problemas, como a utilização do canal Radiofrequência/(RF) para a transmissão de dados, que é realizado em faixas estreitas de frequências não licenciadas, próximas a 2,4GHz e 5GHz, que podem causar interferências nos dispositivos em redes com altas densidades de transmissão simultânea. Além disso, sinais RF podem não apresentar um nível de segurança alto, uma vez que sabendo seu protocolo de comunicação, um observador exterior a rede poderia capturar as informações propagadas.

Pensando nisso torna-se interessante a utilização de diferentes canais de transmissão, que podem atuar de forma paralela aos protocolos já estabelecidos, focado em aplicações internas, sendo capaz de realizar a comunicação em aplicações de múltiplas saídas, mantendo a interferência de radiofrequência baixa e possuindo uma dinâmica rápida, que permite mobilidade dos dispositivos na rede.

A tecnologia de comunicação por luz visível/(VLC) estuda a utilização do espectro de ondas eletromagnéticas visíveis a olho humano, com o comprimento de onda de 380 a 780 nm, como um canal de transmissão em aplicações de curta distância, através da modulação da intensidade luminosa em altas velocidades, sendo limitada pela intensidade luminosa e bloqueios físicos de iluminação. Essa tecnologia ganhou notoriedade com sua aplicação em lâmpadas LED, devido às altas taxas de variação possíveis com estes dispositivos e boa eficiência energética quanto a parte de iluminação, além disso, como lâmpadas LED vem

crecendo em uso doméstico essa tecnologia poderia ser facilmente adaptada para a transmissão de dados, promovendo a utilização do canal luminoso como meio de transmissão, sendo ideal para aplicações internas onde diversos dispositivos recebem informações de um controlador central ou em uma topologia de rede do tipo árvore.

Através da Tabela 1 é possível comparar os meios mais comuns para a interconexão WLAN internas e redes IOT, em conjunto com a comparação do protocolo proposto. Nota-se principalmente a disparidade das taxas de transmissão, onde os protocolos que necessitam de uma transferência contínua de dados, como o Wi-Fi e Bluetooth, uma taxa mais alta de dados pode ser alcançada, porém apresentando problemas na quantidade de dispositivos conectados. Já os protocolos Zigbee e Thread, possuem a possibilidade de conexão em rede Mesh, conectando dispositivos com baixa demanda de dados, e realizando a retransmissão de pacotes pela rede, aumentando a distância de comunicação e número de dispositivos possíveis. Por outro lado, a comunicação por VLC apresenta uma distância menor de propagação, sendo estipulada através da potência da fonte de luz responsável pela transmissão, mas que se mantém confinada à área de propagação, podendo atingir velocidades altas de comunicação nesse espaço independente de outros canais de transmissão.

Tabela 1 - Comparação de tecnologias de interconexão de dispositivos

	Taxa de Transmissão	Largura de banda máxima	Distância Máxima	Canal de transmissão	Segurança e Privacidade
Bluetooth	2 Mbps	79 Mhz	40m+	2,4-2.48GHz	Média
WiFi	9608 Mbps	20-160Mhz	30-120m	2,4/5/6GHz	Alta
Zigbee	250 Kbps	32Mhz	300m+	780-915 MHz/2.4 GHz	Média/Baixa
Thread	250Kbps	5Mhz	20-30m	2,4GHz	Média
VLC	1Mbps	80Mhz	5m	Luz (430-750THz)	Média/Alta

No entanto, a comunicação por luz visível apresenta alguns problemas quanto a sua implementação, um dos principais quanto a percepção visual é a cintilação, chamado também flicker do inglês, fazendo a luz piscar, causando desconforto e também efeitos negativos ao ser humano, principalmente oscilações em frequências abaixo de 200Hz (segundo S. Berman), podendo causar efeitos perceptíveis até 1KHz. Além disso, a tecnologia pode apresentar problemas em ambientes com outras fontes de luz (interferência luminosa), uma vez que o receptor não será capaz de recuperar o dado transmitido com clareza, o que

prejudica aplicações de múltiplas emissoras enviando dados de forma descoordenada, ou aplicações que os receptores realizam o retorno, ou *uplink*, de informações pelo canal luminoso/(O'Brien).

1.1 OBJETIVOS:

- Controle de dispositivos e transmissão de dados realizado através de uma lâmpada;
- Capacidade de conexão rápida e Identificação de cada dispositivo conectado;
- Transmissão em tempo real de informações;

De forma a atingir estes objetivos, pretende-se utilizar uma fonte de iluminação instalada a 2 metros de altura do chão, simulando a iluminação de um ambiente doméstico, capaz de iluminar uma área circular com 2m de raio com 200 lux de iluminância, que realiza uma transmissão de dados para os dispositivos em sua área de iluminação. Esta fonte de iluminação deve ser capaz de modular a intensidade luminosa, que deve enviar informações periódicas através da variação de intensidade luminosa comandada pelo controlador da rede, realizando a transmissão tanto de informações de configuração para equipamentos como motores, quanto para a transmissão de mídia de áudio ou vídeo, buscando alcançar uma transmissão de 200kbps.

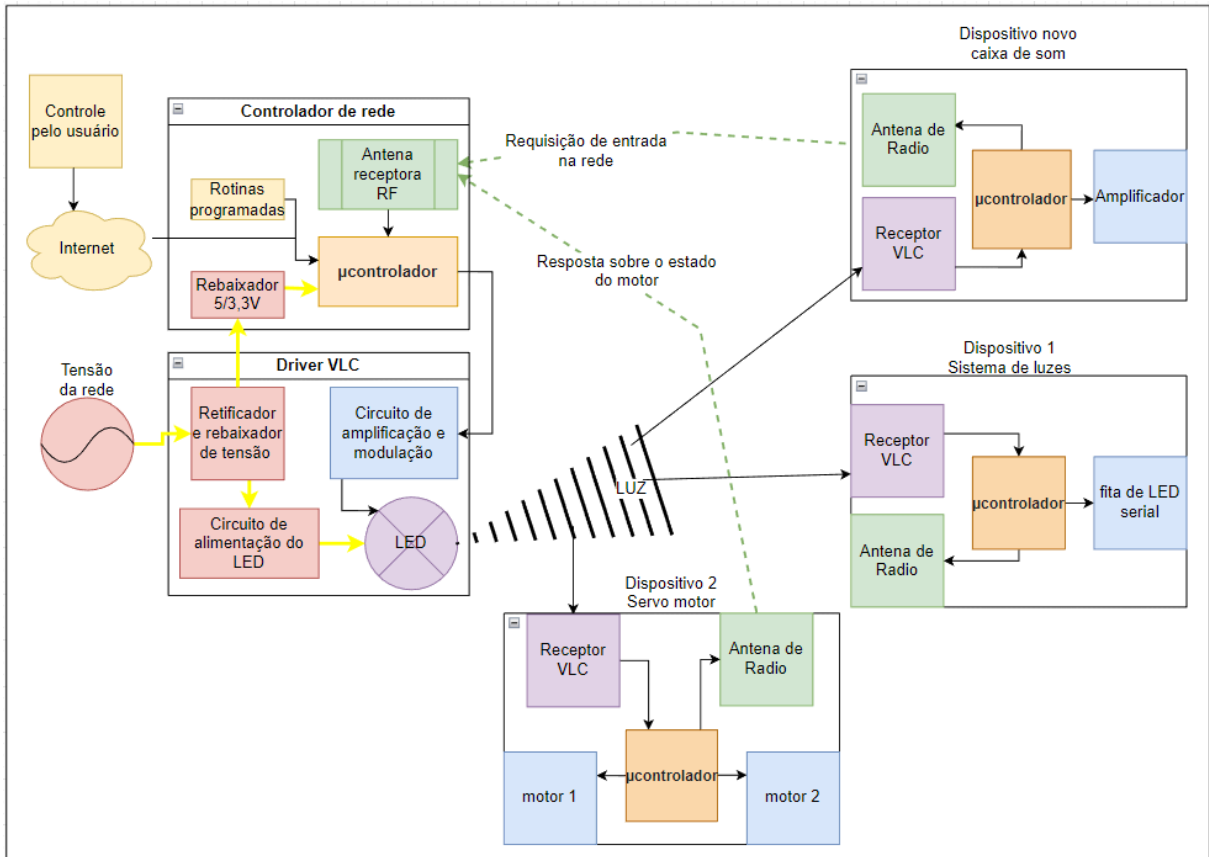
O controlador possui um acesso a todos dispositivos da rede, e possui um endereçamento de cada dispositivo conectado, e realiza o envio de dados aos receptores de forma periódica. Estes receptores não possuem um retorno de informações através do canal luminoso, visto que isso poderia causar interferências em aplicações com vários dispositivos, por este motivo o enlace de comunicação é realizado através de antenas de RF, projetadas para a frequência de 433 MHz. Este meio de retorno serve tanto para alertar ao controlador sobre novos dispositivos que querem ingressar na rede, quanto para enviar informações sobre a aquisição dos pacotes, buscando causar poucas interferências no canal RF.

2. PROPOSTA DE TOPOLOGIA

Para a comprovação do uso do canal de transmissão luminoso, é proposta um arranjo de uma conexão apresentado na figura 1, sendo composto por um controlador central, que utiliza de um microcontrolador para fazer o envio dos sinais, que passam por um sistema de amplificação, responsável por fazer a alimentação do LED, esse sistema pode ser chamado também de Driver LED, que realiza a variação da luz. Estes percebem as variações luminosas através de um fotosensor, e alimentam o sinal para outro microcontrolador, que identifica se o sinal foi direcionado a ele, atua sobre a carga conforme requisitado, e envia um sinal de

confirmação através de um enlace de comunicação ponto-a-ponto realizado por módulos RF, com o transmissor presente nos dispositivos, e o receptor no controlador da rede. Nos próximos capítulos a implementação dos blocos será apresentada em mais detalhes.

Figura 1 - Proposta de topologia para transmissão em VLC.



Fonte: Autor.

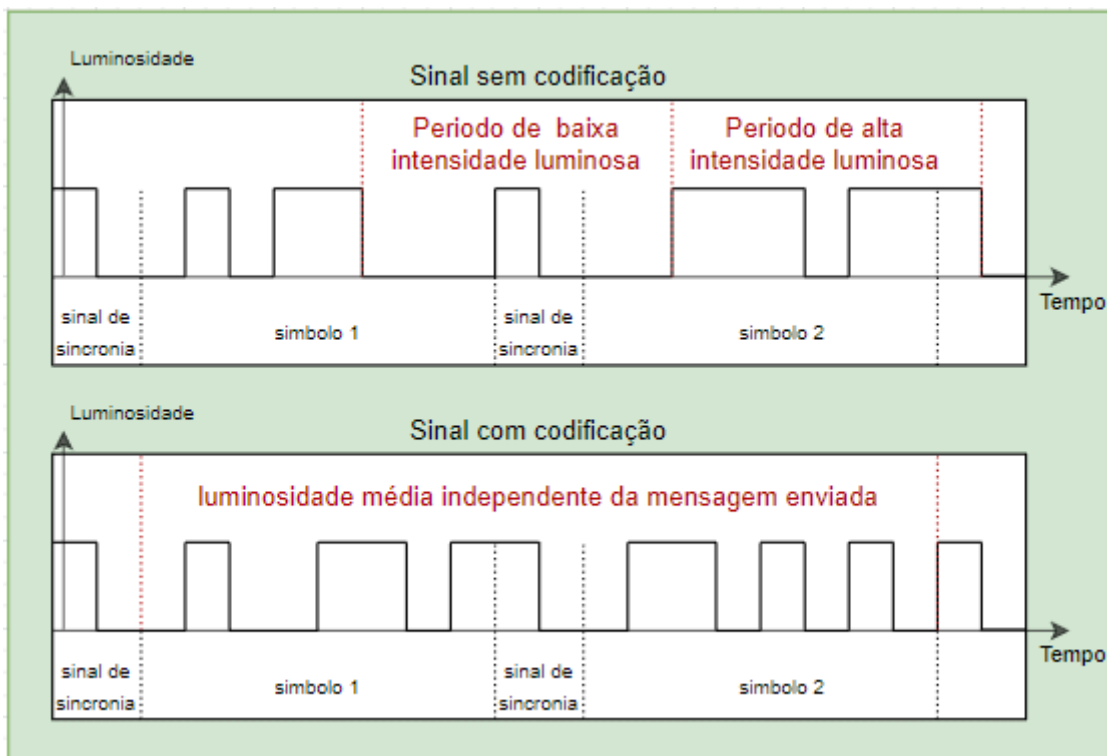
3. DESENVOLVIMENTO DA TOPOLOGIA

3.1. CONTROLADOR

O controlador engloba todo o software que age no envio de informações, utilizando o microcontrolador Tiva-c para realizar esse processamento, enviando os dados através de uma saída UART, e transmitindo para um Driver responsável pela modulação da luz. A transmissão de informações a partir de uma lâmpada faz necessário levar em consideração o efeito de flicker que pode ocasionalmente ocorrer dependendo do padrão do sinal enviado, para evitar este efeito será realizado uma codificação digital dos dados, garantindo que a sequência binária propagada pelo canal luminoso não seja composta por grupos grandes do mesmo nível lógico. Com este objetivo é realizado uma codificação de tempo de execução limitado (Run-Length Limited - RLL), que diminui a recorrência do mesmo nível lógico

através de um aumento do tamanho dos símbolos, que deve diminuir as componentes de baixa frequência do sinal, responsáveis pela percepção da cintilação na lâmpada, porém ao custo de uma taxa de transferência de dados menor. Na figura 2 pode ser visto a comparação dos sinais com e sem a codificação RLL, onde o sinal sem um processamento pode apresentar longos períodos de sinal alto ou baixo, que não ocorre ao realizar um balanceamento do sinal enviado.

Figura 2 - Proposta de topologia para transmissão em VLC.



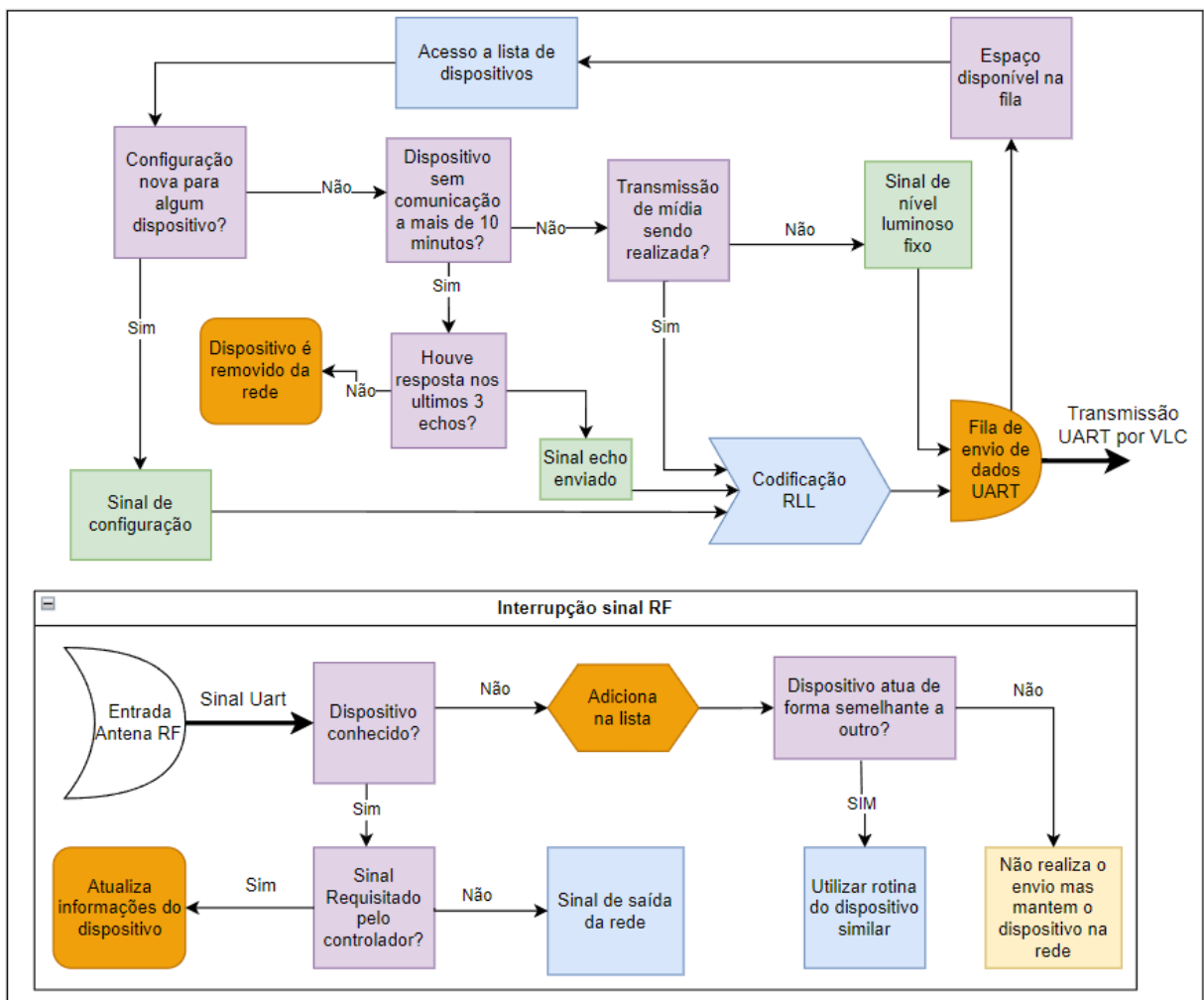
Fonte: Autor.

Para realizar o controle da intensidade luminosa da lâmpada o controlador envia os sinais para o circuito de alimentação, responsável por fazer a variação da corrente na lâmpada e também manter um nível médio de corrente contínua, assim deixando a cintilação luminosa menos perceptível a olho humano devido a natureza não linear de percepção da intensidade luminosa (segundo S. Rajagopal). Como o sinal enviado pelo controlador afeta diretamente a intensidade luminosa, o mesmo deve também sempre manter uma comunicação pelo canal luminoso, para garantir que não haja nenhuma variação na iluminação, assim quando o controlador não estiver realizando nenhuma transmissão será realizado o envio de sinais equilibrados, mas que não apresentem nenhuma informação válida aos receptores. O dispositivo Driver LED, responsável por realizar a variação luminosa, foi um amplificador linear classe A, com a realimentação de sinal através de um ampop no arranjo fonte de

corrente, projetado para o controle da intensidade luminosa de uma lâmpada de 28W, que foi disponibilizado para testes de iluminação.

A topologia lógica do software do controlador pode ser expresso conforme a figura 3, onde através de um acesso aos dispositivos conectados, configurações atuais e tempo de última comunicação de cada dispositivo são acessadas, o controlador então atualiza as configurações e confirma a conexão dos dispositivos conforme necessário, então é executado o envio de mídia pelo canal luminoso, caso nenhuma informação precise ser enviada a fila de envio é preenchida de sinais sem informações válidas.

Figura 3 - Diagrama proposto para o software do controlador da rede.



Fonte: Autor.

3.2. RECEPTOR

O receptor do sinal atua de forma mais simples que o controlador, ele é capaz de detectar as variações luminosas através de um dispositivo fotossensível, essas variações são processadas pelo microcontrolador, fazendo decodificação de dados e verificação de

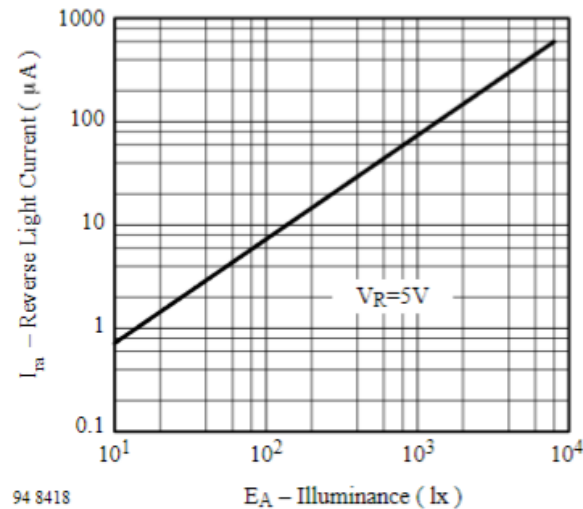
integridade do pacote, e por fim realizando uma verificação do endereço do sinal. O receptor atua de forma requisitada pela rede, e realiza uma confirmação sobre a recepção do pacote e atualização do estado do dispositivo, caso não seja possível utilizar as informações é realizado uma transmissão requisitando as informações novas. Os receptores funcionam de maneira simples para facilitar tanto a integração na rede, quanto à aplicação a cargas diversas.

Caso o dispositivo não esteja conectado à rede e seu endereço aleatório seja chamado, o mesmo enviará um sinal de conexão ao controlador, informando seu endereço para que o controlador possa atualizar seu endereço. Os receptores da rede atuam com uma conexão do tipo mestre-escravo, onde estes não iniciam a comunicação com a rede, apenas esperam até que sejam endereçados, por este motivo, é considerado conectado a rede aqueles dispositivos que detectam a variação luminosa, e ao mesmo tempo possuem um endereçamento dado pelo controlador. Esse novo endereço é utilizado pelo receptor para identificar suas mensagens de configuração, e também para avisar sobre sua conexão ao mestre da rede. O dispositivo também alerta o controlador quando não estiver mais conseguindo perceber a variação luminosa, para que o controlador saiba que o mesmo deve ser removido da rede.

3.3. DIMENSIONAMENTO DO RECEPTOR

A realização do receptor foi iniciada a partir dos parâmetros do receptor BPW34, que se comporta como um diodo, com a diferença de apresentar uma corrente reversa à sua polaridade quando ocorre a incidência de luz sobre ele. A figura 4 mostra a relação da incidência luminosa sobre o sensor e a corrente reversa apresentada, estima-se que essa corrente irá variar aproximadamente $5\mu\text{A}$, prevista para uma aplicação de 200 lux de incidência no sensor, com uma variação de 25% da iluminância correspondente a modulação dos sinais, que é consideravelmente pequena quanto ao Driver utilizado, permitindo uma maior eficiência do amplificador. Essa variação de corrente deve ser amplificada por um amplificador de transimpedância, para uma variação de tensão de 0-3,3V que será alimentada no Tiva-c em uma faixa aceitável, também é desejada uma resposta boa em frequência do circuito amplificador, atingindo no mínimo 1 MHz, permitindo a operação do receptor em até 2 Mbaud, é desejado que o circuito como um todo tenha um tamanho reduzido, suficiente para ser ligado diretamente ao microcontrolador, o que limita bastante a possibilidade de escolha dos componentes.

Figura 4 - Resposta da corrente reversa fornecida pelo sensor através da iluminância.



Fonte: Datasheet do sensor BPW34.

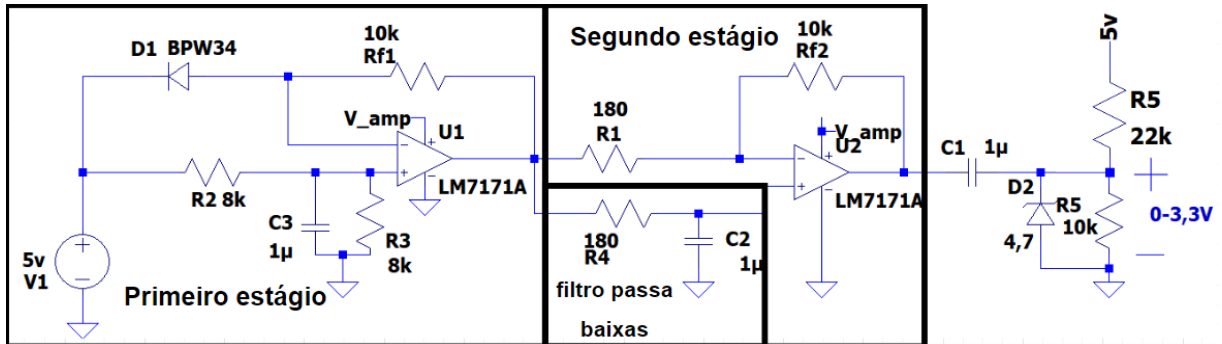
Visto que a aplicação necessitava de um amplificador com um ganho alto em uma resposta boa em frequência, inicialmente foi proposto a utilização do amplificador de transimpedância MAX 40659, que apresenta uma tensão diferencial em uma faixa de 1,5V, saturando com uma corrente entrada de $15\mu A$, no entanto, devido a dificuldades na montagem dos circuitos e a quantidade de unidades disponíveis a utilização deste circuito foi inviabilizada, tendo em vista o tempo disponível para a execução do receptor. Por este motivo, tornou-se mais interessante a aplicação de um circuito mais simples, composto por amplificadores operacionais.

O amplificador que melhor atendeu aos requisitos citados anteriormente foi o LM 7171, que possui uma resposta rápida, com o slew rate de $4,1V/ns$, outra característica que ajudou na escolha do componente foi a disponibilidade de alimentação em 5V, que pode ser fornecida pelo microcontrolador utilizado.

Foi proposto o arranjo da figura 5, com dois estágios de amplificação, o primeiro estágio cria uma tensão sobre o resistor de realimentação utilizando a corrente reversa fornecida pelo sensor, que causa uma variação na tensão de saída do amplificador inversamente proporcional à iluminância. É feita a realimentação negativa no amplificador, utilizando um nível de referência constante na alimentação positiva, de modo a garantir que a saída não irá saturar caso uma incidência maior ocorra no sensor. No segundo estágio, a tensão de saída passa por dois resistores que alimentam o amplificador operacional com ganho de 55, onde na entrada positiva, é realizado um filtro dos sinais em alta frequência através de um filtro passa baixas, mantendo somente os sinais abaixo de 1kHz, que retira a

parcela contínua do sinal alimentado na entrada negativa, e amplifica somente a variação de tensão, que é alimentada ao microcontrolador, utilizando um capacitor e um diodo zener como proteção.

Figura 5 - Circuito de amplificação em 2 estágios propostos.

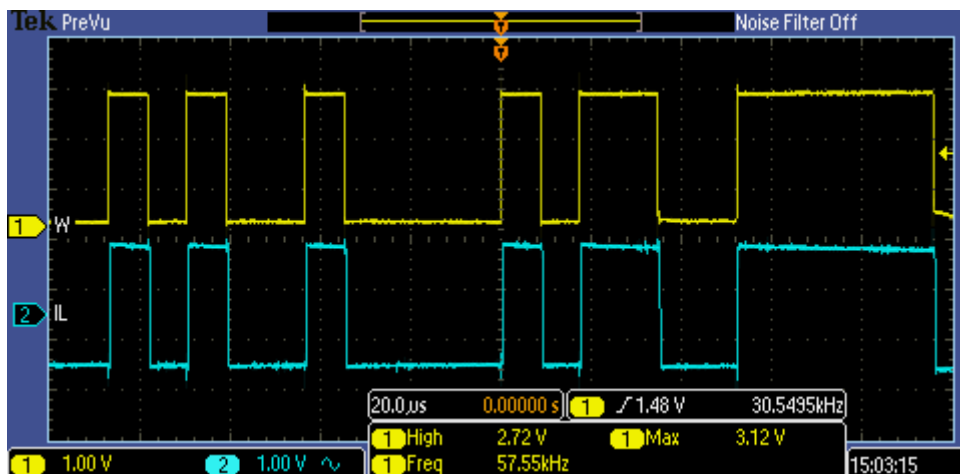


Fonte: Autor.

Com o circuito receptor projetado é realizado os testes em bancada para comprovar seu funcionamento, foi feita a montagem do circuito em uma protoboard, e utilizando um modulador de intensidade luminosa disponível para testes, foi possível aplicar um sinal de comunicação gerado pelo microcontrolador Tiva-C ao Driver LED. Utilizando um osciloscópio foi possível medir a resposta do receptor em comparação com o sinal enviado, é possível ver na figura 6 que o receptor teve uma boa resposta, representada no canal azul, para um sinal de frequência 100 kHz no canal amarelo, com a variação de tensão de saída abaixo do estipulado, mas ainda dentro dos limites aceitáveis para o microcontrolador.

Durante os testes, foi possível notar que os sinais transmitidos implicam diretamente no efeito de cintilação presentes na lâmpada, fazendo com que a luz piscasse em determinados momentos da transmissão, tornando necessário a codificação RLL dos dados.

Figura 6 - Resposta do circuito receptor para um sinal de 100Khz.



Fonte: Autor.

3.4. MONTAGEM DA PLACA DE CIRCUITO DO RECEPTOR

Com o circuito funcionando conforme o esperado foi realizado o projeto de uma placa de circuito impresso utilizando o *software* KICAD, com o circuito receptor realizado para ser instalada na face superior da placa de desenvolvimento contendo o microcontrolador Tiva-C, fornecendo alimentação, recebendo os sinais do circuito amplificador, e enviando dados para uma antena de RF, na faixa de 433MHz, que serve como enlace de Uplink da rede. Além disso foram adicionadas conexões para realizar uma conexão do tipo I2C ou SPI, e uma saída alimentada em um transistor para acionar cargas que requerem uma corrente maior, além de LEDs para sinalização. O layout da placa com os componentes importantes demarcados podem ser vistos na figura 7. O plano de terra foi ocultado para visualização das trilhas.

Figura 7 - Layout do receptor realizado com a face de cobre de cima oculta.

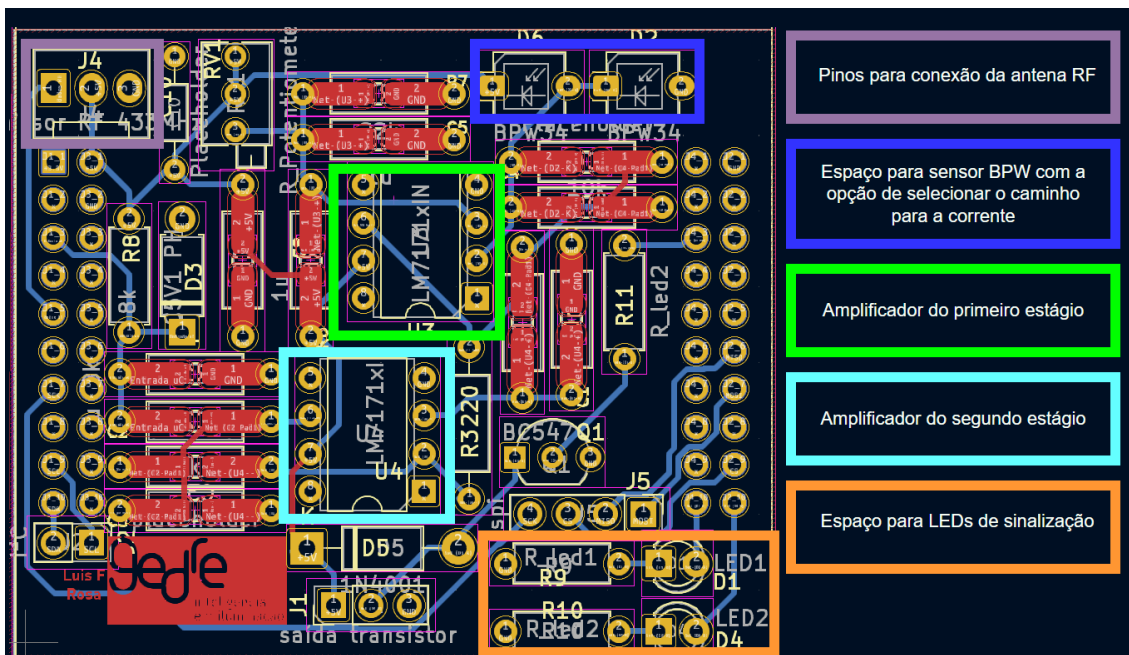
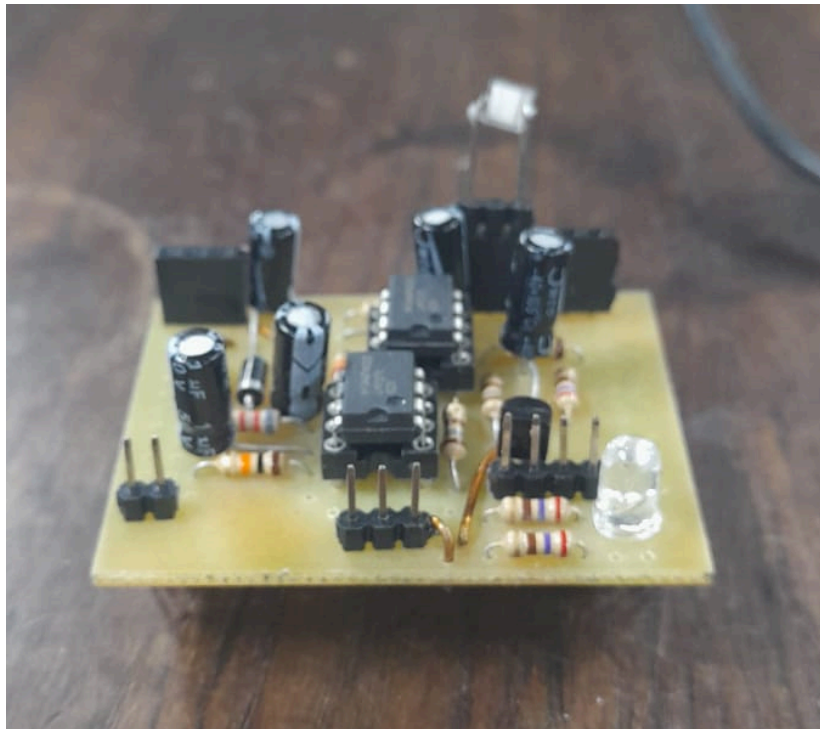


Figura 8 - Placa de circuito utilizada para validação do receptor.



Fonte: Autor.

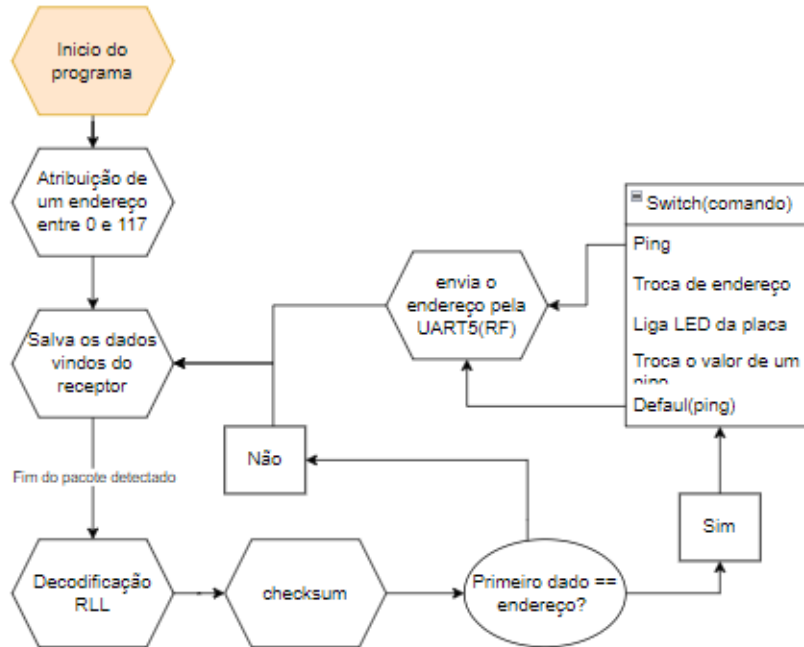
3.5. ELABORAÇÃO DO SOFTWARE

O software do receptor possui uma complexidade baixa, disponibilizando funções para o controle de aplicações simples e para testes quanto ao funcionamento da placa, sendo descrito pelo diagrama na figura 9. Para a implementação dessas funções, após realizar a aquisição de dados, o controlador decodifica os bytes recebidos, e realiza uma checagem quanto a integridade dos bits enviados, e caso o pacote seja endereçado ao dispositivo, o mesmo irá realizar a função requisitada. Os dispositivos da rede atribuem o próprio endereço dentre 117 opções de forma aleatória, que são os espaços de memória salvos para dispositivos ainda não endereçados pelo controlador. Uma versão simplificada do código usado para testes pode ser observada na figura 10.

Para realizar o reconhecimento dos dispositivos ao alcance da comunicação, o controlador de rede faz uma varredura dos endereços 0 a 117, comandando os dispositivos a responder com o endereço utilizado, para que o controlador possa alterar este e conectar o dispositivo à rede. O controlador possui grande parte das funções estabelecidas, enviando dados quando a fila não está cheia, realizando a codificação RLL dos pacotes e utilizando um byte para a checagem de integridade do pacote. Porém dado as restrições de tempo para a

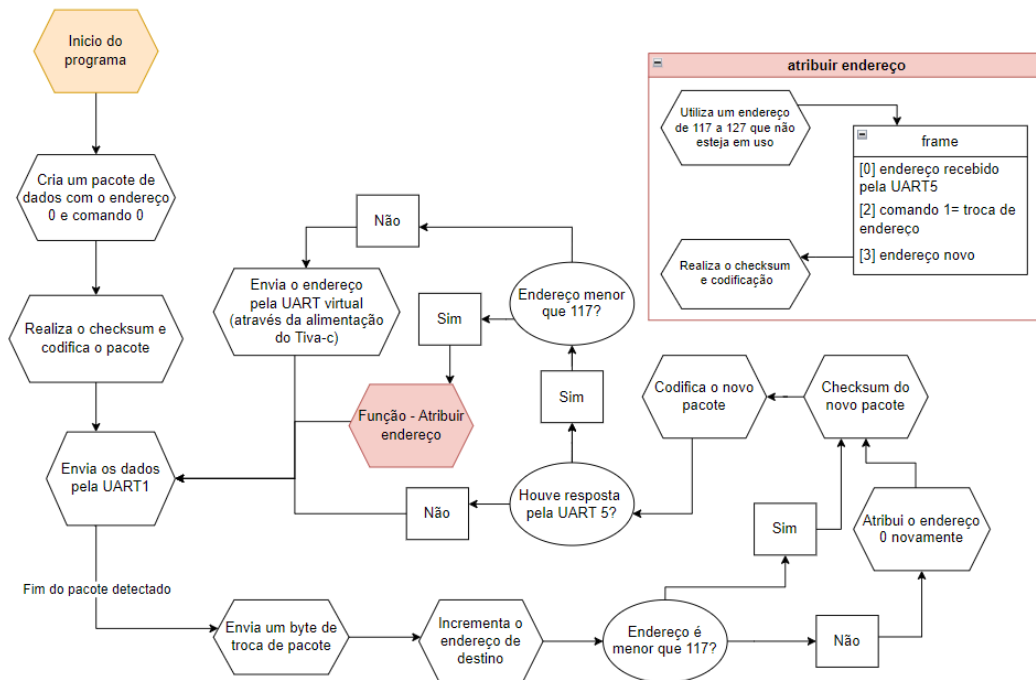
implementação deste trabalho, foram implementadas as funções lógicas de alteração dos pinos de saída, a requisição sobre seu nível lógico, e a alteração de endereços dos dispositivos.

Figura 9 - Diagrama de software do receptor.



Fonte: Autor.

Figura 10 - Diagrama de software do transmissor.



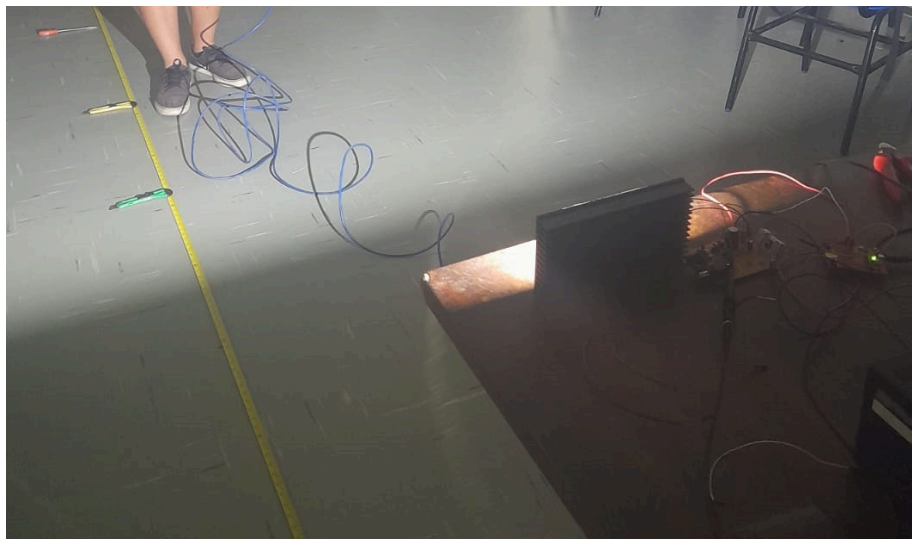
Fonte: Autor.

4. RESULTADOS

4.1. VALIDAÇÃO DO TRANSDUTOR DE LUZ ANALÓGICO

Com a placa de circuito realizada, foi dado início aos testes quanto a recepção de sinal, foi utilizado o mesmo Driver VLC dos testes em bancada, desta vez fixado em cima de uma mesa. Para garantir o funcionamento adequado do receptor conforme o projetado, foi utilizado um luxímetro para realizar a medida da incidência luminosa em diferentes distâncias, realizando a medição da luz gerada somente pelo LED controlado, foi possível demarcar os pontos onde o receptor recebe 200 Lux, a 1,8m de distância, e 100 lux, a 2,1m de distância. A figura 11 mostra uma imagem fotografada no momento da medição, com o arranjo do transmissor em cima da mesa, seguido pelas demarcações das distâncias citadas, demarcadas no chão sobre uma trena.

Figura 11 - foto tirada durante os testes de funcionamento do receptor.



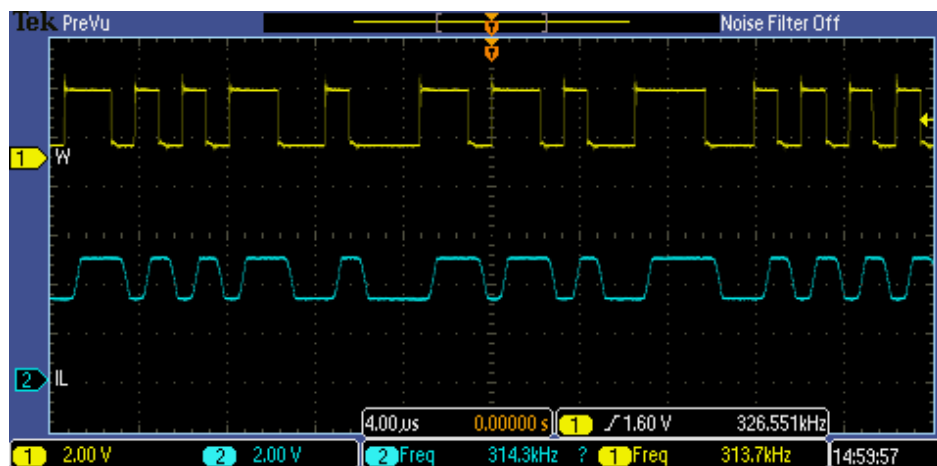
Fonte: Autor.

Para alimentar o Driver, foi utilizado a mesma frequência de 115 kbaud, diferente dos testes realizados em protoboard, os sinais transmitidos passaram pela codificação RLL, foi possível notar que a cintilação da lâmpada diminuiu significativamente, em comparação com os sinais sem a codificação, mas que custou a diminuição dos dados transmitidos. Não foram realizados testes para a comprovação da redução dos efeitos de cintilação luminosa através da luz emitida pelo transmissor, sendo apenas realizado a análise dos componentes harmônicos do sinal transmitido, utilizando um osciloscópio com a função transformada rápida de fourier/(fast fourier transform - FFT). Este teste demonstrou uma redução significativa dos componentes abaixo de 1kHz no sinal codificado, em comparação com o sinal não codificado,

que por sua vez reduziu os efeitos de cintilação visuais apresentados na luz emitida pelo transmissor.

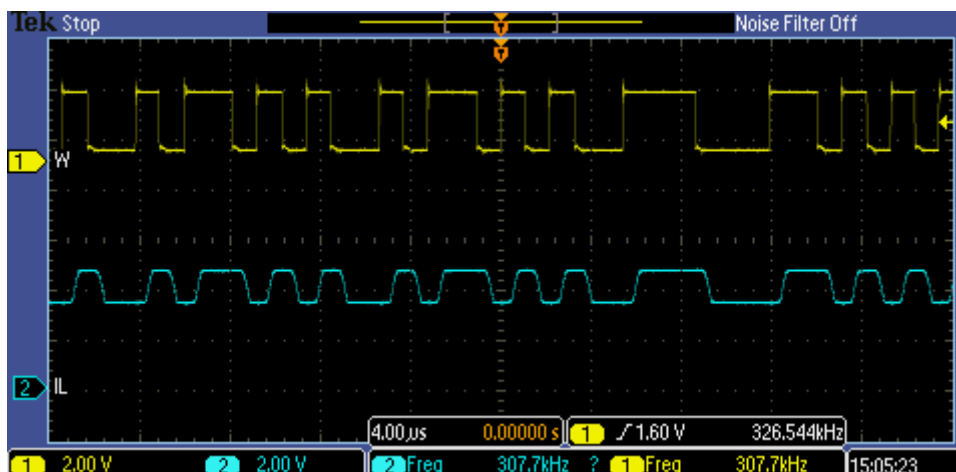
Por causa da redução dos bytes transmitidos através da codificação, a taxa de transmissão dos dados enviados foi aumentada para 921 kbaud, se aproximando mais da frequência projetada mas também dificultando a aquisição do sinal, isso pode ser evidenciado na figura 12. Nesta figura é demonstrado o resultado da aquisição em 200 Lux, é possível observar uma borda de subida e descida maior no sinal recebido em azul, que ocorre tanto por causa da frequência utilizada, quanto pelo instrumento de medição utilizado, o que se torna problemático quando adicionado interferência luminosa por parte das lâmpadas do laboratório, causando uma pequena diminuição da variação do sinal de saída, podendo ser vista na figura 13.

Figura 12 - Aquisição na marca de 200 Lux sem interferência luminosa exterior. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.



Fonte: Autor.

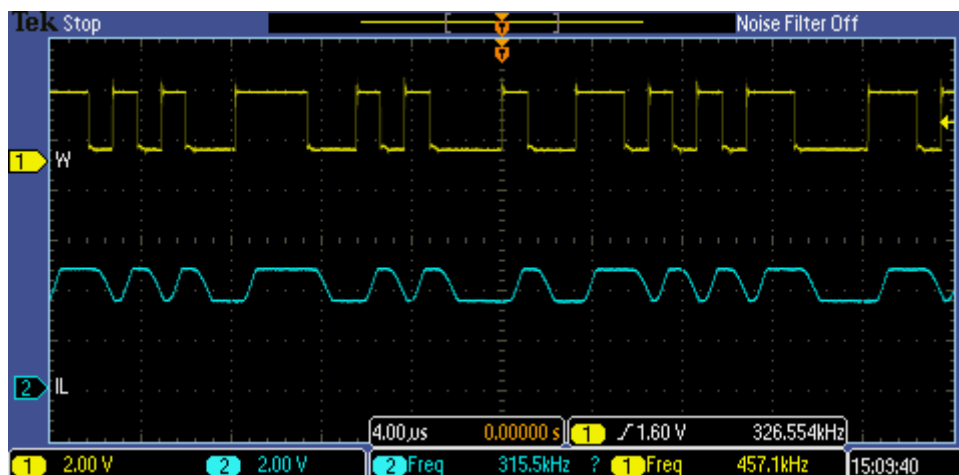
Figura 13 - Aquisição na marca de 200 Lux com interferência luminosa exterior. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.



Fonte: Autor.

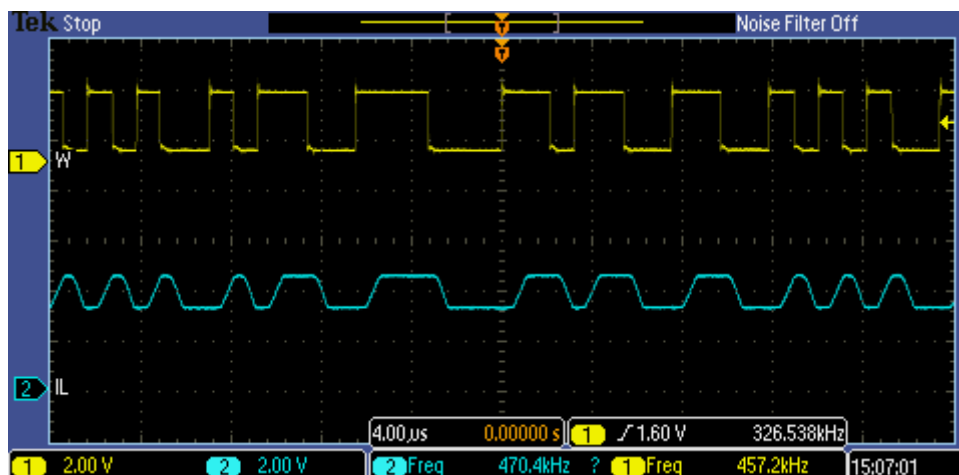
Para os casos em 100 Lux, demonstrados nas figuras 14 e 15, um efeito inesperado foi observado, onde o sinal recebido não era capaz de saturar totalmente a saída em alguns casos, onde a aplicação de uma outra fonte de luz aumentou o período em que o sinal ficava em nível baixo, enquanto no caso sem a fonte de luz externa, o sinal alto ficou com um período maior, com o período de nível baixo reduzido. Acredita-se que isso ocorre devido a diferenciação realizada no segundo estágio, onde o sinal contínuo maior, após ser invertido no primeiro estágio, acaba rebaixando o nível de tensão de saída do segundo estágio.

Figura 14 - Aquisição na marca de 100 Lux sem interferência luminosa exterior. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.



Fonte: Autor.

Figura 15 - Aquisição na marca de 100 Lux com interferência luminosa exterior. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.

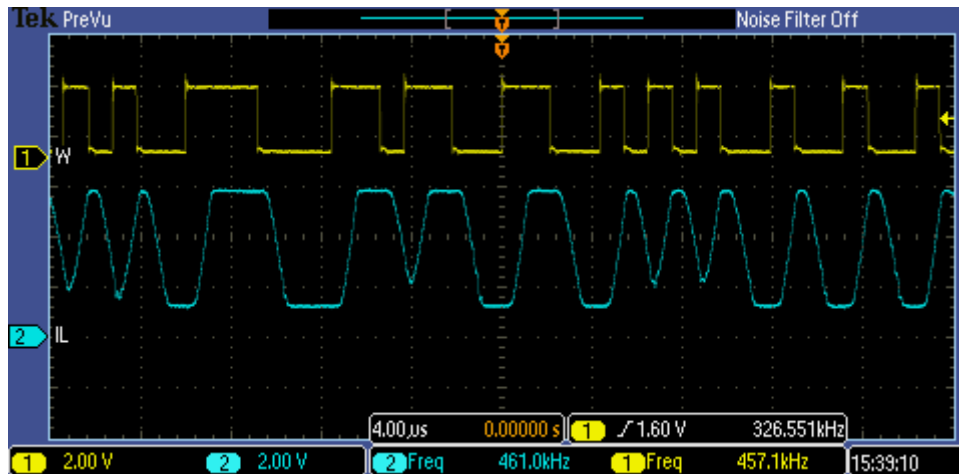


Fonte: Autor.

Por último na figura 16, foi realizado uma busca para o local onde não era possível receber as informações com fidelidade, isso ocorreu a 3m de distância do transmissor, onde os sinais não conseguiam chegar ao nível negativo antes do próximo bit ser enviado, que foi julgado como limite de aplicação. Acredita-se que o aumento da taxa de transmissão seja

diretamente ligada com a distância a ser alcançada pelo receptor, com uma transmissão mais lenta permitindo a saturação do sinal antes do próximo bit ser enviado.

Figura 16 - Aquisição de dados no limite aceitável para comunicação a 3m. Com o sinal transmitido ao driver em amarelo e o sinal recebido em azul.

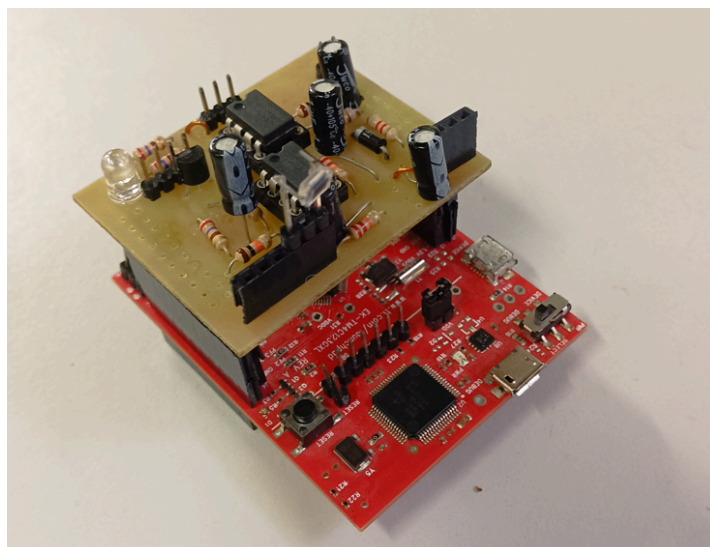


Fonte: Autor.

4.2. VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO COMPLETA DO RECEPTOR

Como um último teste foi realizada a conexão do receptor projetado ao microcontrolador, assim como na figura 17. O microcontrolador realizou tanto a decodificação dos sinais recebidos, quanto a checagem do endereço transmitido, realizando a troca do estado do LED integrado quando seu endereço fosse recebido, o que garante que o microcontrolador só irá agir quando não houver dúvidas que o enlace de comunicação foi efetivo.

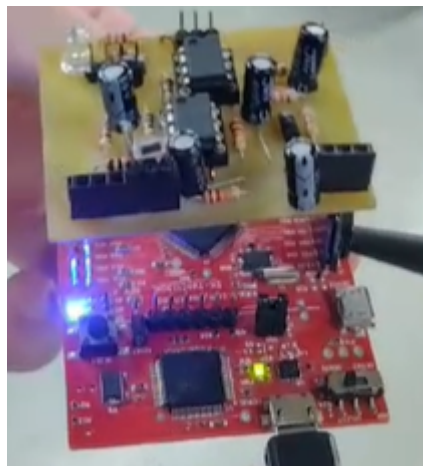
Figura 17 - Imagem do receptor fabricado montado sobre o microcontrolador Tiva-C.



Fonte: Autor.

Foi possível observar que arranjo recebe os sinais enviados pela lâmpada de maneira satisfatória, conectando a rede de forma rápida, uma vez que o sensor era exposto a variação luminosa, rapidamente o estado do LED da placa era alternado, conseguindo receber os pacotes com clareza tanto a 1,8m, quanto a 2,1m funcionando conforme o projetado. Após o marco de 2,1m o receptor começou a gradualmente perder a capacidade de adquirir os dados, diminuindo drasticamente a velocidade de comutação do LED integrado, sendo o limite em 4m, onde nenhuma troca de estado ocorreu. Na figura 18 pode ser visto o arranjo durante os testes realizados, onde o estado do LED encontra-se ligado.

Figura 18 - Imagem do arranjo do receptor durante os testes de conexão.



Fonte: Autor.

5. CONCLUSÃO

A aplicação da comunicação através do canal luminoso se provou promissora, o controlador provou capaz de evitar a cintilação luminosa através da codificação dos dados enviados, enquanto realizava a comunicação para múltiplos dispositivos. Através do receptor proposto foi possível adquirir os dados transmitidos com clareza até 2,1m. Com o microcontrolador recebendo os pacotes e realizando a decodificação RLL, agindo sobre os pacotes que eram endereçados a ele, permitindo a aplicação da topologia como uma alternativa aos meios de comunicação sem fio atualmente disponíveis.

A aplicação foi efetiva dentro o cenário proposto, sendo capaz de adquirir os dados em casos com uma incidência luminosa de 200 lux, com uma pequena margem para aumentar as frequências de transmissão utilizadas. além disso, o receptor se comportou razoavelmente bem a distâncias superiores a 2m, que garante o funcionamento do enlace de comunicação no cenário proposto de uma iluminação de teto.

Devido a problemas quanto a implementação do receptor e do software de controle da rede, não foi possível desenvolver aplicações variadas com os receptores desenvolvidos, porém, quanto ao que foi alcançado, é notável que a aplicação de comunicação por luz visível e viável para os ambientes internos, se comunicando de forma rápida com os dispositivos integrantes da rede, enquanto possibilita a utilização dos demais meios de comunicação.

REFERÊNCIAS

O'Brien, D. C. (2011). **Visible Light Communications: Challenges and potential.** *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, PHO 2011, v. 3, p. 365–366, 2011. ISSN 1092-8081.

S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, “**IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support,**” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, 2012.

S. Berman et al., “**Human Electroretinogram Responses to Video Displays, Fluorescent Lighting and Other High Frequency Sources,**” *Optometry and Vision Science*, vol. 68, 1991, pp. 645–62.