

Visible Light Communication Applied to Low Cost Embedded Systems

Ana Luísa R. Gonçalves, Danilo A. Lima, Álvaro H. A. Maia

Abstract—The growing and continuous evolution of communication around the world, mainly due to the Internet of Things, has brought new perspectives on techniques for exchanging data. Visible Light Communication (VLC), a technology that uses Light-Emitting-Diodes (LEDs) modulation to send data, has become an alternative to radiofrequency, since its bandwidth is becoming scarce. This article proposes a didactic application of VLC using low-cost embedded systems, like off-the-shelf components and two Arduinos UNO. In addition, this application features On-Off Keying (OOK) modulation and Manchester Code as techniques for sending data and calculating the checksum for verifying the message correctness. In this approach, we reach a communication rate of 500 bps, at a distance of 40 cm. In addition, all hardware design e software code were provided.

Index Terms—VLC, Embedded Systems, Arduino.

I. INTRODUÇÃO

Com o advento da Internet das Coisas (IoT), a troca de dados entre os mais diversos tipos de dispositivos levantou a necessidade de novos meios de comunicação, uma vez que as faixas de frequências disponíveis na radiofrequência vêm se tornando escassas. Aliada a essa questão, a aplicação em larga escala dos LEDs (*Light-Emitting-Diodes*) na iluminação pública e residencial, por sua longa vida útil e capacidade de variação de luminosidade a taxas muito altas [1], colocou em foco a Comunicação pela Luz Visível (VLC - do inglês *Visible Light Communication*), tecnologia baseada no envio de dados por meio de pulsos luminosos.

A técnica tem como base a troca de pulsos luminosos modulados entre um emissor, neste caso um LED ou uma matriz de LEDs, e um receptor, que pode ser tanto um fotodiodo quanto sensores de imagem. Nesse âmbito, a VLC traz vantagens relevantes quando comparada à outras técnicas de envio de dados. Dentre elas, tem-se a possibilidade de utilização da infraestrutura já presente em ambientes internos e externos, o grande número de canais disponíveis para comunicação, menor consumo de energia e eletrônica simples para implementação. Além disso, a VLC não gera interferências em outros equipamentos sensíveis, como acontece com a radiofrequência [2], o que amplia significativamente o número de funcionalidades da técnica.

A VLC possui aplicações nos mais diversos segmentos, tanto em ambientes internos, como em hospitais [3], supermercados [4], estacionamentos subterrâneos [5] e voos [6], quanto em ambientes externos, como é o caso da Internet dos

Veículos (IoV - do inglês *Internet of Vehicles*) [7]. Quando voltada para o envio de dados entre veículos (V2V - do inglês *Vehicle-to-Vehicle*) e entre veículos e a infraestrutura (V2I - do inglês *Vehicle-to-Infrastructure*), a VLC desempenha um papel importante na troca de informações relevantes à navegação autônoma.

Nesse escopo, a Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE) definiu um padrão de *Basic Safety Messages* (BSM), o SAE J2735, como forma de padronizar a troca de informações entre veículos inteligentes. Ele engloba os principais dados necessários na comunicação entre veículos inteligentes, sendo composto por um ID temporário, a posição do veículo, dados de movimento como a velocidade, a orientação do movimento, ângulo de esterçamento do volante, aceleração tamanho do veículo e também alertas de frenagem. A literatura aponta que, para determinadas aplicações, a transmissão de dados precisa acontecer em uma taxa mínima de 50Hz [8].

Esse conjunto de mensagens permite aplicações diversas para veículos inteligentes, compondo os Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor (ADAS - do inglês *Advanced Driver-Assistance Systems*). Uma dessas aplicações é a navegação em comboio (*platooning*) mais segura, onde veículos viajam de forma controlada e com uma distância menor entre eles. Isso permite reduzir a resistência do ar entre os veículos e, assim, aumentar a eficiência e reduzir o número de condutores necessários [8].

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a Comunicação pela Luz Visível em ambiente controlado, por meio da troca de impulsos luminosos modulados em *On-Off Keying* (OOK), entre um LED e um fotodiodo interligados na plataforma de prototipagem Arduino. Discute-se, também, a utilização do código Manchester e das técnicas de cálculo de *checksum* para a identificação e diminuição de erros na transmissão. Este estudo traz contribuições significativas às pesquisas correlatas no Brasil, onde o tema ainda é pouco explorado. Além disso, busca explorar a VLC com ferramentas mais acessíveis e de menor custo, tais como a plataforma Arduino, a fim de viabilizar a disseminação do conhecimento acerca dessa tecnologia.

O presente artigo está dividido como segue. Na Seção II é apresentada a revisão da literatura com o estado da arte da VLC e as principais abordagens utilizadas nas pesquisas dispostas até então. Na Seção III é discutida a metodologia do projeto desenvolvido, detalhando os procedimentos e técnicas implementadas. Em seguida é apresentada a Seção IV, na qual são discutidos os resultados obtidos por meio de testes em ambiente controlado. Por fim, considerações finais e perspectivas futuras são apresentadas na Seção V.

The authors are with Terrestrial Mobility Lab., Department of Automatics, Federal University of Lavras, Av. Bueno da Fonseca, 543 - Inácio Valentim, Lavras/MG, 37200-900, Brasil. E-mail: danilo.delima@ufla.br. The authors wish to thank FAPEMIG (proc. no. APQ-00202-21).

II. ESTADO DA ARTE

A primeira pesquisa sobre a modulação da luz para envio de informações de que se tem conhecimento, foi a do fotofone de Alexander Graham Bell e Charles Sumner Tainter. Nela, foi apresentada a modulação de um feixe vibratório de luz para transmissão de sons. Seu design foi inspirado no telefone da época e utilizou o sinal de voz modulado projetado em um espelho, causando vibrações. Assim, a luz do sol foi direcionada para o espelho e projetada de volta para o receptor, sendo então convertida novamente em um sinal de voz [9].

Desde então, diferentes formas de utilização da luz para o envio de informações têm sido estudadas. O termo “*Visible Light Communication*” foi visto pela primeira vez em 2003, quando um grupo de estudantes do *Nakagawa Laboratories*, na Universidade de Keio no Japão, iniciou seus estudos sobre a transmissão de dados por meio da luz utilizando os LEDs e fotodiodos [10].

Nos anos seguintes, a VLC passou a ser explorada por vários pesquisadores do mundo todo. O professor Mohsen Kavehrad da Universidade Estadual da Pensilvânia ganhou destaque apresentando estudos em aplicações da VLC em sistemas híbridos, sustentáveis e de posicionamento em ambientes internos [11].

Em 2011, Harald Haas apresentou pela primeira vez no *TED Global Talk* o termo Li-Fi (*Light Fidelity*). O Li-Fi, tecnologia análoga ao Wi-Fi, refere-se a um sistema de comunicação sem fio bidirecional de alta velocidade que utiliza a luz visível como meio de transmissão [12].

Desde então, a VLC vem sendo amplamente explorada, buscando novos e mais eficientes emissores de luz, como é o caso dos estudos envolvendo os LEDs RGB [13], microLEDs [14], *Laser Diodes* [15], LEDs de Nitreto de Gálio [16], e também receptores, como o fotodiodo tradicional [17], o fotodiodo orgânico [18] e as câmeras CMOS [19]. No âmbito da mobilidade inteligente, a VLC vem ganhando espaço nos chamados Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) [20], [21], principalmente em aplicações envolvendo a comunicação V2I e V2V [22], [23].

Atualmente, pesquisas direcionadas à VLC implementada com sistemas embarcados de baixo custo vêm se tornando relevantes. Com esse objetivo, estudos utilizando a plataforma de prototipagem Arduino [24], [25], bem como a plataforma ESP32 [26] trazem novas perspectivas sobre a tecnologia, tornando-a mais versátil, além de facilitar o ensino e sua difusão.

Este trabalho se situa nesse último grupo de aplicações, sendo relevante pois apresenta um sistema didático, implementado em um ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino que possibilita a aplicação de funções de forma simples e direta. A aplicação da VLC, aqui apresentada, utiliza componentes encontrados facilmente no mercado em uma estrutura replicável, fazendo com que esse tipo de comunicação possa ser difundida no meio acadêmico, trazendo mais visibilidade para ela, principalmente nos países da América Latina. Além disso, este projeto traz um conjunto de técnicas de decodificação e identificação de erros, que o diferencia de outros trabalhos da área, como [25].

III. CONCEITOS GERAIS

A Comunicação pela Luz Visível se baseia em alguns conceitos gerais de modulação, *software* e *hardware* para transmissão de dados entre emissor e receptor. Nas subseções a seguir, é abordada a estrutura base de *hardware* utilizada, bem como o tipo de modulação, codificação e soma de verificação (*checksum*) implementados.

A. Hardware

1) *Emissor*: Dentro da VLC, a etapa de emissão do sinal é comumente implementada utilizando um ou mais LEDs ou lâmpadas de LED. Esses podem ser constituídos de diferentes materiais e ter diferentes tamanhos e cores, como apresentado na Seção II. Para o circuito de emissão deste trabalho foi utilizado um LED de 3 mm de luz branca, onde o anodo foi ligado na porta digital 11 do primeiro Arduino passando por um resistor de 1 K Ω e o catodo na porta GND, como pode-se observar na Fig. 1.

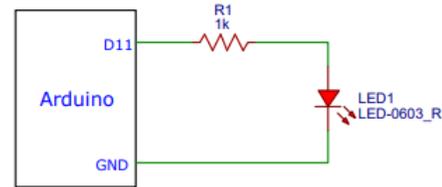


Fig. 1. Esquema de ligação do circuito emissor.

Essa configuração, apesar de simples, permite a aplicação de frequências na casa dos KHZ, o que é uma grande vantagem pois, nessa faixa, a variação de luminosidade não pode ser observada à olho nu. No entanto, essa configuração possui desvantagens quando utilizada em aplicações de VLC que possuem interferência externa, uma vez que a intensidade do LED escolhido não atende esse propósito.

2) *Receptor*: A etapa de recepção do sinal pode ser implementada utilizando os mais diversos tipos de sensores, como os de luz e imagem, bem como as câmeras presentes em *smartphones*, por exemplo. No entanto, o componente mais comum e amplamente utilizado é o fotodiodo e suas variações.

Para o circuito de recepção deste projeto, foi utilizado um módulo de fotodiodo para prototipagem em conjunto com o segundo Arduino. Na Fig. 2, pode-se observar o circuito elétrico do módulo fotodiodo. No Arduino, a porta digital 8 foi ligada ao terminal de saída digital do módulo, bem como sua alimentação de 5 V.

Uma das vantagens dessa configuração está na sua facilidade de implementação, uma vez que o módulo já possui todos os componentes necessários pra variação do limiar de luminosidade para detecção de 1s e 0s, além de disponibilizar o pino de saída digital.

B. On-Off Keying (OOK)

A On-Off Keying é um tipo de modulação binária que utiliza duas amplitudes de uma grandeza física para representar os valores de 0 e 1. No caso da VLC, a fonte de luz (LED) é

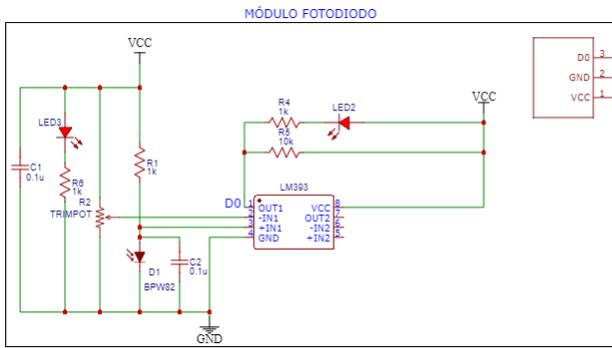


Fig. 2. Esquema elétrico do Módulo Fotodiodo.

ligada quando o valor binário a ser enviado é 1 e desligada quando 0. A OOK é amplamente utilizada em aplicações de comunicação pela luz visível pela sua baixa complexidade e, conseqüentemente, menor custo de implementação.

C. Manchester

O código Manchester é um tipo de codificação onde cada bit (0 ou 1) é representado por uma transição lógica. Isso é, em Manchester, o nível lógico alto é representado por uma transição de descida e o nível lógico baixo por uma transição de subida. Uma das grandes vantagens da codificação Manchester é na detecção de erros, uma vez que, diferentemente da codificação binária, ele não apresenta longas seqüências de bits iguais. Na Fig. 3 é apresentado um exemplo da modulação OOK e o código Manchester.

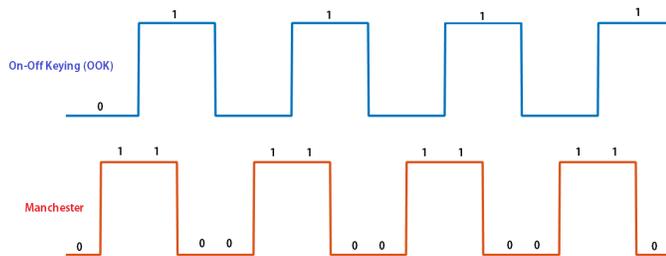


Fig. 3. Exemplo de modulação OOK e sua representação com o Código Manchester.

D. Checksum

O *checksum*, ou soma de verificação, tem por objetivo conferir a integridade dos dados recebidos com relação aos que foram enviados. Existem várias definições de como ele é aplicado, neste trabalho, foram implementados dois *checksum*, a fim de garantir a redundância do sistema. O *checksum A* foi calculado como a soma truncada em 0xFF de todos os bytes da mensagem em questão, excluindo o cabeçalho, como apresentado na Equação 1 e o *checksum B* como a soma total dos bytes mais o *checksum A*, como demonstra a Equação 2, ambos excluindo o cabeçalho. Dessa forma, ao receber esses valores ao final da mensagem, o código do receptor pode

recalculá-lo e verificar se a informação foi recebida sem nenhum erro.

$$checksum_a = idmensagem + dado \quad (1)$$

$$checksum_b = idmensagem + dado + checksum_a \quad (2)$$

IV. METODOLOGIA

Esta seção apresenta os detalhes da implementação do *software* proposto, disponível em [27]. Ele se baseia no fluxograma da Fig. 4.

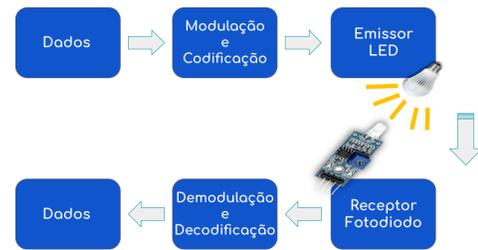


Fig. 4. Fluxograma do sistema VLC implementado.

A. Emissor

De acordo com a Fig. 4, a ação do emissor é receber os dados que serão enviados e estruturá-los na forma de uma mensagem. A estrutura adotada utiliza no mínimo 5 bytes para envio de um dado simples, como representado na Fig. 5. O valor do cabeçalho é fixo, 0xB5, enquanto o ID da mensagem varia de acordo com o tipo da mensagem enviada, conforme Tabela I. O Algoritmo 1 apresenta as etapas implementadas no código de emissão.



Fig. 5. Estrutura para envio de uma mensagem básica.

TABELA I
VALORES DE ID DA MENSAGEM EM HEXADECIMAL

ID (hexadecimal)	Tipo de mensagem
0xA1	Velocidade
0xA2	Orientação do movimento
0xA3	Ângulo de esterçamento do volante
0xA4	Aceleração
0xA5	Freio
0xA6	Tamanho do veículo
0xA7	Posição do veículo
0xA8	ID temporário (para privacidade)

Após estruturada a mensagem, foi implementada uma máscara para leitura de cada um dos bits individuais dos cinco

Algoritmo 1 Emissor

- 1: Preenche as 3 primeiras posições (cabeçalho, ID da mensagem e dado) do vetor mensagem de 5 posições
- 2: Calcula *checksum* A e *checksum* B e insere valores na mensagem
- 3: Aplica máscaras de bits para obtenção dos valores binários de cada posição
- 4: Codifica os bits em Manchester
- 5: Envia os dados pela porta digital do Arduino por meio de pulsos luminosos

bytes do vetor correspondente. Nela, o valor de cada uma das posições foi multiplicado por um hexadecimal correspondente ao peso do bit que seria isolado (0x80 para o mais significativo, por exemplo) e, posteriormente, implementada a codificação Manchester para definir as transições de subida e descida que representavam cada um dos bits. Em seguida, foi configurada uma das portas digitais do Arduino como saída, no caso a porta 11, para envio dos bits do mais significativo para o menos significativo, variando o valor digital da porta entre *true* para os bits em 1 e *false* para os bits em 0, atuando no emissor.

B. Receptor

Os Algoritmos 2 e 3, referentes à etapa de recepção dos dados, iniciam-se com a leitura da porta digital 8 do Arduino UNO. A cada leitura, o bit é inserido na posição correspondente de um vetor circular. Na recepção do sinal, foi utilizada uma frequência de amostragem 4 vezes maior do que a de envio dos dados. Dessa forma, cada transição de subida ou descida, codificada no emissor, é representada por uma sequência de 8 bits no receptor, ou seja, 0b00001111 ou 0b11110000.

Quando as oito posições estão completas, esse vetor é passado como parâmetro para uma função que detecta as transições válidas. Caso o byte represente uma das sequências corretas, acontece a decodificação Manchester. Caso o byte formado não represente uma transição válida, descarta-se o valor da primeira posição do vetor, desloca-se todos os bits para a esquerda, e um novo é inserido da posição menos significativa. Dessa forma, busca-se novamente por uma transição válida e retorna os bits correspondentes.

Em seguida, o bit decodificado é inserido em um segundo vetor circular, cujo objetivo é buscar pelo cabeçalho da mensagem. Seguindo a mesma lógica do anterior, a cada 8 bits decodificados do Manchester, o byte correspondente é convertido para hexadecimal e é comparado com o valor 0xB5 do cabeçalho. Caso o cabeçalho não seja encontrado no primeiro byte, inicia-se o descarte do bit mais significativo, deslocando os demais para a esquerda e inserindo-se um novo bit na posição menos significativa, até que o valor 0xB5 seja identificado.

Quando encontrado o cabeçalho, inicia-se então a etapa de decodificação da mensagem. Nela, os 32 valores identificados pela decodificação Manchester são inseridos em vetores individuais de oito posições. Assim, pode-se calcular os valores de *checksum* A e B gerados pelos valores de ID da mensagem

Algoritmo 2 Inserção para teste do cabeçalho

- 1: **enquanto** Mensagem não reconhecida **faça**
- 2: Lê dado e insere no vetor circular
- 3: **se** Vetor circular está vazio **então**
- 4: Insere o valor no vetor
- 5: **se** Vetor com 8 bits **então**
- 6: Testa o byte para uma transição válida
- 7: **se** Transição válida **então**
- 8: **se** Cabeçalho encontrado **então**
- 9: **se** Mensagem completa **então**
- 10: Decodifica mensagem
- 11: Calcula *checksum* A e B
- 12: **se** *checksum* A e B corretos **então**
- 13: **retorne** Mensagem recebida
- 14: **fim se**
- 15: **fim se**
- 16: **senão**
- 17: Executa Algoritmo 3
- 18: **fim se**
- 19: **fim se**
- 20: **senão**
- 21: Vetor cheio
- 22: **fim se**
- 23: **senão**
- 24: Atualiza vetor circular
- 25: Insere o valor no vetor
- 26: Testa o byte para uma transição válida
- 27: **se** Transição válida **então**
- 28: **se** Cabeçalho encontrado **então**
- 29: **se** Mensagem completa **então**
- 30: Decodifica mensagem
- 31: Calcula *checksum* A e B
- 32: **se** *checksum* A e B corretos **então**
- 33: **retorne** Mensagem recebida
- 34: **fim se**
- 35: **fim se**
- 36: **senão**
- 37: Executa Algoritmo 3
- 38: **fim se**
- 39: **senão**
- 40: Vetor cheio
- 41: **fim se**
- 42: **fim se**
- 43: **fim enquanto**

e o dado e compará-los com o recebido. Se esses valores forem iguais, a mensagem foi recebida corretamente e pode ser exibida. Caso contrário, o vetor circular é atualizado, removendo a posição mais significativa, deslocando os dados para a esquerda e inserindo um novo bit à direita (posição menos significativa). Com isso, o valor de cabeçalho hexadecimal 0xB5 é novamente procurado.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes deste trabalho deram-se em ambiente controlado, no chamado tubo escuro, a fim de obter resultados advindos

Algoritmo 3 Inserção para teste do cabeçalho

```

1: se Vetor circular de cabeçalho está vazio então
2:   Insere bit no vetor
3: se Vetor com 8 bits então
4:   Conversão de byte para hexadecimal
5:   se Dado igual 0xB5 então
6:     retorne Cabeçalho encontrado
7:   fim se
8: senão
9:   Vetor cheio
10:  retorne Cabeçalho não encontrado
11: fim se
12: senão
13:  Atualiza vetor circular
14:  Conversão de byte para hexadecimal
15:  se Dado igual 0xB5 então
16:    retorne Cabeçalho encontrado
17:  senão
18:    Vetor cheio
19:    retorne Cabeçalho não encontrado
20:  fim se
21: fim se

```

de experimentos sem qualquer interferência luminosa externa. Para a implementação, foram utilizadas duas plataformas de prototipagem Arduino UNO e suas interfaces de desenvolvimento, uma para executar as funções do emissor e outra para as do receptor, além de um sistema de LED de luz branca e fotodiodo, como apresentado na Fig. 6.

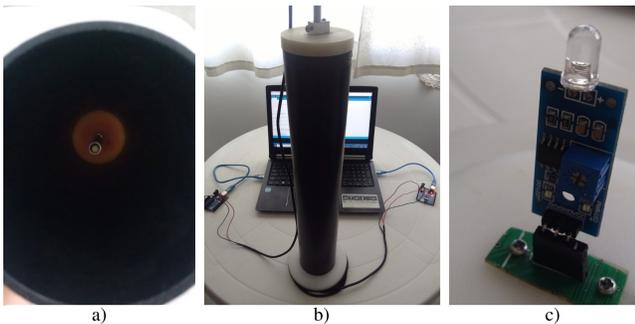


Fig. 6. Configuração do sistema real, onde em a) tem-se a vista inferior do tubo, com o LED ao centro, em b) tem-se o sistema completo, com os dois Arduinos e em c), o módulo fotodiodo na base do tubo.

Os testes foram organizados da seguinte forma. Primeiramente, foram analisados os *hardwares* utilizados e suas limitações em termos de frequência e distância. Em seguida, analisou-se *hardware* e *software* implementados em testes iniciais da solução completa. Por fim, após a compensação do atraso de tempo detectado, foram executados os testes finais.

Durante os testes iniciais, que podem ser vistos na Fig. 7, observou-se uma limitação significativa relacionada à taxa máxima de recepção do sistema. Esses experimentos geraram, a princípio, uma taxa de 114 bps a uma distância de 30 cm.

A fim de entender melhor essas limitações, foram feitos experimentos utilizando um gerador de frequência e um os-

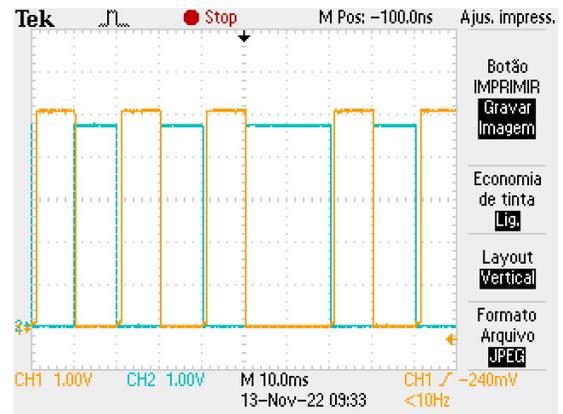


Fig. 7. Comparativo entre o sinal do emissor (em amarelo) e o sinal do receptor (azul).

ciloscópio, como apresentado na Fig. 8.

Primeiramente, foi setada uma onda quadrada de 5 V no gerador de frequências e aplicada no LED. A primeira entrada do osciloscópio foi conectada ao circuito emissor e a segunda ao receptor. Assim, a frequência do sinal aplicado ao LED foi variada e observou-se os níveis de detecção do módulo fotodiodo. Aproximadamente na frequência de 2,9 kHz, o sinal do circuito receptor começa a se deformar e à 3,2 kHz o módulo deixa de detectar as variações luminosas, como apresentado na Fig. 9.

Utilizando essa mesma configuração, foi possível observar que existia um atraso no tempo de resposta do receptor em relação ao emissor de aproximadamente 140 μ s. Essa diferença pode ser observada na Fig. 10. Ao constatar essa característica inerente ao *hardware* escolhido, foi necessário então fazer a compensação desse atraso, somado ao *delay* de resposta de 4,78 μ s das portas digitais do Arduino UNO, na frequência de amostragem utilizada no *software*.

Em seguida, novos testes foram executados para obter a máxima distância e taxa de transmissão deste projeto. Na Fig. 11 é apresentada a mensagem criada em byte e seu valor em Manchester, onde é enviado um dado de 120 km/h, correspondente à velocidade de um veículo. Pode-se observar também o resultado dos cálculos de *checksum* advindos das Equações 1 e 2.

Os experimentos foram realizados alterando a distância en-

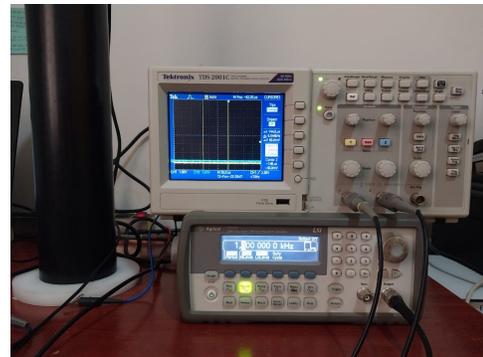


Fig. 8. Configuração para os testes de limitação do sistema.

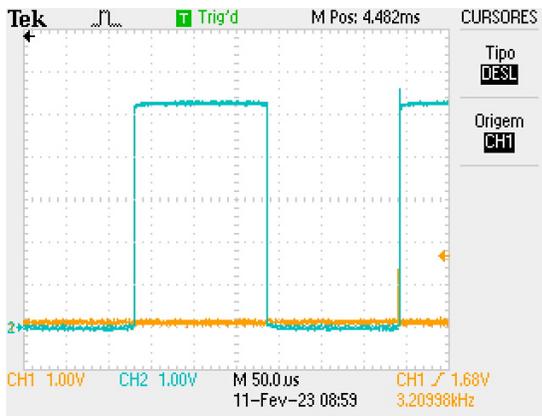


Fig. 9. Resposta do módulo fotodiodo à aplicação de 3,2 kHz no emissor, onde em azul está o sinal do emissor e em amarelo o sinal do receptor.

tre emissor e receptor, cujo valor máximo é de 40 centímetros. Em paralelo, para cada uma das posições do LED, foram também variadas as frequências de envio e recepção de dados, mantendo sempre o valor de leitura quatro vezes mais rápidos que os de emissão. Dessa forma, foi possível verificar a maior taxa de comunicação em que este projeto pode operar. Aplicando os testes no sistema real, obteve-se então os resultados apresentados na Tabela II, onde pode-se verificar a exatidão da mensagem recebida por meio do resultado do cálculo do *checksum A e B*.

TABELA II

RESULTADOS ADVINDOS DOS EXPERIMENTOS UTILIZANDO A COMPENSAÇÃO DO ATRASO DO TEMPO DE RESPOSTA DO HARDWARE

Distância (cm)	Emissor (Hz)	Receptor (Hz)	Taxa (bps)
2 - 40	50	200	250
	62,5	250	333,33
	83,33	333,33	500
	100	400	500
1	Não reconhece as transições		

Durante a variação da distância entre o LED e o fotodiodo,

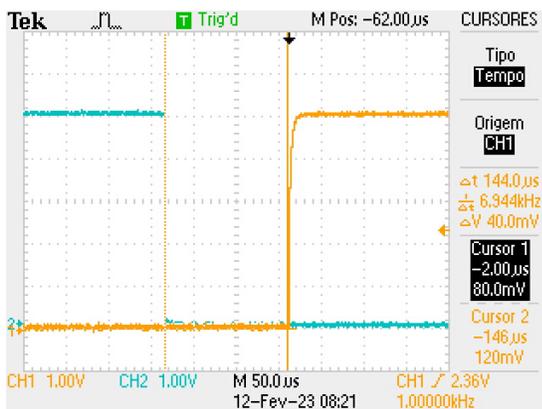


Fig. 10. Defasagem no tempo entre emissor e receptor, onde em azul está o sinal do emissor e em amarelo o sinal do receptor.

	CABEÇALHO	ID MENSAGEM	DADO	CHECKSUM A	CHECKSUM B
BYTES	10110101	10100001	01111000	00011001	00110010
MANCHESTER	1001101001100110	1001100101010110	0110101010010101	0101010100101010	0101101001010010

Fig. 11. Exemplo de uma mensagem de velocidade de um veículo.

percebeu-se que o valor mínimo de separação entre emissor e receptor deve ser de 1 cm. Isto porque, em distâncias menores, o módulo fotodiodo não consegue mais detectar as variações de pulsos luminosos.

Além disso, observando os valores apresentados na Tabela II, pode-se afirmar que esse sistema mantém uma taxa máxima fixa de 500 bps quando a distância entre o emissor e o receptor é variada de 2 a 40 cm. Nessa configuração, o sistema possui uma porcentagem de acerto de 100 %, uma vez que o cabeçalho é encontrado. Esses resultados se diferenciam dos obtidos por [25], uma vez que nesta aplicação foi possível variar as distâncias entre o emissor e receptor, além de implementar técnicas para detecção de erros na transmissão dos dados. Por fim, o sistema proposto pode ser aplicado na troca de mensagens de qualquer natureza, facilitando sua utilização e sua disseminação nos diversos campos de pesquisa.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este artigo apresentou a implementação de um sistema VLC de baixo custo, utilizando Arduino como plataforma embarcada para transmissão de dados para fins didáticos. Ele demonstrou, também, as técnicas de OOK, codificação Manchester e cálculo de *checksum* para esse escopo. Na implementação proposta, foi possível atingir uma taxa de transmissão estável, da ordem de 500 bits por segundo à 40 cm de distância. Essas limitações foram observadas principalmente devido ao *hardware* utilizado e aos componentes escolhidos.

Apesar dessas limitações, o sistema mostrou-se simples em funcionamento e flexível para ser testado com novas técnicas. Nesse sentido, uma aplicação futura em mente é a sua integração a um sistema de Posicionamento pela Luz Visível (VLP, do inglês *Visible Light Positioning*), como parte do projeto VIDA (Veículo Inteligente de Desenvolvimento Aplicado) do Laboratório de Mobilidade Terrestre (LMT) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Testes em simulação tem apresentado resultados interessantes.

Em trabalhos futuros, pretende-se implementar esse projeto em um sistema embarcado mais robusto, como uma FPGA (do inglês *Field-Programmable Gate Array*), ampliar os emissores para matrizes de LED e verificar a variação do erro de decodificação quando utilizado apenas um *checksum*. Essa proposta pode fazer com que o sistema atinja taxas superiores de kbps e possibilitar o envio de mensagens mais complexas. Além disso, também deseja-se testar o sistema em ambiente aberto, observando as variações que acontecem quando acrescentados os fatores externos, como luz do sol e de outras fontes de ruído.

REFERENCES

[1] G. A. Mapunda, R. Ramogomana, L. Marata, B. Basutli, A. S. Khan, and J. M. Chuma, "Indoor visible light communication: A tutorial and

- survey,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, 2020.
- [2] N. Sklavos, M. Hübner, D. Goehringer, and P. Kitsos, *System-level design methodologies for telecommunication*. Springer, 2013.
- [3] W. Ding, F. Yang, H. Yang, J. Wang, X. Wang, X. Zhang, and J. Song, “A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications,” *Computers in industry*, vol. 68, pp. 170–178, 2015.
- [4] L. Tamazirt, F. Alilat, and N. Agoulmine, “A visible light communication based positioning system for intuitive advertising in supermarkets,” in *5th International Workshop on ADVANCES in ICT Infrastructures and Services (ADVANCE 2017)*, 2017.
- [5] Y. Shen, G. Chen, X. Xu, C. Xu, G. Shen, and J. Li, “Poster: A vlc solution for smart parking,” in *Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2017, pp. 579–581.
- [6] D. Krichene, M. Sliti, W. Abdallah, and N. Boudriga, “An aeronautical visible light communication system to enable in-flight connectivity,” in *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [7] A. Bazzi, B. M. Masini, A. Zanella, and A. Calisti, “Visible light communications as a complementary technology for the internet of vehicles,” *Computer Communications*, vol. 93, pp. 39–51, 2016.
- [8] B. Soner and S. Coleri, “Visible light communication based vehicle localization for collision avoidance and platooning,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 3, pp. 2167–2180, 2021.
- [9] A. G. Bell, “The photophone,” *Science*, no. 11, pp. 130–134, 1880.
- [10] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights,” *IEEE T. Consum. Electr.*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, 2004.
- [11] M. Kavehrad, “Sustainable energy-efficient wireless applications using light,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 12, pp. 66–73, 2010.
- [12] H. Haas, “Lifi is a paradigm-shifting 5g technology,” *Reviews in Physics*, vol. 3, pp. 26–31, 2018.
- [13] W. Yuanquan and C. Nan, “A high-speed bi-directional visible light communication system based on rgb-led,” *China Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 40–44, 2014.
- [14] K. James Singh, Y.-M. Huang, T. Ahmed, A.-C. Liu, S.-W. Huang Chen, F.-J. Liou, T. Wu, C.-C. Lin, C.-W. Chow, G.-R. Lin *et al.*, “Micro-led as a promising candidate for high-speed visible light communication,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 20, p. 7384, 2020.
- [15] F. Zafar, M. Bakaul, and R. Parthiban, “Laser-diode-based visible light communication: Toward gigabit class communication,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 144–151, 2017.
- [16] M. S. Islim, R. X. Ferreira, X. He, E. Xie, S. Videv, S. Viola, S. Watson, N. Bamiedakis, R. V. Penty, I. H. White *et al.*, “Towards 10 gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a gan violet micro-led,” *Photonics Res.*, vol. 5, no. 2, pp. A35–A43, 2017.
- [17] S. Fuada, A. P. Putra, and T. Adiono, “Analysis of received power characteristics of commercial photodiodes in indoor los channel visible light communication,” 2017.
- [18] P. P. Manousiadis, K. Yoshida, G. A. Turnbull, and I. D. Samuel, “Organic semiconductors for visible light communications,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 378, no. 2169, p. 20190186, 2020.
- [19] T.-H. Do and M. Yoo, “Visible light communication-based vehicle-to-vehicle tracking using cmos camera,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 7218–7227, 2019.
- [20] R. M. Marè, C. E. Cugnasca, C. L. Marte, and G. Gentile, “Intelligent transport systems and visible light communication applications: An overview,” in *2016 IEEE 19th Int. Conf. Intell. Transp. Syst. (ITSC)*. IEEE, 2016, pp. 2101–2106.
- [21] D. A. Lima and A. C. Victorino, “Sensor-based control with digital maps association for global navigation: A real application for autonomous vehicles,” in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on*, Sept 2015, pp. 1791–1796.
- [22] G. Hernandez-Oregon, M. E. Rivero-Angeles, J. C. Chimal-Eguía, A. Campos-Fentanes, J. G. Jimenez-Gallardo, U. O. Estevez-Alva, O. Juarez-Gonzalez, P. O. Rosas-Calderon, S. Sandoval-Reyes, and R. Menchaca-Mendez, “Performance analysis of v2v and v2i lift communication systems in traffic lights,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2019, 2019.
- [23] H. B. Eldeeb, M. Elamassie, and M. Uysal, “Vehicle-to-infrastructure visible light communications: Channel modelling and capacity calculations,” in *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [24] D. Aguirre, R. Navarrete, I. Soto, and S. Gutierrez, “Implementation of an emitting led circuit in a visible light communications positioning system,” in *2017 First South American Colloquium on Visible Light Communications (SACVLC)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [25] P. A. P. Ferraz and I. S. Santos, “Visible light communication applied on vehicle-to-vehicle networks,” in *2015 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMAE)*. IEEE, 2015, pp. 231–235.
- [26] J. Latal, T. Stratil, S. Hejduk, F. Sarlej, J. Kolar, L. Hajek, and A. Vanderka, “Implementation of vlc within a public lighting network,” in *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [27] A. L. R. Gonçalves, “Software de emissão e recepção para sistema vlc utilizando sistemas embarcados de baixo custo,” <https://github.com/analuisarg/SistemaVLC>, Feb. 2023.



Ana Luísa Rodrigues Gonçalves Technician in Electronics by the Electronics Technical School Francisco Moreira da Costa (ETE-FMC) in Santa Rita do Sapucaí - MG. Graduated in Control and Automation Engineering from the Federal University of Lavras (UFLA) in Lavras - MG and former member of the Terrestrial Mobility Laboratory (LMT).



Danilo Alves de Lima received his bachelor's degree in Control and Automation Engineering and master's degree in Electrical Engineering from the Federal University of Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brazil, in 2008 and 2010, respectively, and doctor's degree in Systems and Information from the University of Technology of Compiègne (UTC), Compiègne, France, in 2015. He is currently an adjunct professor in the Department of Automatics at the Federal University of Lavras (UFLA) and director of the Terrestrial Mobility Laboratory (LMT). He has also worked with the Research and Development Group of Autonomous Vehicles (PDVA), UFMG, and Heudiasyc UMR 7253, a joint research laboratory between UTC and the CNRS in France. His main research areas include computer vision, robot navigation, and intelligent vehicle development.



Álvaro Henrique Alves Maia Technician in Mechatronics by the Federal Center of Technological Education of Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Nepomuceno. Graduated in Control and Automation Engineering from the Federal University of Lavras (UFLA) in Lavras - MG where he was a member of the Laboratório de Mobilidade Terrestre (LMT) from 2017 to the present day. He is currently entering the Graduate Program at UFLA to obtain a Master's degree in System and Automation Engineering.