

DESENVOLVIMENTO DE UMA COMUNICAÇÃO VLC APLICADA A SISTEMAS I2V NAS EMERGENTES CIDADES INTELIGENTES

DIOGNEI DE MATOS*, GIOVANI BERNARDES VITOR*, DEAN BICUDO KAROLAK*

**RobSIC - Laboratório de Robótica, Sistema Inteligente e Complexo - UNIFEI
Itabira, MG, Brasil*

Email: diognei@unifei.edu.br, giovanibernardes@unifei.edu.br,
dean.karolak@unifei.edu.br

Abstract— This work aims to present a new VLC communication technique to improve and make smart the current traffic lights and light poles, enabling them to transmit information to vehicles using existing structures. For this, a prototype using microcontrollers and LEDs was developed. Results obtained demonstrate the viability of the solution proposed for I2V communication in emerging intelligent cities.

Keywords— VLC, I2V, Smart Traffic Light, Smart Pole.

Resumo— Este trabalho procura apresentar uma nova técnica de comunicação VLC para aprimorar e tornar os atuais semáforos e postes inteligentes, habilitando-os a transmitir informações para os veículos usando as estruturas já existentes. Para isso, um protótipo utilizando microcontroladores e LEDs foi desenvolvido. Resultados obtidos demonstram a viabilidade da solução proposta para a comunicação I2V nas emergentes cidades inteligentes.

Palavras-chave— VLC, I2V, Semáforo Inteligente, Poste Inteligente.

1 Introdução

No contexto das emergentes cidades inteligentes, a mobilidade urbana se torna cada vez mais complexa, exigindo dispositivos e sistemas mais precisos e que forneçam respostas mais rápidas e eficazes. Logo, o uso de novas tecnologias se torna cada vez mais necessário e presente. Uma delas é a comunicação por luz visível (VLC - Visible Light Communication). Essa tecnologia pode proporcionar significativos avanços para os sistemas de transporte inteligente (ITS - Intelligent Transportation Systems) (Kumar et al., 2012). Do ponto de vista dos semáforos inteligentes, uma vez que estes poderão transmitir seu estado para os veículos, incorporando tal funcionalidade aos sistemas avançados de assistência ao condutor (ADAS - Advanced Driver Assistance Systems), estes servirão como auxílio e alerta ao motorista ou até mesmo servindo como fonte de informação para a tomada de decisão dos recentes veículos autônomos (Kumar et al., 2007). Seguindo o mesmo raciocínio para os postes inteligentes, uma vez que estes possuem a capacidade de transmitir informações para o veículo, é possível desenvolver sistemas de auxílio à localização precisa em duas frentes. A primeira é caracterizada pelo mapeamento georreferenciado dos postes associados à um identificador. Assim, uma vez que o veículo passe por um determinado poste, sua identificação possibilitará a localização precisa deste veículo no mapa. A segunda frente caracteriza-se pela estimação da distância relativa do veículo para o poste em função da intensidade luminosa recebida por este, realizando assim a trilateração. Portanto, o desenvolvimento de técnicas usando VLC para as emergentes cidades inteligentes se mostra importante, motivados

principalmente pela questão da eficiência quanto ao consumo da energia e reuso dos recursos existentes, reduzindo assim o custo de implantação dessas tecnologias com o reaproveitamento dos recursos já disponíveis (Yaqoob et al., 2017).

Neste artigo é proposta uma técnica usando VLC para proporcionar aos atuais semáforos e postes à LED, a capacidade de transmitir dados pela luz, contribuindo assim para o ITS no contexto da comunicação I2V. Para tal, um circuito eletrônico com microcontroladores e LEDs foi desenvolvido, além de um protocolo de comunicação que juntos buscam evitar as interferências ocasionadas pelo ambiente externo e transmitir os dados corretamente por meio da luz.

Esse trabalho foi organizado em cinco seções. Na Seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados à comunicação I2V para os sistemas ITS. A Seção 3 apresenta a infraestrutura onde será aplicada a tecnologia VLC bem como o sistema proposto para solucionar o desafio apresentado. Na Seção 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos com o desenvolvimento do protótipo do projeto proposto. Na Seção 5 são apresentadas as conclusões obtidas após realizar o trabalho.

2 Trabalhos Relacionados

A tecnologia VLC vem sendo estudada e aplicada em diferentes situações. No contexto do VLC em postes de luz e semáforos nas cidades inteligentes, são apresentados a seguir alguns trabalhos de outros autores.

Liu et al. (2008) propôs um cenário para deficientes visuais, usando o VLC em lâmpadas de iluminação em ambiente fechado para guiá-los por corredores. Cada lâmpada transmite uma ID via

VLC que é recebida por um receptor usado pela pessoa e sua localização é feita calculando-se a distância para cada lâmpada e em estimando-se a posição da pessoa com base nas distâncias computadas. A diferença desse para o trabalho aqui proposto é que serão usadas IDs em postes em locais abertos e cada poste será associado a uma coordenada precisa definida pela ID não requerendo cálculo de posição.

No trabalho realizado por Kumar et al. (2012) em sistemas de transportes inteligentes (ITS) foi usado o VLC considerando um semáforo de LEDs, onde foi realizada a integração da unidade de luz do semáforo dentro da arquitetura ITS existente. A tecnologia VLC serviu para transmitir o estado do semáforo para os veículos a longa distância. Nos resultados, obteve-se uma faixa de comunicação de dados de mais de 40m de distância, mesmo estando a luz do sol bem intensa, afirmam os autores. Em outro trabalho, Kumar et al. (2007) usou o VLC nos sistemas avançados de assistência aos motoristas (ADAS), que consistiu em uma aplicação ao ar livre usando o VLC em semáforos a LED. A diferença no presente trabalho é que o VLC será aplicado tanto em semáforos quanto em postes de luz nas cidades inteligentes, tudo integrado em um único sistema.

Premachandra et al. (2010) propõe um sistema de comunicação entre semáforos a LED e veículos, onde o semáforo transmite seu estado por meio do VLC que é recebido por uma câmera de alta velocidade no veículo. A luminância dos LEDs é capturada em quadros consecutivos buscando uma comunicação rápida e eficaz. O sistema no veículo deve primeiro encontrar o transmissor e depois capturar imagens consecutivas para analisar a mensagem transmitida. Foram propostas novas técnicas para melhorar a velocidade de comunicação do sistema. A diferença desse trabalho para o aqui proposto está no fato de este usar um fotodiodo ao invés de uma câmera, o que reduz o custo do projeto e permite maximizar a velocidade de transmissão dos dados, pois não requer processamento de imagens.

Uma aplicação realizada por Boubakri et al. (2015) teve como objetivo construir uma arquitetura de comunicação integrando a tecnologia VLC à infraestrutura das cidades inteligentes. No trabalho, o VLC foi usado na comunicação em vários locais e entre diferentes dispositivos, como postes, semáforos, dispositivos móveis, veículos e outros pontos com luzes e sensores. Foi proposta uma arquitetura de rede estruturada em três camadas, sendo a primeira baseada em VLC para detectar informações em locais específicos da cidade, a segunda fornecendo comunicações com LEDs VLC, que consistem em LEDs que enviam e recebem dados pela luz, e a terceira para comunicação entre diferentes pontos usando o espaço óptico livre (FSO). A diferença na aplicação apresentada neste

artigo está no fato de buscar uma forma mais simples e econômica de se aplicar o VLC nos postes e semáforos das cidades inteligentes, não requerendo instalação de muitos recursos novos.

3 Solução Proposta com base no VLC

Nesta Seção, é apresentada a solução proposta. Na Subseção 3.1 é feita uma breve explanação da tecnologia VLC. Na Subseção 3.2 é descrito o contexto proposto para aplicação do protótipo na cidade inteligente. Na Subseção 3.3 é descrito o sistema proposto para esse contexto. Na Subseção 3.4 são apresentados os circuitos eletrônicos implementados. E na Subseção 3.5 é apresentado o protocolo de comunicação implementado.

3.1 VLC - Visible Light Communication

Um sistema VLC é constituído de duas partes, o transmissor e o receptor. Ambas as partes consistem geralmente em três camadas comuns: a camada de aplicação, a camada MAC, e a camada física. A camada de aplicação é onde estará contido o sistema responsável por usar as informações, gerenciá-las e prover uma interface para que o usuário possa utilizá-las. A camada MAC é a camada de controle de acesso médio, e realiza diversas ações como suporte de mobilidade, atenuação, visibilidade e segurança, entre outras. A camada física, que é a parte tratada nesse artigo, fornece a especificação física do dispositivo e a sua relação com o meio (Khan, 2017).

Na Figura 1 é mostrado um diagrama de blocos da camada física de um sistema VLC típico. A informação em binário é enviada para o bloco modulador e o sinal resultante será transmitido pelo bloco transmissor por meio de um LED. A luz emitida será recebida por um fotodiodo e o sinal será enviado para o demodulador que irá separar a informação da frequência portadora, obtendo assim a informação codificada (Truzzi, 2016).

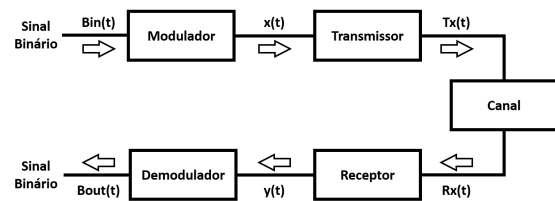


Figura 1: Diagrama de um sistema VLC típico.

3.2 Descrição do Contexto

Foi considerado como contexto uma cidade cujos postes e semáforos possuem lâmpadas de LED. As distâncias entre os postes são suficientes para que a luz de um poste não interfira na luz do outro poste ou do semáforo. Para a implementação, foi

considerado um pequeno trecho com quatro postes e um semáforo, cuja proposta consiste em usar apenas uma lâmpada no semáforo para transmitir seu estado para os veículos inteligentes, mas também podendo-se reutilizar as lâmpadas dos semáforos já existentes. Na Figura 2 é ilustrado um exemplo de como será esse pequeno trecho da cidade.

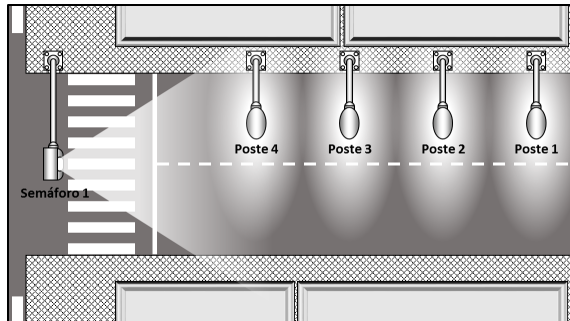


Figura 2: Trecho da cidade proposta.

3.3 Descrição do Sistema

Considerando o contexto apresentado, propõe-se que cada poste envie constantemente por meio do VLC, uma ID que represente sua posição na cidade. Essa ID inicialmente consiste em um número inteiro decimal que é transmitido por meio de uma sequência de 8 bits em sua luz. Como são quatro postes, cada poste envia o respectivo número decimal que vai de 1 a 4. E para o semáforo são reservados dois números diferentes não usados pelos postes, nesse caso foi usado 8 para semáforo aberto e 9 para semáforo fechado, mas poderiam ser usados quaisquer outros valores em outras situações. O semáforo fica alterando automaticamente o seu valor de tempos em tempos, alternando-se entre aberto e fechado, foi exemplificado com um tempo de 20 segundos para cada estado. O sequenciamento e sincronismo do envio dos dados pela luz é feito para todos os postes e semáforo por uma única central que possui um microprocessador ligado à cada luz de cada poste e do semáforo, de modo que essa central gere todas as IDs para todos os postes.

No veículo inteligente, propõe-se um circuito receptor cujo processador possua um *clock* na mesma velocidade do transmissor, e receberá os dados de forma assíncrona. Quando o veículo passar pela área de atuação da fonte luminosa, o circuito receptor receberá a ID do poste e saberá, por meio de um mapa de coordenadas das IDs, a sua localização na cidade. No protótipo implementado, o *byte* recebido é mostrado em uma sequência de 8 LEDs e a ID do poste é mostrada em um display LCD, no circuito receptor. Quando o veículo se aproximar do semáforo, ele receberá de forma análoga, a informação enviada pelo semáforo, de aberto ou fechado. A proposta deste artigo busca

somente identificar a qual poste o veículo está mais próximo, pois o veículo receberá a ID do poste estando em qualquer posição dentro do seu cone de atuação de luz. Essa localização precisa do veículo é sugerida como projeto futuro, que pode ser feita usando técnicas de filtragem estocásticas.

Na Figura 3 é ilustrado o funcionamento do sistema na cidade. O circuito transmissor está ligado a todos os postes e ao semáforo e cada veículo possui um circuito receptor integrado. Acima de cada veículo há um fotodiodo e o seu campo de visão (FOV) é exibido na Figura.

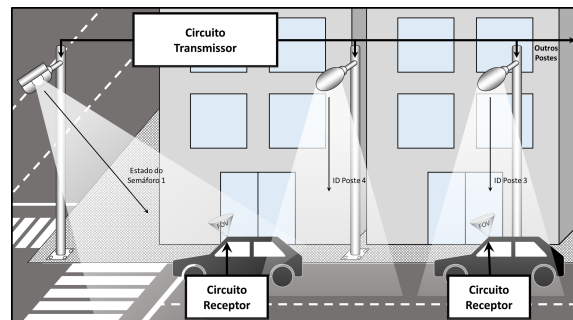


Figura 3: Ilustração do sistema.

3.4 Circuitos Implementados

Na Figura 4 é exibido o diagrama do circuito transmissor. O transmissor foi implementado usando um microcontrolador PIC16F870 com um cristal de 4MHz e componentes auxiliares. Foram usados cinco LEDs de alto brilho, dos quais quatro (DP1 a DP4) representam os quatro postes e o quinto (DS1) representa o semáforo. Para cada LED, foi usado um transistor BC548 e componentes de polarização de modo a garantir maior potência no brilho dos LEDs sem correr o risco de danificar a saída do microcontrolador. O microcontrolador foi programado em linguagem C usando o ambiente de desenvolvimento MPLAB e o compilador CCS. Cada LED portanto, fica piscando em alta velocidade enviando constantemente um *byte* informando sua ID. Mais detalhes sobre os dados enviados são apresentados na Subseção 3.5.

Na Figura 5 é exibido o diagrama do circuito receptor. O receptor foi implementado usando um microcontrolador PIC16F870 com um cristal de 4MHz e componentes auxiliares. Para recepção da luz, foi usado um fotodiodo receptor ligado em uma entrada digital do microcontrolador. Foram usados oito LEDs difusos (DB1 a DB8) para exibir o *byte* recebido, e um display LCD para exibir a ID de cada poste e o estado do semáforo. Para programação do microcontrolador, foram usados os mesmos recursos do transmissor. A informação recebida pelo fotodiodo é exibida tanto nos LEDs, de forma binária, quanto no display LCD com a respectiva mensagem para cada dado recebido, previamente definida.

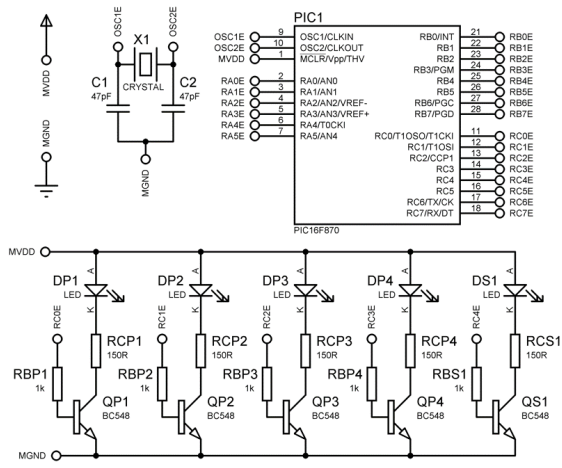


Figura 4: Circuito transmissor (Infraestrutura).

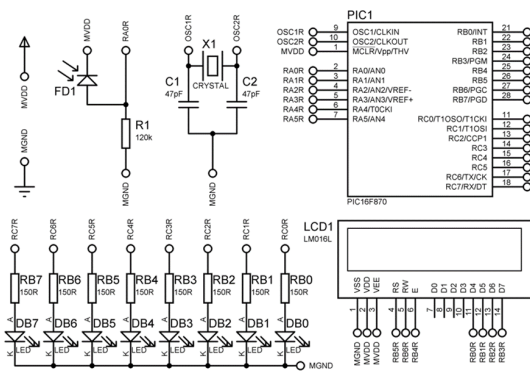


Figura 5: Circuito receptor (Veículo).

3.5 Protocolo de comunicação

A programação dos microcontroladores foi feita utilizando temporizadores internos buscando alcançar a mais alta frequência possível de modo que não seja possível perceber que a luz está piscando (problema do *Flickering*). Foi definido um protocolo de comunicação serial assíncrona para transmitir constantemente um dado de oito bits. Como na pior das hipóteses, todos os oito bits estarão em nível lógico zero, foi definido um preâmbulo de 8 bits em nível lógico alto para que nessa hipótese a intensidade da luz do poste percebida pelo olho humano, que é a média das intensidades de cada bit, não fique baixa. Esses oito bits do preâmbulo em nível alto são separados por dois bits em nível baixo (um antes e um depois) para não serem confundidos com uma mensagem no qual todos os oito bits de dado estejam em nível alto. Após os dez bits de preâmbulo é enviado um bit de tipo de mensagem que define se a mensagem enviada será um dado ou uma instrução, isso pensando em uma expansão do projeto na qual pode-se transmitir tanto dados quanto instruções pela luz. Essa lógica de dado e instrução foi inspirada na forma como é feita nos displays LCD, o que permite transmitir caracteres ASCII e instruções por meio de um único

canal (Ramos, 2005). Dessa forma, cada pacote possui 19 bits, dos quais 10 compõe o preâmbulo, 1 o tipo de mensagem, e 8 a mensagem transmitida. Na Figura 6 é mostrada essa divisão dos bits do pacote. Nesse exemplo, é transmitida a ID do poste 1. Uma estratégia para manter os LEDs com brilho mais intenso, especificamente para esse caso em que são apenas quatro postes, foi transmitir a informação invertida de modo que a maioria dos LEDs ficassem em nível alto na maior parte das situações.

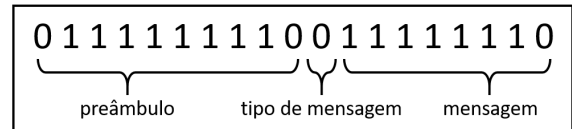


Figura 6: Organização dos bits transmitidos.

4 Resultados experimentais

Para melhor apresentar os resultados que foram obtidos com o desenvolvimento do protótipo de comunicação VLC, este foi organizado em duas seções. A primeira, Seção 4.1, expõe o circuito eletrônico desenvolvido em diferentes configurações (poste e semáforo) a fim de demonstrar seu real funcionamento, em ambiente aberto durante o dia. A segunda, Seção 4.2, busca validar o sistema proposto em função da taxa de bits errados (BER - Bits Error Rate) para diferentes distâncias e com diferentes interferências, em ambientes abertos, durante a noite e durante o dia.

4.1 Resultados qualitativos do protótipo desenvolvido

Nas Figuras 7 a 9 são exibidas algumas mensagens transmitidas e recebidas pelo protótipo implementado no *protoboard*. A parte superior contém o circuito transmissor com a central de processamento do trecho da cidade onde os quatro LEDs da esquerda (brancos e amarelos) representam os postes e o quinto LED (azul) o semáforo. A parte inferior contém o receptor com os LEDs vermelhos para exibir o byte recebido e um display LCD para exibir a mensagem associada a cada poste. Na Figura 7 são exibidos mais detalhes sobre cada item. Foram usadas diferentes cores para certificar-se de que a cor da luz não prejudique a comunicação. São mostradas as comunicações com o poste 1, o poste 4 e o semáforo, e os demais obtiveram funcionamento análogo. Para mais detalhes sobre o funcionamento do protótipo, está disponível online um vídeo demonstrativo ¹.

Pelos resultados qualitativos, pôde-se observar que mesmo estando os LEDs bem próximos entre si, a luz de um não prejudica a comunicação entre

¹<https://youtu.be/08axiyxfvI>

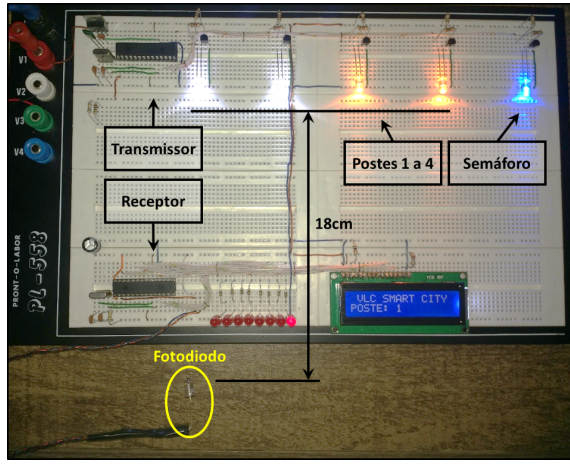


Figura 7: Comunicação com o poste 1

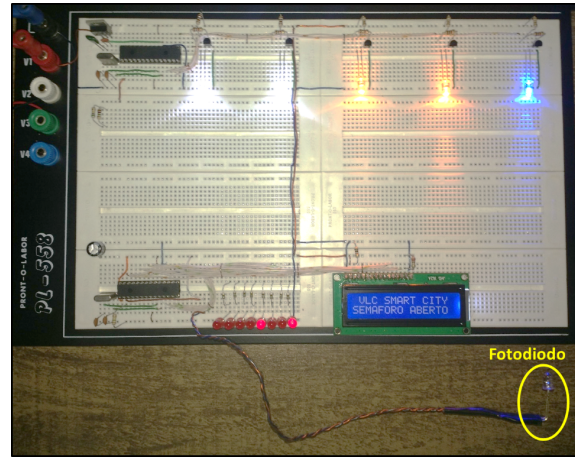


Figura 9: Comunicação com o semáforo aberto.

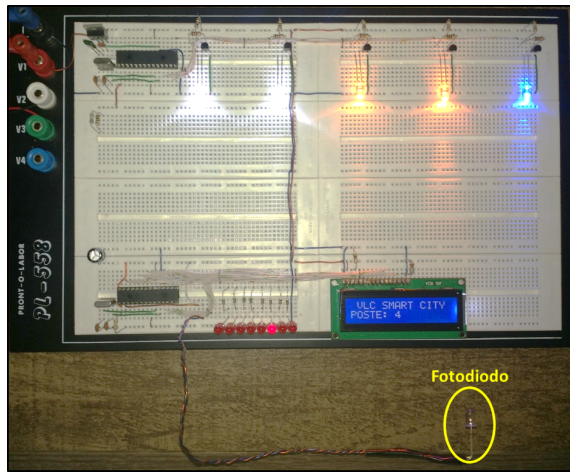


Figura 8: Comunicação com o poste 4.

os demais e o fotodiodo. Também notou-se que não há necessidade de o fotodiodo estar totalmente alinhado ao LED, bastando apenas estar diante da luz emitida, e mesmo estando o fotodiodo levemente em movimento ou um pouco inclinado a mensagem é recebida corretamente sem interferências. Nos testes qualitativos, foram propositalmente colocadas várias luzes ambientes para causar interferência, e o sistema funcionou corretamente tanto na luz intensa do sol quanto luzes da noite e nem mesmo o flash da câmera ao bater a foto foi capaz de prejudicar a comunicação.

4.2 Resultados quantitativos do protótipo desenvolvido

Para validar o sistema proposto foi calculada a taxa de bits errados (BER - Bits Error Rate) para diferentes distâncias entre os LEDs e o fotodiodo, deixando-o em situações ambientes com interferências de luz e movimento do fotodiodo. A forma como o sistema foi projetado tanto no circuito físico quanto na programação dos microcontroladores, levou a um sistema que praticamente nunca recebe bits errados, pois o sistema ou recebe todos os bits

corretamente, ou simplesmente não os recebe. Isso pode ter ocorrido por diversos motivos, como o fato de a frequência de transmissão não ser tão alta como visto em outros trabalhos, e também o fato de serem transmitidos apenas 8 bits de mensagem por pacote. O cálculo da taxa BER é feito em (1).

$$BER = \frac{\text{Numero_de_bits_errados}}{\text{Numero_de_bits_transmitidos}} \quad (1)$$

Na Figura 10 são exibidos os valores da BER para as diferentes distâncias entre os LEDs e o fotodiodo em dois gráficos diferentes, um para as medições feitas durante o dia e outro durante a noite, em situações onde o preâmbulo é identificado pelo receptor e consequentemente o pacote é recebido. Pode-se observar que a partir de uma determinada distância máxima, nenhum bit é mais recebido pois o sistema receptor simplesmente não consegue mais receber o pacote enviado pelo transmissor. Ressalta-se que, como as interferências durante o dia são mais acentuadas, a partir de 65cm os pacotes já são perdidos, diferentes dos experimentos realizados durante a noite.

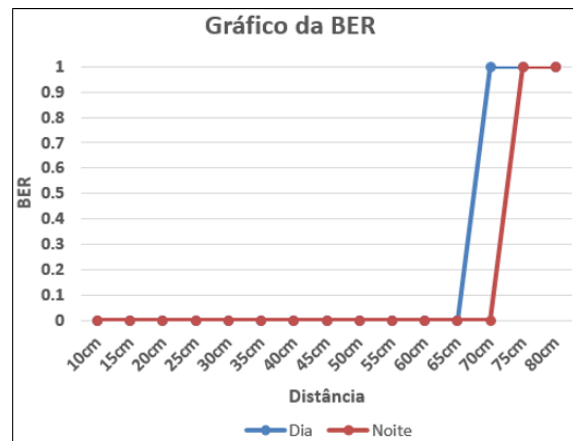


Figura 10: Gráfico da taxa BER para diferentes distâncias entre um LED e o fotodiodo.

Além da BER, para melhor apresentar a qualidade do sistema projetado, foi calculada a taxa de pacotes errados (PER - Packet Error Rate), que consiste em qual porcentagem dos pacotes enviados pelo transmissor não são recebidas corretamente pelo receptor em situações ambientes com muita interferência. Para isso, foi calculado no transmissor, quantos pacotes são enviados por minuto e em seguida foi medido no receptor quantos pacotes este recebe por minuto, para diferentes distâncias entre os LEDs e o fotodiodo em situações com bastante interferências de luz ambiente e movimento do fotodiodo. O cálculo dessa taxa PER é feito em (2).

$$PER = \frac{\text{Numero_de_pacotes_errados}}{\text{Numero_de_pacotes_transmitidos}} \quad (2)$$

Na Figura 11 são exibidos os valores da PER para as diferentes distâncias entre os LEDs e o fotodiodo em dois gráficos diferentes, um para as medições feitas durante o dia e outro durante a noite. Pode-se observar que à medida que a distância entre o LED e o fotodiodo aumenta, a taxa de erro aumenta, tanto de dia quanto de noite, pois quanto maior a distância, mais pacotes tendem a ser perdidos devido às interferências. Entretanto, isso não é tão problemático para esse sistema pois nele a informação de cada poste é transmitida por inteiro em um único pacote de 19 bits.

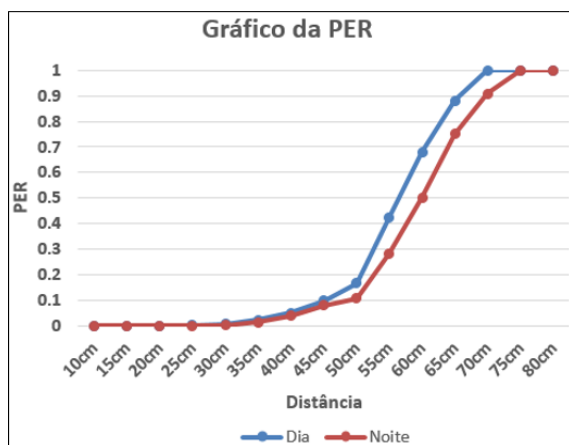


Figura 11: Gráfico da taxa PER para diferentes distâncias entre um LED e o fotodiodo.

5 Conclusões

Esse trabalho trouxe uma nova abordagem da tecnologia VLC em cidades inteligentes que, por meio de um sistema de fácil implementação, permitirá a localização e tomada de decisões dos veículos autônomos diante dos postes e semáforos inteligentes, reaproveitando as lâmpadas e demais recursos já existentes na infraestrutura. Os resultados apresentados mostraram a qualidade do sistema desenvolvido, levando em conta que este está em escala

menor, com componentes dimensionados para este protótipo e que foi testado com muitas interferências ambientes, funcionando bem em distâncias pequenas como era o objetivo. Além de poder ser expandido para ser aplicado em cidades grandes com mais postes e semáforos, o protótipo serve como uma excelente base para outros trabalhos com VLC que buscam uma estratégia eficiente e que não requeira dispositivos caros e complexos de se implementar.

Para trabalhos futuros, pode-se detectar a potência dos LEDs por meio do receptor para calcular a posição mais exata dos veículos (quanto mais próximo do poste, mais intensa a luz instantânea no receptor). Pode-se também desenvolver um algoritmo para determinar a localização do veículo usando esse sistema. E principalmente projetar e realizar testes para a situação real em escala 1:1.

Referências

- Boubakri, W., Abdallah, W. and Boudriga, N. (2015). A light-based communication architecture for smart city applications, *Transparent Optical Networks (ICTON)*.
- Khan, L. U. (2017). Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges, *Digital Communications and Networks 3*, pp. 78–88.
- Kumar, N., Lourenço, N., Alves, L. N. and Aguiar, R. L. (2012). Visible light communications in intelligent transportation systems, *Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 748–753.
- Kumar, N., Nero, L. A. and Aguiar, R. L. (2007). Visible light communication for advanced driver assistant systems, *Instituto de Telecomunicações*.
- Liu, X., Makino, H. and Maeda, Y. (2008). Basic study on indoor location estimation using visible light communication platform.
- Premachandra, H. C. N., Tomohiro Yendo, M. P. T., Yamazato, T., Okada, H., Fujii, T. and Tanimoto, M. (2010). High-speed-camera image processing based led traffic light detection for road-to-vehicle visible light communication, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 793–798.
- Ramos, E. S. (2005). Comunicação de lcd em 4 vias, *Universidade Federal do Ceará*.
- Truzzi, S. (2016). Visible light communication, *Università Degli Studi di Torino*.
- Yaqoob, I., Hashem, I. A. T., Mehmood, Y. and Gani, A. (2017). Enabling communication technologies for smart cities, *IEEE Communications Magazine*, pp. 112–120.