

Comunicação por luz visível: Construindo um protótipo usando SBC e explorando o potencial da tecnologia VLC

Hugo Oliveira Soares *

Marden Cicarelli Pinheiro†

Ricardo Luiz de Freitas‡

2023

Resumo

O Visible Light Communication (VLC) é uma tecnologia que utiliza o espectro da luz visível para a transmissão de dados. Com o aumento da popularidade da internet e do uso de dispositivos IoT, a demanda por redes wifi tem crescido exponencialmente, causando congestão nas faixas de espectro eletromagnético destinadas a essas redes. O VLC surge como uma solução promissora para este problema, aproveitando as diversas faixas de frequência disponíveis na luz visível. Além disso, o VLC evita interferências eletromagnéticas em dispositivos eletrônicos e

*Graduando em Ciência da Computação, Escola Superior Dom Helder, e01381@academico.domhelder.edu.br

†Mestre em Tecnologia da informação(CEFET), docente do curso Ciência da Computação, Escola Superior Dom Helder Câmara, marden.cicarelli@academico.domhelder.edu.br

‡Mestre em Administração (FUMEC), docente do curso de Ciência da Computação, Escola Superior Dom Helder, ricardo.freitas@academico.domhelder.edu.br

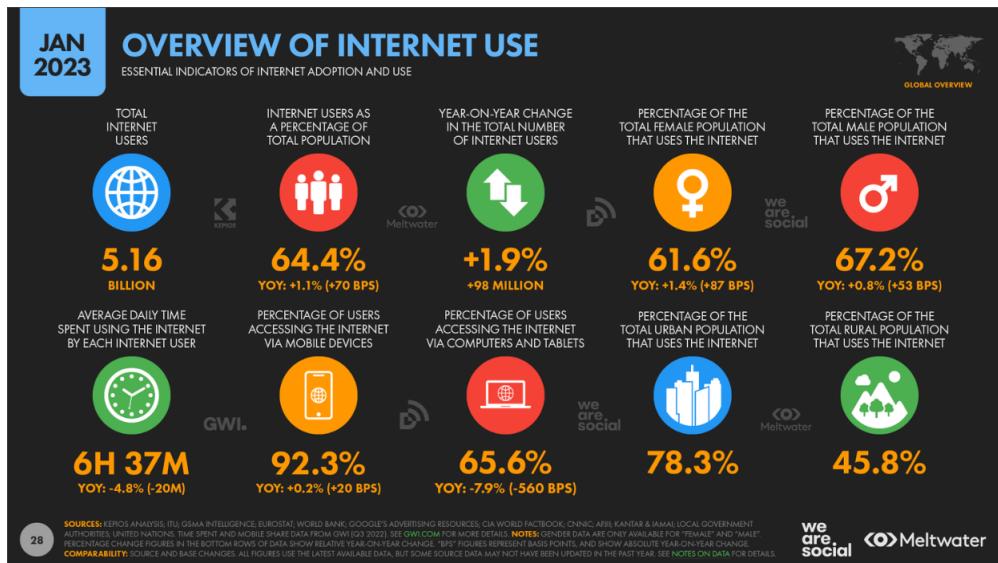
redes wifi. O estudo demonstrou a viabilidade da implementação do sistema VLC com a Single Board Computer (SBC) OrangePi, tendo como resultado um protótipo bem sucedido em realizar uma transmissão de dados.

Palavras-chave: VLC. SBC. OpenVLC. RaspberryPi. OrangePi

1 Introdução

Com o aumento da popularidade da internet em todo o mundo, é notável que as redes *wifi* têm crescido significativamente, juntamente com o número de usuários e de dispositivos IoT (*Internet Of Things*) (MATHEUS et al., 2017). De acordo com o relatório Digital 2023: Global Overview Report (KEMP, 2023), publicado pelo site Data-reportal, há cerca de 5,16 bilhões de usuários na internet. No entanto, esse aumento na demanda por *wifi* tem causado um problema, que é a congestão das faixas do espectro eletromagnético reservadas para essas redes, assim afetando a sua eficiência.

Figura 1 – Indicadores de uso da Internet



Fonte: Kemp (2023)

As redes *wireless* utilizam ondas eletromagnéticas para a transmissão de dados e informações, o que inviabiliza ou dificulta a sua utilização em alguns lugares, como em hospitais e aeronaves, por exemplo, por interferir com equipamentos hospitalares e com a antena de transmissão no caso dos voos.

Diante desses cenários, o *Visible Light Communication* (VLC) se mostra como um forte candidato para a solução destes problemas. Verifica-se que o espectro da luz visível, possui 10 mil vezes mais faixas de frequência se comparado com as ondas de rádio (CONCEIÇÃO, 2015, p. 14). Ou seja, é possível que um único “roteador” se comunique com mais dispositivos ao mesmo tempo.

Para o problema de interferência o VLC também é uma solução, visto que utiliza a luz visível como forma de transmitir as informações, assim não gerando interferências eletromagnéticas em outros aparelhos eletrônicos ou em redes *wifi*.

O estudo objetiva verificar a viabilidade de implementação do sistema VLC com um *SBC* (*Single Board Computer*), através da construção de um protótipo. A pesquisa experimental surgiu da necessidade de uma nova forma de transmissão de dados com pouca interferência e de baixo custo, abrindo uma possibilidade de levar comunicação em locais onde não era possível recorrer a uma rede *wireless*.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

O propósito desta pesquisa é a construção de um protótipo de um sistema de comunicação VLC, baseado no projeto *OpenVLC*, utilizando exemplares de SBC. O objetivo principal é que o sistema seja capaz de transmitir e receber um pequeno pacote de dados.

2.2 Objetivos específicos

- Explicar o que é VLC
 - Explicar o funcionamento
 - Analisar as vantagens, desvantagens e as aplicações.
- Implementar um protótipo
- Avaliar o desempenho do protótipo
 - Comparar o desempenho entre as SBCs selecionadas

3 Justificativa

Segundo o autor Tanenbaum (2011) o comitê do IEEE definiu que as redes no padrão 802.11, *wifi*, utilizariam as frequências de 2,4GHz e 5GHz e que todos os dispositivos têm a permissão para utilizá-los desde que limitem a sua potência para permitir que dispositivos diferentes coexistam. O autor Barros (2014) também cita que há muitos outros equipamentos eletrônicos que geram ondas também na faixa de 2,4GHz.

Devido a faixa de 2,4GHz ser internacionalmente regulamentada ela não necessita de licença para a sua utilização e com a popularidade das redes sem fio a faixa tem concentrado grande parte da demanda por frequência. Assim o seu compartilhamento tem se tornado bastante denso fazendo com que os receptores lidem constantemente com interferências (BARROS, 2014). Segundo Genachowski (2013) o problema do congestionamento do espectro é crescente e está cada vez mais comum nas residências.

Outro problema enfrentado pelas redes sem fio é a interferência eletromagnética gerada por dispositivos elétricos que pode afetar o funcionamento da comunicação e vice-versa, como por exemplo um forno de microondas. Esses aparelhos operam na faixa de 2,45GHz, assim provocando um aumento nas taxas de erro nos dados que trafegam nas redes (BARROS, 2014). Já no caso contrário as redes móveis podem provocar alterações no funcionamento de dispositivos hospitalares e colocar em risco a vida dos pacientes (CABRAL, 2001).

A construção de um protótipo de um sistema VLC se dá pelo seu grande potencial de solucionar os problemas citados acima. Como o VLC utiliza uma faixa de comprimento de onda que vai de cerca de 380nm até 780nm, permite que a tecnologia ofereça uma faixa de frequências cerca de 10 mil vezes maior do que a radiofrequência, permitindo que mais dispositivos se conectem no mesmo ponto de acesso assim solucionando o problema do congestionamento do espectro (CONCEIÇÃO, 2015).

Como a luz visível não interfere em equipamentos eletrônicos, o VLC tem a possibilidade de operar em locais onde a RF não é desejada, como por exemplo em hospitais, evitando o mau funcionamento dos dispositivos (MATHEUS et al., 2017).

4 Referencial teórico

Este capítulo apresenta os temas necessários para o desenvolvimento desse estudo e que devem ser tratados mais profundamente já que afetam diretamente o foco principal do trabalho. Este capítulo foi estruturado em 4 tópicos, a saber: informações sobre o padrão 802.11 e as faixas utilizadas por ele, interferência de ondas, a tecnologia VLC e o projeto *OpenVLC*.

4.1 Padrão IEEE 802.11

Quando os computadores receberam transmissores e receptores de rádio várias empresas começaram a comercializar LANs sem fios, porém não havia uma padronização para a comunicação, ou seja, um computador equipado com um rádio da marca X não era compatível com o computador equipado com o rádio da marca Y. Diante deste problema surgiu a necessidade de se criar um padrão para as LANs sem fios, assim o comitê do IEEE criou o padrão 802.11 mais conhecido como *wifi* (TANENBAUM, 2011).

4.1.1 Faixas 2.4Ghz e 5Ghz

As faixas de rádio que o *wifi* utiliza são as faixas de 2,4GHz e 5GHz, as duas bandas não necessitam de licença para a sua utilização contudo os aparelhos devem limitar a sua potência para permitir que diferentes dispositivos coexistam. Como a utilização da faixa é livre é muito provável que os equipamentos de *wifi* tenham que lidar constantemente com interferências (TANENBAUM, 2011).

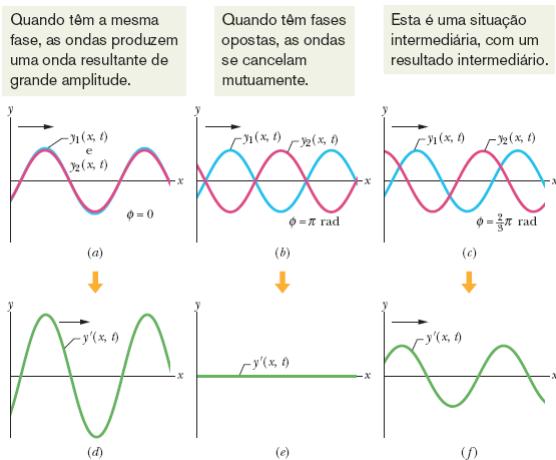
4.2 Interferência de Ondas

Se duas ondas senoidais de mesmo comprimento de onda são propagadas em uma corda no mesmo sentido mas estão defasadas, ou seja, os picos estão alinhados com os vales da outra, elas se cancelam mutuamente e o deslocamento é zero. Este fenômeno é chamado de interferência (HALLIDAY et al., 2016a).

4.3 Visible Light Communication (VLC)

Nesta seção será apresentado o que é o VLC e conceitos relacionados ao tema, como a aplicações, vantagens e desvantagens e as formas de se modular a informação

Figura 2 – Demonstração das ondas resultantes



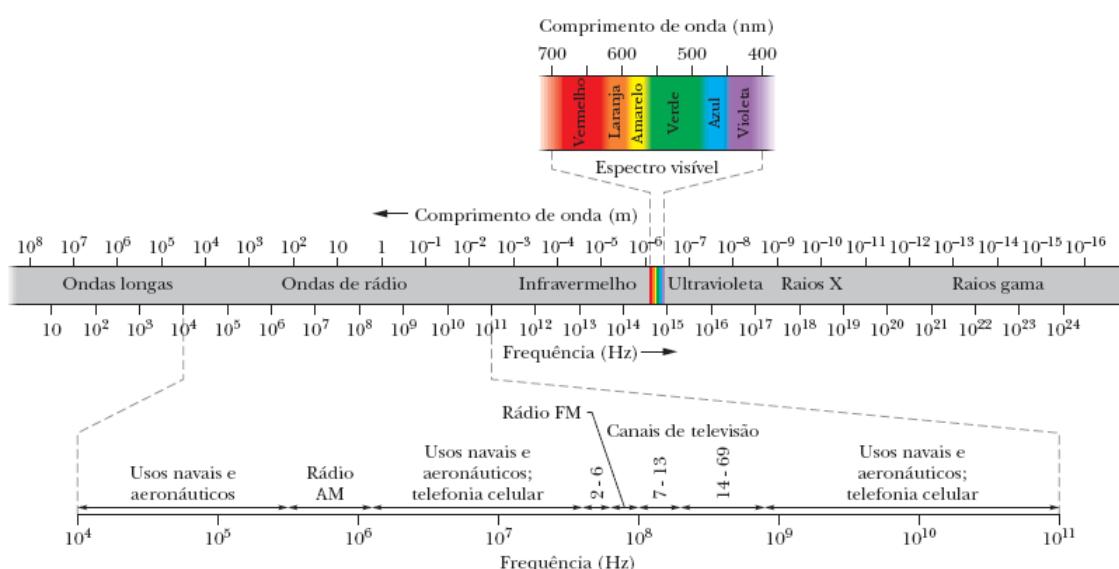
Fonte: Halliday et al. (2016a)

para que seja possível existir uma comunicação.

4.3.1 O que é o VLC?

Sistemas VLC são caracterizados por se comunicar utilizando a luz visível para modular as informações, ou seja, são utilizadas ondas que estão na faixa de 390nm a 700nm. Embora a luz visível seja usada para comunicação, o objetivo é que a transmissão seja imperceptível para o usuário, de modo que se assemelhe apenas a iluminação comum de uma lâmpada (MATHEUS et al., 2017).

Figura 3 – O espectro eletromagnético



Fonte: Halliday et al. (2016b)

4.3.2 Aplicações

A tecnologia do VLC pode ser utilizada de diversas formas como redes sem fio domésticas, pode ser utilizado para serviços de localização interna, já que o sinal de GPS não atravessa paredes. Também pode ser utilizado em locais onde ondas de rádio não são muito desejáveis como cabines de avião e em hospitais (MATHEUS et al., 2017).

4.3.3 Vantagens

Dentre as diversas vantagens do VLC está o baixo consumo de energia, já que utiliza lâmpadas de leds que consomem pouca energia, reduzindo em ate 75% o consumo se comparado com outras lâmpadas. Outra vantagem proporcionada pelo uso de leds é a redução de custo já que são mais baratos e altamente duráveis, não necessitando de trocas frequentes (MATHEUS et al., 2017).

Também nota-se vantagem em relação à segurança: como a luz não atravessa meios opacos, a interceptação do sinal por um invasor fica dificultada, uma vez que demandaria a presença física no mesmo local (CONCEIÇÃO, 2015).

4.3.4 Desvantagens

Mesmo que a tecnologia VLC seja inovadora e que apresenta vantagens também existem algumas desvantagens, Matheus et al. e Conceição citam algumas:

- Pequeno alcance.
- Sujeito a interrupções devido a algum objeto que esta na frente do receptor.
- O desempenho pode ser prejudicado se houver fontes diversas de luz no mesmo ambiente, gerando interferência.

4.4 Modulação

4.4.1 *On-Off Keying (OOK)*

Esta forma de modulação transmite os bits acendendo e apagando a lâmpada, mas também é possível somente reduzir a intensidade da luz para representar o bit 0, já que no caso de se houver a transmissão de um byte 100001, por exemplo, a

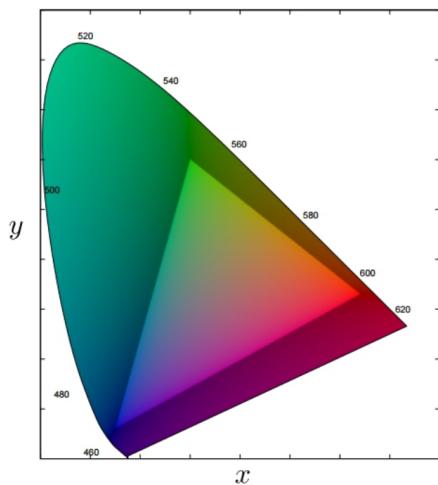
lâmpada ficaria desligada por muito tempo, assim afetando a percepção do usuário (MATHEUS et al., 2017).

4.4.2 *Color Shift Keying* (CSK)

O sinal é modulado através da intensidade de 3 cores, sendo elas vermelho, verde e azul, essas três cores juntas geram a luz branca. Como cita Matheus et al. (2017) a modulação OOK possui taxas de envio muito baixas por isso esta modulação foi proposta especificamente para o VLC.

A modulação é feita relacionando cada bit a uma cor das coordenadas CIE 1931, Abraham explica que é um sistema de correspondência de cores que permite especificar numericamente uma cor com o objetivo de reproduzi-la com precisão. Existem 7 bandas de comprimento que podem ser selecionadas para determinar as vértices de um triângulo no qual os pontos da constelação dos símbolos CSK estão. Cada ponto selecionado determina a intensidade da cor no led RGB (MATHEUS et al., 2017).

Figura 4 – Diagrama de cromaticidade CIE 1931



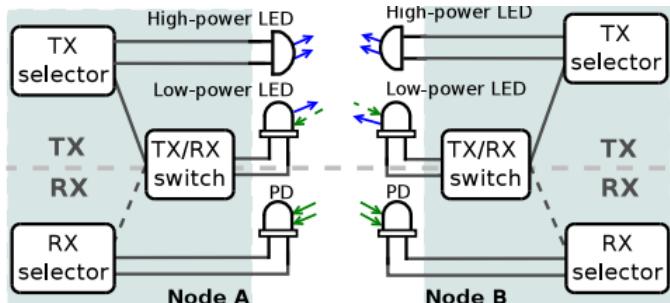
Fonte: Monteiro e Hranilovic (2014 apud MATHEUS et al., 2017)

4.5 OpenVLC

O OpenVLC é uma plataforma *open source* baseada em Linux e na plataforma Beagle Bone Black (BBB), projetada para ser de baixo custo e é utilizada em pesquisas de redes VLC. O projeto consiste em um *hardware* para a transmissão e recepção e

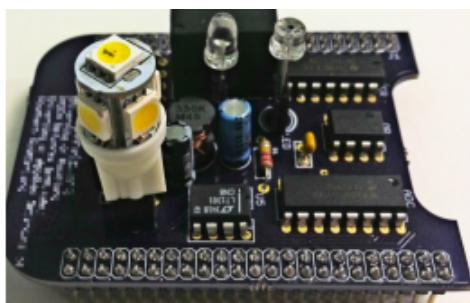
sua implementação de *software* atua na camada de enlace (WANG et al., 2015).

Figura 5 – Diagrama do hardware do OpenVLC



Fonte: Wang et al. (2015)

Figura 6 – Foto do hardware do OpenVLC

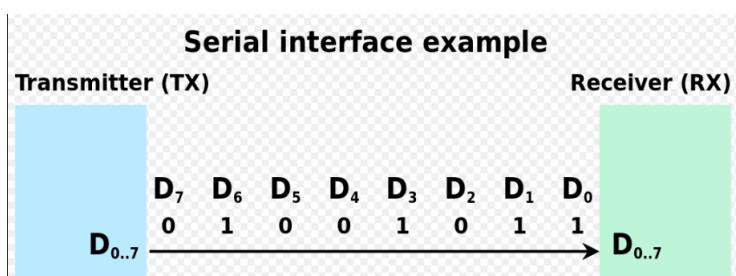


Fonte: Wang et al. (2015)

4.6 Comunicação Serial

É o processo de enviar dados bit a bit de forma sequencial em um único canal ou barramento. Geralmente usadas em comunicação de longo alcance, onde o custo de cabos pode ser muito alto (SERIAL COMMUNICATION, 2023).

Figura 7 – Comunicação Serial

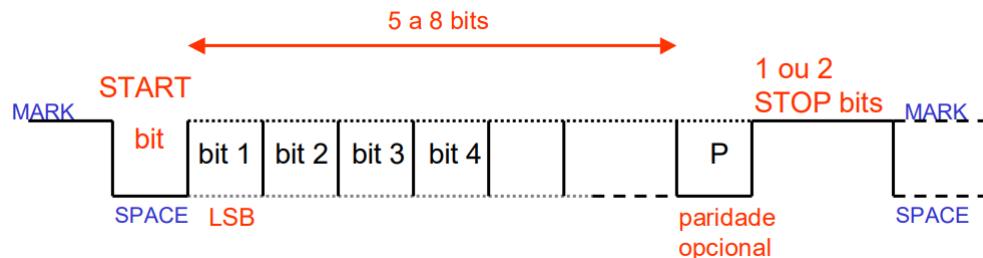


Fonte: Serial communication (2023)

4.6.1 Comunicação *Start-Stop*

É um protocolo para comunicação serial de forma assíncrona, onde a sincronização é obtida por bits de *START* e *STOP*, que indicam o início e o fim da transmissão respectivamente (ROISENBERG, 2004)

Figura 8 – Comunicação Serial

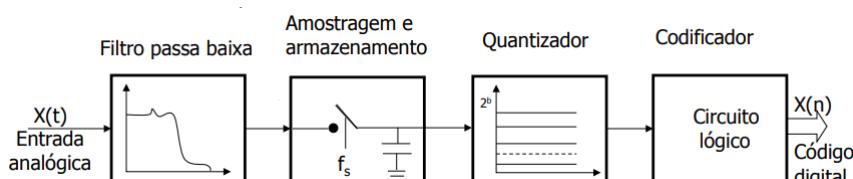


Fonte: Roisenberg (2004)

4.6.2 Conversor digital-analógico

Com frequência, é necessário converter sinais processados digitalmente para uma forma analógica e vice versa também. Para isso é possível utilizar um circuito chamado de conversor digital-analógico (ADC), que aceita como entrada um sinal analógico e o transforma em um sinal discreto.

Figura 9 – Processo de conversão AD



Fonte: Adaptado de Lima (2020)

5 Metodologia

Segundo Wiltgen (2019), um protótipo é uma representação similar ao produto a ser desenvolvido, criado com o intuito de realizar testes e ensaios para que as funcionalidades se comportem como esperado no ambiente de uso. Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho é implementar um protótipo de um sistema VLC utilizando um SBC como plataforma de desenvolvimento. Durante o desenvolvimento foram utilizados elementos de metodologias ágeis como os do *Scrum* e do *Kanban*.

O *Scrum* é uma estrutura que define diversos eventos como as *sprints* que são ciclos de desenvolvimento com um tempo definido, geralmente de duas semanas, e a retrospectiva que é o momento em que a equipe discute o que foi bom ou ruim no ciclo (*sprint*) que se passou. O *Scrum* também define os membros da equipe e suas responsabilidades, como o PO, o *Scrum Master* e a equipe de desenvolvimento (DRUMOND, 2022).

O *Kanban* é uma estrutura que permite a visualização dos itens de trabalho que são organizados em um quadro que é dividido em *To Do*, *In Progress* e *Done* (RADIGAN, 2022).

Para a avaliação do desempenho das SBCs selecionadas foram coletadas as informações de uso do processador, o uso de memória RAM e também a taxa de erros durante a transmissão de um pacote de dados.

5.1 Single Board Computer (SBC)

Single Board Computer (SBC) é um computador onde todos os componentes necessários estão em uma mesma placa de circuito impresso. Esse tipo de dispositivo é muito utilizado para fins educacionais, para desenvolvimento de sistemas, datacenters (centros de processamento de dados) e clusters portáteis. Alguns exemplos são o *OrangePI*, *RockPI*, *BeagleBone* e *RaspberryPI*, sendo este um dos mais populares (NETO et al., 2021).

Os SBCs geralmente são de baixo custo, porém devido a escassez global de semicondutores reduziu a sua disponibilidade e por consequência levou ao aumento dos preços (ZENG, 2022). Principalmente do *RaspberryPI* que passou de 45 dólares para 161 dólares, por esse motivo o SBC *OrangePI* foi selecionado para o desenvolvimento

deste trabalho.

5.1.1 *RaspberryPI*

A *Raspberry Pi Foundation* foi fundada em 2008 sediada no Reino Unido com o objetivo de promover o avanço na educação no campo da computação. (*RASPBERRYPI*, 2018)

O *RaspberryPI* é um pequeno computador que traz consigo um processador na arquitetura ARM, a mesma tecnologia que se encontra em num smartphone (*RASPBERRYPI*, 2018).

Figura 10 – Raspberry Pi 3



Fonte: *RaspberryPi* (2018)

5.1.2 *OrangePI*

O *OrangePI* é um SBC *open source* da Shenzhen Xunlong Software. A arquitetura de seu processador é ARM e a plataforma suporta vários sistemas operacionais como Android e as várias distribuições de linux (*ORANGE*, 2023).

Figura 11 – Orange Pi 3 LTS



Fonte: Orange (2023)

5.1.3 BeagleBone Black

BeagleBone Black é uma plataforma suportada pela comunidade que roda Linux para prototipagem rápida (BEAGLEBOARD, 2023). Esta plataforma é utilizada pelo projeto OpenVLC.

Figura 12 – BeagleBone Black



Fonte: Beagleboard (2023)

5.2 Linux

Linux é um sistema operacional de computadores, o autor Negus (2014) cita em seu livro Linux a Bíblia que este sistema é um exemplo de como projetos colaborativos podem ultrapassar o que empresas individuais podem fazer.

O Linux permite que os desenvolvedores alterem o sistema como quiserem ajudando a criar softwares para as suas necessidades, por esse motivo utilizaremos este sistema no desenvolvimento do trabalho.

6 Resultados esperados

É esperado deste trabalho que contribua no entendimento dos processos para a realização dos objetivos declarados no capítulo 2, além de auxiliar a compreender mais sobre a tecnologia VLC e o que ela pode trazer de benefícios para a sociedade.

Que as informações deste trabalho possam ser úteis e que ao mesmo tempo incentive outros pesquisadores a desenvolverem projetos sobre o tema, já que foi utilizado uma SBC mais acessível para o cenário brasileiro.

7 Protótipo

Este capítulo detalha o funcionamento do protótipo desenvolvido durante a pesquisa, mostrando os passos seguidos para alcançar os objetivos propostos. Além disso, são abordadas as dificuldades enfrentadas e as adaptações e refinamentos realizados ao longo do percurso.

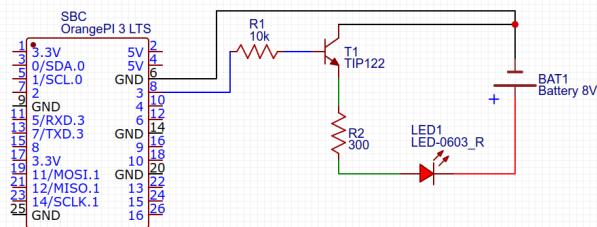
7.1 Circuito

7.1.1 Emissor

O circuito que permite “transformar” os bits em luz é composto por um led de alto brilho, um transistor TIP122, dois resistores e uma bateria.

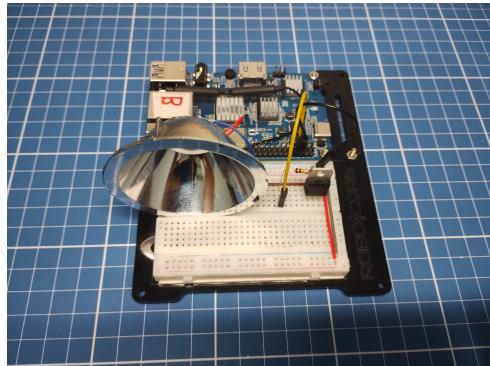
O transistor é ligado como chave na SBC para permitir acionar cargas elétricas da qual a SBC não seria capaz, pois pode fornecer no máximo 16 mA (miliampère) Milton (2018) e como o led de alto brilho consome uma corrente de 18.8mA, uma ligação direta na *General Purpose Input/Output* (GPIO) poderia queimar a SBC.

Figura 13 – Esquema do circuito emissor



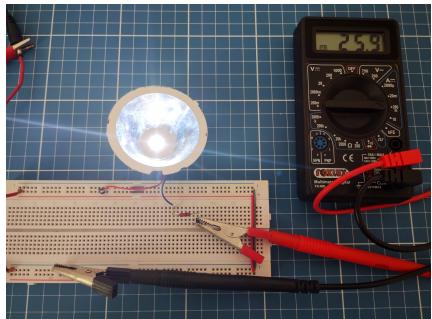
Fonte: Autor (2023)

Figura 14 – Foto do circuito emissor



Fonte: Autor (2023)

Figura 15 – Consumo do led usado no circuito emissor



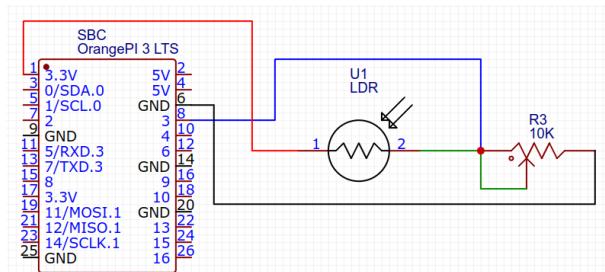
Fonte: Autor (2023)

7.1.2 Receptor

O circuito para receber as informações do emissor é composto por um *Light Dependent Resistor* (LDR) e um potenciômetro ligado em série. Este circuito permite estabelecer uma faixa de corte de acordo com o nível de luminosidade do ambiente.

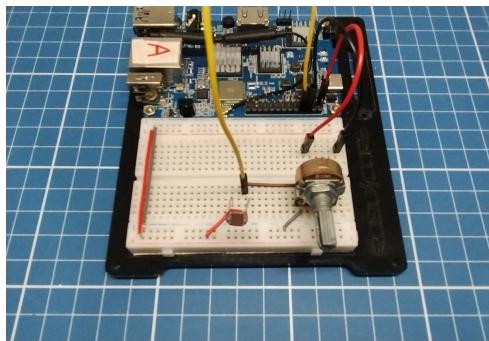
Estabelecido a faixa de corte ajustando o potenciômetro é possível “perceber” quando se está em nível lógico alto (bit 1) ou em nível lógico baixo (bit 0). O motivo para a montagem deste circuito é o fato da SBC não possuir um conversor analógico-digital (ADC), impossibilitando a leitura de valores analogicos e assim estabelecer a faixa de corte.

Figura 16 – Esquema do circuito receptor



Fonte: Autor (2023)

Figura 17 – Foto do circuito receptor



Fonte: Autor (2023)

7.2 Software

O código foi implementado nas SBCs usando a biblioteca *wiringPi* e *wiringOP*, que é um *fork* da *wiringPi* para a *OrangePi*. O *software* implementa um protocolo de comunicação chamado de *start-stop*, que consiste em uma forma de sinalizar o início e o fim de uma transmissão de dados. No início, é enviado um byte de "start" indicando o início da transmissão seguido dos dados e por fim um byte de "stop" indicando o fim.

O emissor transmite a mensagem "Hello" o que resulta em um pequeno pacote de 5 bytes. Para transmitir a mensagem é convertida em binário, seguindo a tabela ASCII, para depois ser passada para a função responsável por modular a mensagem. O método de modulação utilizada foi a *On-Off Keying* (subseção 4.4.1)

Figura 18 – Função responsável por converter a mensagem em binário

```
bool *convert(int n) {
    // [0] bit mais significativo
    // [7] bit menos significativo
    static bool bin[8] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};

    int rem = 0;

    for (int y = 7; y >= 0; y--) {
        rem = n % 2;

        n /= 2;

        bin[y] = rem;
    }

    return bin;
}
```

Fonte: Autor (2023)

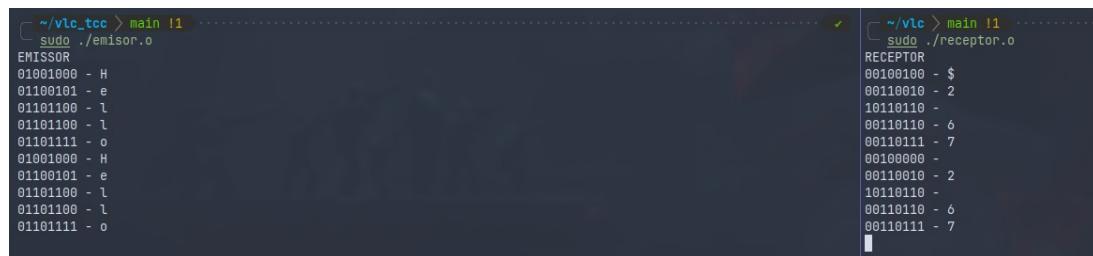
8 Resultados

No presente capítulo, são apresentados os resultados obtidos, a partir da observação do funcionamento do protótipo construído. Serão apresentados imagens demonstrando o funcionamento e além disso serão destacados os desafios enfrentados durante o processo e as estratégias adotadas para mitigá-los.

8.1 Resultados

Ao implementar o protocolo *start-stop* o primeiro resultado obtido foram caracteres recebidos diferentes do enviado. A causa do erro foi o tempo de leitura do receptor que ao ler o código de start, que é representado pelo byte 11111110, o último bit estava sendo considerado como parte da mensagem.

Figura 19 – As informações mostradas pelo emissor e receptor não correspondem



The figure shows two terminal windows side-by-side. The left window, titled 'EMISOR', displays the following bytes: 01001000 - H, 01100101 - e, 01101100 - l, 01101100 - l, 01101111 - o, 01001000 - H, 01100101 - e, 01101100 - l, 01101100 - l, 01101111 - o. The right window, titled 'RECEPTOR', displays the following bytes: 00100100 - \$, 00110010 - 2, 10110110 - , 00110110 - 6, 00110111 - 7, 00100000 - , 00110010 - 2, 10110110 - , 00110110 - 6, 00110111 - 7. The bytes are listed in pairs, with the first byte from the sender followed by the second byte from the receiver.

Fonte: Autor (2023)

Figura 20 – Comparaçāo entre os bytes enviados e recebidos

Emissor 010010001000101010011000100110001001111
Receptor 0010010000110010101101100011011000110111

Fonte: Autor (2023)

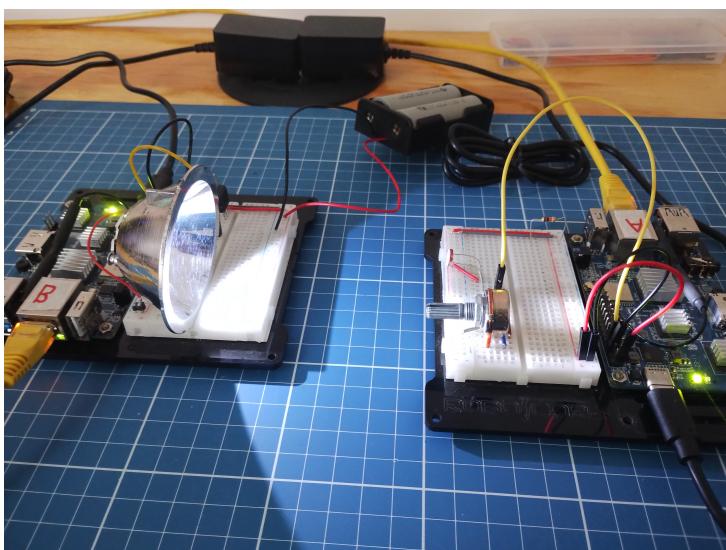
Após a correção do problema de temporização, os cinco bytes são enviados sem erros. A taxa de transmissão atingida foi de 10 bits por segundo. Não foi viável aumentar a taxa devido às limitações da *Single Board Computer* (SBC), que não suporta leituras mais rápidas, e também devido ao tempo de resposta desfavorável do circuito com o Idr.

Figura 21 – Transmissão correta da mensagem

```
~/vlc_tcc > main | tail -n 1
sudo ./emisor.o
EMISOR
01001000 - H
01100101 - e
01100100 - l
01100100 - l
01100111 - o
Hello
INT x < 4s
~/vlc > main ...
RECEPTOR
01001000 - H
01100101 - e
01100100 - l
01100100 - l
01100111 - o
Hello
```

Fonte: Autor (2023)

Figura 22 – Foto do protótipo funcionando



Fonte: Autor (2023)

8.2 Dificuldades

Durante o desenvolvimento do protótipo encontrou-se diversos pontos de dificuldade. Dentre eles está o fato do projeto da SBC *OrangePi* não ser muito maduro, resultando em pouca documentação para a biblioteca *wiringOP*, responsável por manipular as GPIOs.

Outro ponto é o fato da SCB não possuir um conversor analógico-digital (ADC), sendo necessário montar um circuito para isso. A solução utilizada foi uma muito simples, um potenciômetro ligado em série com um Ldr, mas permite estabelecer uma faixa de corte e a leitura de se está claro ou escuro, ou em outras palavras se é 1 ou 0.

9 Conclusão

O objetivo desta pesquisa centrava-se em construir um protótipo de um sistema que se comunica usando a tecnologia do VLC, ou seja, permite que dois dispositivos se comuniquem usando a luz visível. Como o VLC opera no espectro da luz visível ele não interfere em equipamentos eletrônicos e também não é afetado por eles, podendo ser utilizado em locais onde ondas de rádio não são a melhor solução (MATHEUS et al., 2017).

Com o intuito de atingir este objetivo foi necessário revisar o trabalho de outros autores e colocar em prática aquilo que foi estudado. Para isso construiu-se um *software* capaz de modular 5 *bytes* em luz e outro capaz de demodular a informação em forma de luz em *bytes* novamente, obtendo uma comunicação bem sucedida e com taxa de transmissão de 10 *bits* por segundo.

Durante o desenvolvimento enfrentou-se diversos pontos que dificultaram a construção do protótipo, como o projeto da SBC *OrangePi* não ser muito maduro não possuindo muita documentação sobre a sua biblioteca para manipular as GPIOs. Outro ponto é o uso de um circuito muito simples e de baixa responsividade a variação de luz, para receber o sinal.

Diante desses pontos, pode-se concluir que para a comunicação alcançar maiores taxas de transferência a implementação de um hardware específico para a modulação e demodulação do sinal representaria um avanço significativo. A utilização de um microcontrolador dedicado a essas funções, comunicando-se via serial com a SBC, promoveria uma transmissão mais eficiente.

Ao alcançar o objetivo de construir o protótipo, demonstra a viabilidade da existência da tecnologia abrindo uma perspectiva promissora para solucionar os problemas de congestionamento do espectro eletromagnético e da interferência gerada por dispositivos elétricos.

Algumas restrições foram fundamentais para reduzir a amplitude dos resultados, embora aqueles alcançados tenham sido expressivos. Uma das principais restrições foi o acesso limitado a hardware mais robusto, englobando não apenas as placas mais recentes da linha Raspberry, isso se deve a escassez global de semicondutores, o que reduziu significativamente sua disponibilidade e consequentemente levou a um aumento nos preços (ZENG, 2022). E também a dificuldade de adquirir o hardware

desenvolvido especificamente pelo projeto OpenVLC, por causa da restrição de tempo disponível para a execução do projeto limitado a parte do período letivo do segundo semestre de 2023.

Referências

- ABRAHAM, C. **A beginner's guide to (CIE) colorimetry.** Medium, 2016. Disponível em: <<https://medium.com/hipster-color-science/a-beginners-guide-to-colorimetry-401f1830b65a>>.
- BARROS, J. J. R. **Efeitos da interferência gerada por fornos de micro-ondas nas redes sem fio IEEE 802.11b/g/n.** Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, Oct 2014.
- BEAGLEBOARD. **What is BeagleBone Black?** 2023. Disponível em: <<https://beagleboard.org/black>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- CABRAL, S. C. B. **Interferência eletromagnética em equipamento eletromédico ocasionada por telefonia móvel celular.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Jun 2001.
- CONCEIÇÃO, M. L. **Comunicação por Luz Visível.** Monografia (TCC) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- DRUMOND, C. **Scrum Um guia para o Scrum: o que é, como funciona e como começar.** 2022. Disponível em: <<https://www.atlassian.com/br/agile/scrum>>. Acesso em: 10 mai. 2023.
- GENACHOWSKI. **Revision of Part 15 of the Commission's Rules to Permit Unlicensed National Information Infrastructure (U-NII) Devices in the 5 GHz Band.** FCC - Federal Communications Commission, 2013. Disponível em: <<https://www.fcc.gov/document/5-ghz-unlicensed-spectrum-unii>>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- HALLIDAY, D. et al. **Fundamentos de física: Gravitação, ondas e termodinâmica.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. ISBN 9788521632061.
- HALLIDAY, D. et al. **Fundamentos de física: Óptica e física moderna.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. ISBN 9788521632108.
- KEMP, S. **Digital 2023: Global Overview Report - DataReportal – Global Digital Insights.** DataReportal – Global Digital Insights, 2023. Disponível em: <<https://datareportal.com/reports/digital-2023-global-overview-report>>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- LIMA, M. E. d. **Conversão Digital analógico E analógico digital - UFPE.** Universidade Federal de Pernambuco, 2020. Disponível em: <https://www.cin.ufpe.br/~es238/arquivos/aulas/conversores_AD_DA.pdf>.
- MATHEUS, L. et al. Comunicação por luz visível: conceito, aplicações e desafios. In: **Livro de Minicursos SBRC.** Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Computação, 2017. cap. 6, p. 247–296.
- MILTON, A. **Limites de tensao de entrada e corrente de saida.** 2018. Disponível em: <<http://devblog.drall.com.br/raspberry-pi-gpio-limites-de-tensao-de-entrada-e-corrente-de-saida>>. Acesso em: 20 set. 2023.

MONTEIRO, E.; HRANILOVIC, S. Design and implementation of color-shift keying for visible light communications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 32, n. 10, p. 2053–2060, 2014.

NEGUS, C. **Linux a Bíblia. O Mais Abrangente e Definitivo Guia Sobre Linux.** [S.I.]: Alta Books, 2014. ISBN 978-8576087991.

NETO, J. V. C. et al. Single-board computers na educação: Uma revisão sistemática da literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, Jun 2021.

ORANGE, P. **Orange Pi.** 2023. Disponível em: <http://www.orangepi.org/orangeipiwiki/index.php/Main_Page>.

RADIGAN, D. **Kanban: Como a metodologia Kanban é aplicada ao desenvolvimento de software.** 2022. Disponível em: <<https://www.atlassian.com/br/agile/kanban>>. Acesso em: 11 mai. 2023.

RASPBERRYPI, F. **Strategy 2018–2020.** Raspberry Pi Foundation, 2018. Disponível em: <<https://static.raspberrypi.org/files/about/RaspberryPiFoundationStrategy2018%E2%80%932020.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2023.

ROISENBERG, M. **Comunicação de Dados.** PUC Rio, 2004. Disponível em: <<https://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/SD1-06-ComunicacaoDados.pdf>>.

SERIAL COMMUNICATION. **Serial communication.** Wikimedia Foundation, 2023. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_communication>.

TANENBAUM, S. **Redes de computadores.** Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2011. ISBN 9788576059240.

WANG, Q. et al. Low-cost, flexible and open platform for visible light communication networks. **ACM HotWireless 2015**, 2015. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/2799650.2799655>>.

WILTGEN, F. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. In: **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos-SP.** [S.I.: s.n.], 2019.

ZENG, X. **Porque é que os preços do Raspberry Pi São Tão Altos? Irá Melhorar?** 2022. Disponível em: <<https://picockpit.com/raspberry-pi/pt/porque-are-raspberry-pi-prices-so-high-will-it-improve/>>.