

Feasibility of a Testing Methodology for Visible Light Communication Systems Applied to Intelligent Transport Systems

Renata M. Marè, Claudio L. Marte, Carlos E. Cugnasca, Osvaldo Gogliano-Sobrinho
and Alessandro S. dos Santos

Abstract—This paper presents a methodology for testing and evaluation of Visible Light Communication (VLC) applications in the context of Intelligent Transport Systems (ITS). The methodology was applied in a test bed located in São Paulo - Brazil, which allows the evaluation of wireless communication technologies between vehicle and road infrastructure elements and between vehicles, even if traveling in high speed. The evaluated application refers to locating buses in real-time in urban places where the Global Positioning System technology is compromised due to loss of signal (sometimes for relatively long periods), such as tunnels and bus terminals. Through VLC, which uses modulated Light-emitting Diodes (LED) as data transmitters, it would be possible to overcome these drawbacks, taking advantage of the existing public lighting infrastructure as a means of transmission of positioning coordinates. The test results showed the feasibility of the proposed application and, most relevant, of the testing methodology. It opens up a range of VLC testing options related to the various ITS domains expressed in ISO 14813, such as vehicle-to-vehicle (e. g. warning signals in platooning scenarios) and vehicle-to-infrastructure-to-vehicle communication (e. g. half or full-duplex communication between vehicles and traffic signals in crossroads).

Index Terms— Visible Light Communication, Intelligent Transport Systems, test bed, Global Positioning System.

I. INTRODUÇÃO

O conceito de Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transport Systems* - ITS) foi proposto há mais de 50 anos nos Estados Unidos. As regiões do mundo que mais têm pesquisado e investido em ITS são Japão, União Europeia, Coreia do Sul, Singapura e Austrália [1]. O principal objetivo dos ITS é proporcionar melhores condições de orientação e deslocamento aos usuários da infraestrutura

viária e dos vários meios de transporte [2]. A base para isso é a interação entre os diversos atores, a infraestrutura e o ambiente, proporcionada por um conjunto de tecnologias que permitem, desde a coleta de dados diversos como posicionamento, condições ambientais, rotas, veículos, modos de condução, eventos indesejados, entre outros, à transmissão de informações derivadas de seu processamento para os diversos atores interessados. Esse conhecimento gerado e compartilhado permite proporcionar maior segurança e capacidade de drenagem da infraestrutura no que concerne ao transporte sobre rodas, seja individual ou coletivo, infraestrutura essa que não pode ser facilmente modificada ou ampliada fisicamente.

Algumas aplicações em ITS usam a comunicação entre Veículo e Infraestrutura (*Vehicle-to-Infrastructure* - V2I) em sua concepção. Por exemplo, no caso da priorização semafórica, a comunicação local entre um ônibus e um controlador de semáforo pode detectar a aproximação do ônibus e prever o momento de sua chegada ao cruzamento. Nesse exemplo, podem-se empregar várias tecnologias para inferir a localização do ônibus, seja por dispositivos do Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning Systems* - GPS), *beacons* Bluetooth [3] ou até mesmo por identificação por radiofrequência (*Radio-Frequency Identification* - RFID) [4]. Apesar de serem amplamente difundidas, essas tecnologias apresentam deficiências operacionais e dificuldades de implementação [5]–[8]. Uma das alternativas possíveis para superar essas desvantagens e complementar os métodos atualmente utilizados seria a Comunicação por Luz Visível (*Visible Light Communication* - VLC), que utiliza Diodos Emissores de Luz (LEDs) modulados como transmissores [9] e [10]. Desta forma, seria possível aproveitar a infraestrutura de iluminação pública existente como meio de transmissão de dados.

No entanto, novos aplicativos ou tecnologias exigem ambientes experimentais para validar seu uso. Usualmente conhecidos como *test beds*, estes ambientes devem fornecer transparência tecnológica para a comunidade de pesquisa, com modelos de utilização para a rápida implementação do experimento planejado, instruções sobre como executá-lo e informações para que se verifique sua adequação para o propósito em questão [11] e [12].

Artigo submetido em 05 de Agosto de 2019. Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob a concessão 870235 / 1997-4.

Renata M. Marè: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (email renata.mare@usp.br).

Claudio L. Marte: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (email claudio.marte@usp.br).

Carlos E. Cugnasca: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (email carlos.cugnasca@usp.br).

Osvaldo Gogliano, Sobrinho Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (email ogogli@usp.br).

Alessandro S. dos Santos: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (email alesan@ipt.br).

Este artigo apresenta uma proposta de metodologia para testes de viabilidade técnica e avaliação de aplicações de VLC no contexto de ITS utilizando *test beds*. Ele relata os métodos e tecnologias utilizados para realizar um experimento relacionado à verificação de desempenho de um sistema de comunicação entre Infraestrutura e Veículo (I2V) baseado em luz visível, aplicado ao contexto de ITS, mais especificamente entre luminárias públicas de LED (como transmissores) e ônibus (com receptores embarcados) circulando em faixas exclusivas de túneis, a fim de atender a algumas das características de eficiência deste modal.

II. CONCEITUAÇÃO

Apresentam-se nesta seção, os principais conceitos envolvidos no experimento realizado.

A. Comunicação por Luz Visível

A VLC é uma das alternativas de Comunicação Ótica Sem Fio (*Optical Wireless Communication* - OWC). Nela, utilizam-se LEDs como transmissores de dados, aproveitando-se de uma peculiaridade destes componentes: a possibilidade de modulação da luz em altas velocidades, sem causar danos ou desconforto aos seres humanos. Uma variedade de dispositivos ópticos, como fotodiodos ou câmeras, podem atuar como receptores [13]–[15]. Os LEDs têm características mais sustentáveis quando comparados a outras tecnologias de iluminação, como eficácia luminosa superior e vida útil mais longa. Estimativas sugerem que eles podem atingir 200 lm/W em 2025 e que sua vida útil atinja 40.000 horas [16]. Devido a isso, observa-se a ampla utilização de LEDs em países como China, Índia, Estados Unidos, Canadá, Austrália, bem como na União Europeia e no Reino Unido. O Brasil segue essa tendência. A adoção de LEDs em aplicações de iluminação pública, semáforos e na indústria automotiva têm atraído a atenção da comunidade científica para novas possibilidades de aplicação de VLC no contexto de ITS, tanto em comunicação Veículo para Veículo (V2V), quanto em comunicação Veículo para Infraestrutura para Veículo (V2I2V) [17].

A VLC é considerada uma alternativa complementar a outros sistemas de comunicação sem fio, contribuindo para atender a demanda crescente por conectividade, que deve aumentar 10 vezes nos próximos cinco anos devido à disseminação de dispositivos móveis e da Internet das Coisas [18]. Algumas vantagens da VLC em relação à comunicação por radiofrequência são a capacidade de operar simultaneamente a esta, sem interferências, e o espectro de frequências disponível, que é cerca de 10.000 vezes superior e não regulado [19] e [20]. Em relação às suas desvantagens (dependendo do tipo de aplicação), podem-se mencionar as distâncias de comunicação mais curtas (de 1 a 100 m) e as taxas de transferência de dados (de poucos kbit/s a 96 Mbit/s) [20], as possíveis implicações do ângulo de visada entre transmissor e receptor e sua suscetibilidade ao ruído de fundo (outras fontes de luz), bem como a condições climáticas e presença de material particulado em suspensão [21].

No entanto, no contexto de ITS, todas essas questões são alvos de investigação. Como exemplos, podem-se citar: a proposta de sistemas híbridos de radiofrequência e de luz, buscando aproveitar o melhor das duas tecnologias [22]; a

aplicação de filtros ópticos nos fotodiodos, visando evitar sua saturação pela iluminação incidente [23]–[25]; o uso de matrizes de LED como transmissores e câmeras de alta velocidade como receptores, explorando seu potencial técnico na identificação de diferentes fontes de luz. Além disso, há uma proliferação de estudos que avaliam a aplicação da VLC para fins de posicionamento, tanto em locais abertos quanto fechados [26]–[28].

Com relação à normatização, destaca-se a norma IEEE 802.15.7-2018 [20]. Em seu escopo, definem-se seis tipos de camadas físicas, considerando-se a taxa de transmissão de dados desejada, o tipo da instalação (interna ou externa), as características do conjunto fonte luminosa/receptor e das técnicas de codificação e modulação de luz empregadas. Considerou-se neste trabalho a camada do tipo PHY I, com modulação *On-Off Keying* (OOK) e codificação Manchester, que permite velocidades de transmissão entre 11,67 e 100 kbps e destinada a uso externo.

Na modulação OOK, a presença ou ausência de uma portadora por determinado intervalo de tempo corresponde a um valor binário um (1) ou zero (0). Sua utilização direta para a transmissão dos dados causaria variação contínua na intensidade da fonte luminosa, pois uma maior quantidade de bits com valor 1 no sinal transmitido levaria a um aumento da intensidade luminosa média e vice-versa. Com a codificação Manchester, os valores binários 0 e 1 correspondem a transições de nível do sinal. Na metade do intervalo de tempo necessário para a transmissão de um bit, a ocorrência de uma transição de 0 para 1 corresponde ao valor binário 1. Já a transição de 1 para 0 corresponde ao valor binário 0 [29]. Com isso, as somas dos tempos em que o nível de portadora permanece nos valores alto ou baixo são iguais e a intensidade luminosa média não sofre variação em função do conteúdo dos dados transmitidos. Outra vantagem reside na simplicidade de sua implementação: uma operação *exclusive-or* (XOR) entre o sinal de dados e um sinal de *clock*, gera a codificação (Fig 1).

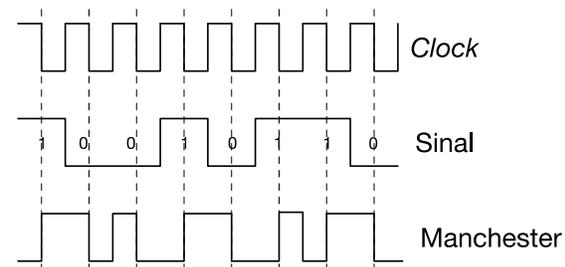


Fig. 1. Codificação Manchester sobre OOK [28].

B. Sistemas Inteligentes de Transporte

Entre as cinco categorias de sistemas ITS mais demandadas e implementadas em todo o mundo está aquela denominada Sistema de Transporte Público Avançado (*Advanced Public Transport System*, APTS) [30] e [31]. Os sistemas APTS, que se enquadram na aplicação aqui proposta, empregam tecnologias no planejamento, programação e gestão do transporte público, com o objetivo de aumentar sua eficiência operacional e segurança na gestão da frota e dos serviços prestados. Os exemplos incluem o fornecimento de informações em tempo real aos passageiros, sistemas automáticos de localização de veículos, notificações de

chegada de ônibus e priorização de semáforos. A priorização ativa ou adaptativa de semáforos pode vir a ser uma aplicação que utilizará o VLC mais intensamente, pois necessita de comunicação local entre o ônibus e o controlador de semáforos para a detecção do ônibus e previsão do momento de sua chegada ao cruzamento. Usualmente essa detecção ocorre por meio de *transponders* e por GPS, exigindo a instalação de antenas de radiofrequência para a comunicação com os *transponders*, e uma comunicação de alto nível entre o Operador de Transporte Público e o Operador de Trânsito para usar o posicionamento via GPS. Após o estabelecimento dessa comunicação, as principais estratégias são:

- (i) *Extensão do estágio verde*: promove-se a extensão do tempo de luz verde (*green time*) no final do estágio de passagem do veículo detectado;
- (ii) *Antecipação do estágio verde*: aloca-se um tempo de verde adicional no início do estágio de passagem do veículo detectado, antecipando o início do estágio verde;
- (iii) *Interrupção do estágio vermelho*: insere-se um curto período de verde durante o vermelho, na aproximação do veículo detectado, enquanto os veículos em conflito na via são forçados a parar;
- (iv) *Supressão de estágios*: pode-se promover a remoção de um ou mais estágios de movimentos de baixa demanda em um dado ciclo, para priorizar um determinado movimento ou a passagem de um veículo de transporte coletivo público;
- (v) *Interrupção do estágio verde*: quando o ônibus detectado encontra-se longe da intersecção, interrompe-se o período de passagem verde na rota priorizada. Assim, a probabilidade deste veículo atingir a intersecção no próximo período verde aumenta, pois durante o tempo que o ônibus leva para se deslocar do ponto de detecção até o semáforo, a fase vermelha do veículo já pode ter mudado para verde.

A norma ISO 14813 - *Intelligent Transport Systems*, em sua Parte 1 apresenta 13 domínios de serviços de ITS [32]. Este trabalho está relacionado ao domínio Transporte Público. As aplicações associadas a este domínio visam a uma operação mais eficiente do transporte público e ao fornecimento de informações ao operador e aos passageiros. O grupo de serviços potencialmente beneficiado diretamente por esta aplicação será o de Gerenciamento do Transporte Público, que envolve a operação, o planejamento e o gerenciamento de operações de transporte público, usando informações de localização e da condição do veículo em tempo real.

C. Test Bed para Aplicações em ITS

Para atender às crescentes demandas por testes de comunicação V2V, V2I e I2V, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo – Brasil, criou o Laboratório de Interoperabilidade de Equipamentos ITS, Centro de Tecnologia da Informação, Automação e Mobilidade (CIAM) [33]. O CIAM fornece soluções tecnológicas e estratégicas em Tecnologia da Informação e Comunicação, com ênfase em ITS. O laboratório permite a avaliação de tecnologias de comunicação sem fio entre veículo e infraestrutura e entre veículos, inclusive em altas velocidades. Isso é possível por meio de um circuito oval em plano vertical, com um pequeno suporte (carro de teste) que é movimentado por uma correia,

cujo movimento é regulado por um motor a ela conectado. A esse carro de teste é possível adicionar dispositivos inerentes aos testes a serem realizados. O motor é controlado por software proprietário que define a velocidade da correia. Uma vez acionado o motor, a correia começa a se deslocar, levando consigo o carro de teste (Fig. 2). Utiliza-se intensamente este laboratório para testes de aprovação de sistemas de pedágio baseados na tecnologia RFID. Desta forma, o *test bed* aqui proposto leva em conta a movimentação do carro de teste, condição não usual em outros estudos.

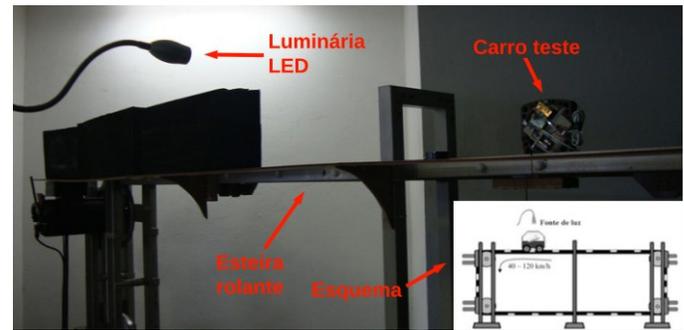


Fig. 2. Esquema e foto do *test bed*

D. Objetivo da Pesquisa

O objetivo da pesquisa realizada no *test bed* foi validar uma metodologia de testes para sistemas VLC aplicados ao contexto de ITS. Para tal, verificou-se o desempenho de um sistema de comunicação I2V baseado em luz visível. Neste teste, destacou-se a transmissão de coordenadas posicionais a partir de luminárias públicas a LED para ônibus que trafegam em túneis, uma vez que essas informações, essenciais ao planejamento e gestão da frota, não estão disponíveis nestes locais devido à falta de recepção do sinal de satélite. Os resultados obtidos neste teste serão úteis para o desenvolvimento do sistema em escala real, uma etapa complementar já em andamento.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, descrevem-se os materiais e métodos empregados nesta pesquisa.

A. Equivalência do Protótipo

No protótipo em pequena escala, utilizou-se como transmissor uma luminária LED *Li-Fi Beacon* [34], com 1,3 W de potência, modulada pela técnica OOK, a mesma a ser empregada no protótipo em escala real. Trata-se de uma luminária que utiliza a tecnologia VLC, transmitindo um código constante. Em escala real, será utilizada a luminária pública LED *Maestra* [35], com potência de 150 W e *driver* modificado para modulação OOK (Fig. 3). Baseou-se a equivalência entre os protótipos no conceito de iluminância, que é a razão entre o fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz e a superfície iluminada a uma certa distância da fonte [36].

Previamente, realizaram-se testes de iluminação com a luminária *Li-Fi Beacon* no Laboratório de Fotometria do

Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo [37], para a obtenção de informações técnicas relevantes à equivalência: distância do teste entre a luminária e o equipamento de leitura, 3,15 m; ângulo de irradiância, 37,84°; iluminância, 8,02 lx. O fabricante da luminária pública Maestra realizou um estudo de iluminação que permitiu que se determinasse o valor máximo de iluminância para a aplicação proposta em escala real, 38,00 lx [28].

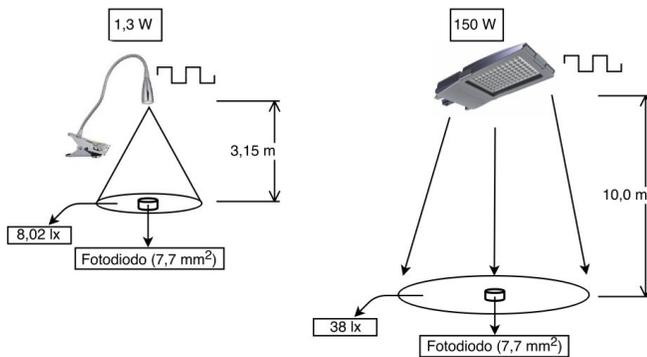


Fig. 3. Esquema de equivalência entre sistemas VLC: protótipo em escala reduzida (esquerda) e escala real (direita).

Como receptor (Fig. 4), desenvolveu-se um pequeno circuito eletrônico incorporando um fotodiodo SFH2701, de alta sensibilidade à luz visível e alta velocidade. Um amplificador operacional em transimpedância converte a corrente gerada pelo fotodiodo em tensão amplificada. Um filtro passa-banda (passa-alta), composto por resistor e capacitor, atenua os sinais com frequência abaixo à sua frequência de corte. A partir da diferença de potencial entre os terminais de alimentação (entrada), um amplificador operacional comparador gera um sinal de saída, função deste resultado. Na saída, um limitador de tensão, protege o microcontrolador na ocorrência de um eventual surto de tensão [28].

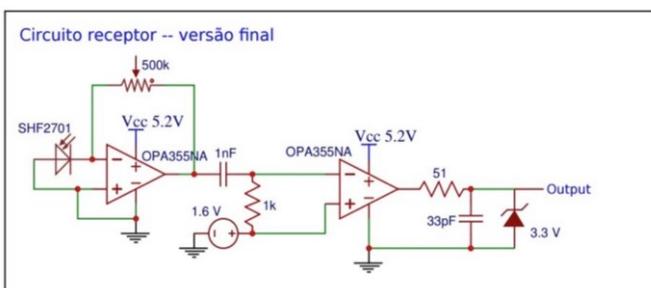


Fig. 4. Diagrama esquemático do circuito receptor [27].

Conectou-se este circuito diretamente aos pinos *General Purpose Input Output* (GPIO) de um microcomputador Raspberry Pi 2 [38] dotado de comunicação WiFi e com software embarcado desenvolvido em C++ [39]. Este microcomputador foi o responsável pela transmissão das leituras, realizadas a cada 100 ms, ao *notebook* encarregado das suas gravações. A literatura traz um grande número de soluções para os circuitos eletrônicos. Como exemplo, cita-se o trabalho de Matos *et al.* [40].

Em escala real, a distância entre o transmissor e o receptor na aplicação proposta será de cerca de 7 m para iluminância máxima, uma vez que a luminária será instalada a 10 m de altura e o fotodiodo no teto do ônibus, a cerca de 3 m de altura. Dado que a iluminância é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte, calcularam-se os valores máximo e mínimo de iluminância para a aplicação real (77,55 lx e 28,53 lx, respectivamente), bem como a medição do segmento total iluminado (2 x 10,5 m ou 21,0 m), que constitui a janela de comunicação (Fig. 5).

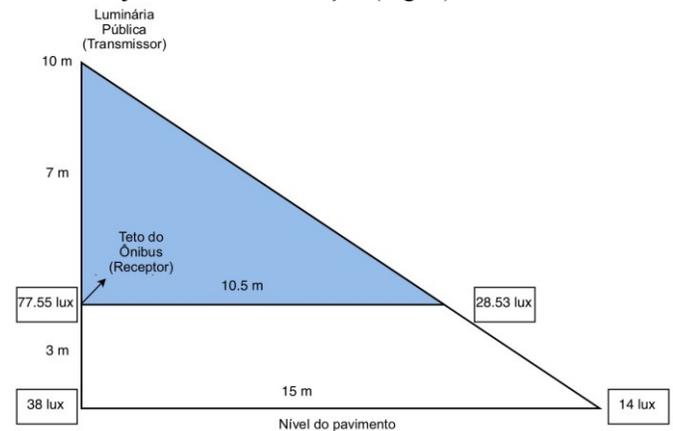


Fig. 5. Distância (Tx - Rx) e valores de iluminância: escala real.

O protótipo em escala real deverá fornecer a iluminância máxima de 77,55 lx quando houver o alinhamento perfeito entre o transmissor e o receptor. A partir daí, foi possível calcular-se a distância entre eles, no protótipo em escala reduzida (1,01 m) (Tabela I).

TABELA I
DISTÂNCIA (TX - RX) E VALORES DE ILUMINÂNCIA

Escala Real	
Distância (Tx - Rx) (m)	Iluminância (lx)
10,00	38,00
7,00	77,55
Escala Reduzida	
Distância (Tx - Rx) (m)	Iluminância (lx)
3,15	8,02
1,01	77,55

Utilizando-se o ângulo de irradiância da luminária *Li-Fi Beacon*, calculou-se a janela de comunicação, 2 x 0,79 m ou 1,58 m (Fig. 6).

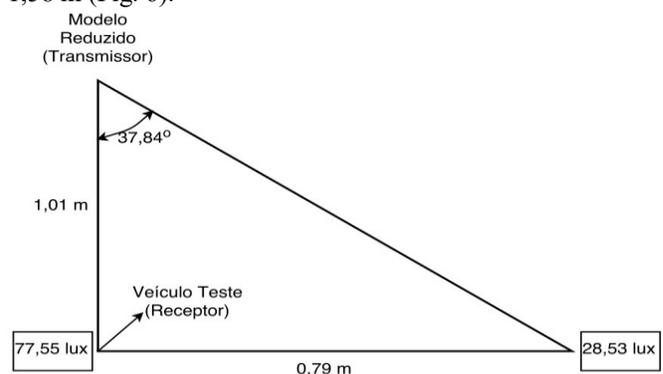


Fig. 6. Distância (Tx - Rx) e valores de iluminância: escala reduzida.

Para configurar-se adequadamente o cenário de teste, avaliou-se previamente qual seria a velocidade do carro de teste, equivalente ao caso real mais crítico, usando-se como parâmetro a velocidade máxima permitida em uma faixa exclusiva de ônibus na cidade de São Paulo, Brasil (à época), 60 km/h. Foi necessário determinar-se o tempo de comunicação (ou janela de comunicação em segundos), parâmetro utilizado para a equivalência. A 60 km/h (ou 16,67 m/s), em escala real, a janela de comunicação para 21,0 m (Fig. 5 – 2 x 10,5 m) seria de 1,26 s. Portanto, para uma janela de comunicação de 1,26 s a 1,58 m (Fig. 6 – 2 x 0,79 m), seria necessária uma velocidade de 1,25 m/s ou 4,5 km/h para o carro de teste.

Observa-se, na parte superior da Fig. 7, o microcomputador Raspberry Pi 2 dotado de adaptador para conexão WiFi instalado em um dos lados do carro de teste. Na parte inferior, vê-se o circuito receptor instalado no lado oposto do carro de teste.

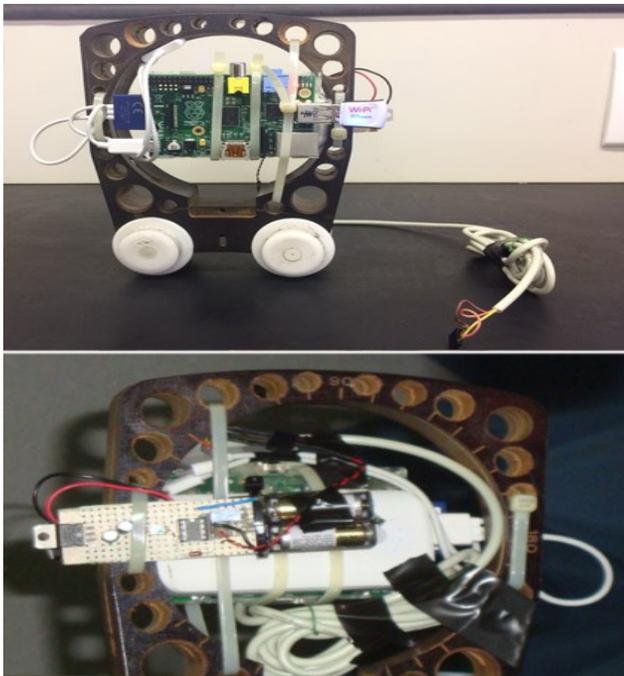


Fig. 7. Carro de teste equipado com microcomputador Raspberry Pi (acima); circuito do receptor acoplado ao outro lado do carro de teste (abaixo).

Quanto aos testes realizados, não foi possível estabelecer-se a comunicação à distância de 1,01 m entre o transmissor e o receptor (Fig. 6), o que levou a uma aproximação gradual da luminária até que uma comunicação efetiva se estabelecesse. Isso ocorreu a 0,40 m. Tal comportamento pode ser justificado, em parte, com base no limite de tensão *General Purpose Input-Output* (GPIO) do Raspberry Pi 2, aproximadamente 2,0 V. Quanto maior a distância entre o transmissor e o receptor, menor a tensão de saída do circuito, uma vez que a intensidade total de luz incidente no fotodiodo diminui. Qualquer valor de tensão próximo de 2,0 V estaria em uma região de meta-capacidade da porta digital, o que poderia representar um nível lógico baixo, em vez de um nível alto ou vice-versa. A aproximação do transmissor ao receptor tornou os sinais lógicos mais confiáveis, resolvendo a

determinação dos respectivos níveis lógicos para a incidência luminosa. Efetivamente, a aproximação da luminária de teste de 1,0 m para 0,4 m diminuiu a janela de comunicação, já que a velocidade do carro de teste se manteve constante. Essa diminuição certamente contribuiu para um aumento da Taxa de Erro de Bit (*Bit Error Rate* – BER), pois os erros causados pela entrada e saída do carro de teste na janela de comunicação seriam percentualmente menores, caso a zona original fosse mantida. Com a aproximação do transmissor ao receptor, a janela de comunicação passou de uma extensão aproximada de 1,58 m para cerca de 0,62 m.

Uma vez estabelecida a comunicação, os dados foram coletados em diferentes cenários, ou seja, com a presença de diferentes ruídos de fundo causados por outras fontes de luz naturais e artificiais no ambiente. Como o cenário simulado foi para uma aplicação interna (túnel), não se considerou a incidência direta de luz solar.

Utilizou-se um luxímetro Testo 435 [41] para medir a intensidade da luz ao lado do fotodiodo em cada cenário: o fotodiodo foi alinhado com a luminária *Li-Fi Beacon*, e o sensor de luz foi posicionado próximo ao fotodiodo, primeiro com a luminária desligada e depois com a luminária ligada (Tabela II).

TABELA II
DIFERENTES CENÁRIOS DE TESTE E INTENSIDADES DE LUZ NO AMBIENTE E PERTO DO FOTODIODO (LX)

Cenário	<i>Li-Fi Beacon</i> desligado	<i>Li-Fi Beacon</i> ligado
Janelas e persianas fechadas, luzes desligadas	12	452
Janelas e persianas fechadas, lâmpadas fluorescentes acesas	61	545
Janelas e persianas fechadas, lâmpadas fluorescentes e a vapor de mercúrio ligadas	116	672
Janelas e persianas abertas, lâmpadas fluorescentes e a vapor de mercúrio ligadas	196	832

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir apresentam-se os resultados e algumas discussões correlatas.

A. *Teste de Desempenho de Campo*

Previamente aos testes, realizaram-se medições de intensidade de luz em alguns pontos da cidade de São Paulo (utilizando-se o mesmo luxímetro Testo 435), onde há deficiências na recepção do sinal GPS: os túneis José Roberto Fanganiello Melhem, Daher Cutait e Anhangabaú (Tabela III).

A Tabela III mostra os valores médios de dez leituras de intensidade luminosa, tomadas na região central dos túneis (a pior posição para receber sinal de satélite - coordenadas de posicionamento) e a 1,20 m do solo.

TABELA III
MEDIÇÕES EM TÚNEIS (SÃO PAULO-BRASIL)

Túnel	Valores médios (lx)	Extensão (m)
José Roberto Fanganiello Melhem	287,5	360
Daher Cutait	108,9	1045
Anhangabaú	179,5	544

Comparando-se os valores da intensidade da luz ambiente medida em laboratório com os valores médios nos túneis, pode-se inferir que seria possível estabelecer a comunicação entre as luminárias públicas e o receptor no teto do ônibus, com uma distância em torno de 2,90 m (valor real correspondente a 0,40 m no laboratório), utilizando-se o mesmo circuito considerado no protótipo. Se justifica essa conclusão, pois a intensidade máxima de luz próxima ao fotodiodo medido em laboratório atingiu 196 lx e os valores médios nos túneis foram inferiores a esse valor (exceto no túnel José Roberto Fanganiello Melhem). Isso sugere que o ruído de fundo em dois dos túneis acima mencionados seria menor do que aquele medido no laboratório e, na prática, causaria menor degradação na comunicação, já que o receptor estaria mais próximo do transmissor (no teto do ônibus, a 3,0 m, e não a 1,2 m, altura usada nas medições em túneis).

Além disso, avaliou-se qual volume de dados poderia ser transmitido pelo sistema proposto para a transmissão de um par de coordenadas georreferenciadas, por exemplo:

Latitude: -23,533773 Longitude: -46,625290

De acordo com o padrão IEEE 754, para representar números binários de ponto flutuante [42], essas coordenadas seriam representadas como:

11000001101111000100010100101011 (-23,533773)
11000010001110101000000010011100 (-46,625290)

Isso exigiria 32 bits ou 4 bytes por coordenada, totalizando 8 bytes. Considerando-se que a codificação Manchester pode atingir uma taxa de transmissão máxima de 100 kbit/s na modulação OOK [20], para um ônibus a 60 km/h, uma janela de comunicação de 1,26 s permite a transmissão de 126 kbits ou 15,75 kbytes, um volume bem acima do necessário. As informações adicionais presentes nos pacotes de dados padrão IEEE 802.15.7 [20] não foram consideradas, porque a folga presente é ampla. Portanto, esse sistema poderia agregar outras informações úteis no contexto do ITS, como por exemplo informações de contexto (condições de tráfego, adversidades climáticas, etc.). A Tabela IV mostra os valores médios da taxa de erro de bit (BER).

Estes valores foram obtidos por meio de medições correspondentes a dez passagens do veículo de teste em cada cenário. Como o *string* de dados transmitido pela luminária é constante, um software desenvolvido para essa finalidade varreu os resultados obtidos, verificando a exatidão de cada valor obtido, bit a bit, o que permitiu o cálculo do BER. Em relação aos valores médios, observa-se uma variação entre 0,0866% a 1,3329%, ou 0,000866 a 0,013329.

TABELA IV
CENÁRIOS E VALORES MÉDIOS DE BER

Cenário	Janelas e persianas fechadas, luzes apagadas	Janelas e persianas fechadas lâmpadas apagadas	Janelas e persianas fechadas, lâmpadas fluorescentes e a vapor de mercúrio acesas	Janelas e persianas abertas, lâmpadas fluorescentes e a vapor de mercúrio acesas
BER médio (%)	0,1203	0,0866	0,5726	1,3329

Embora um valor limite não esteja especificado na norma IEEE 802.15.7, encontram-se na literatura diversas referências a um BER máximo de 10^{-6} para comunicação óptica em espaço livre (*Free Space Optical Communication* - FSO), em tempo real [43]–[46]. No entanto, é necessário verificar as demandas reais do usuário de um determinado sistema de comunicação e sua percepção quanto à qualidade do serviço prestado. Isso porque essa medida pode levar a ajustes relevantes desnecessários no sistema de comunicação. Nesta proposta de aplicação, focada na transmissão de coordenadas posicionais, que não implicam na coleta e transmissão de dados relacionados à segurança do tráfego, dos usuários, e/ou da manutenção do funcionamento do sistema de transporte público, uma taxa de BER maior do que o padrão acima poderia ser aceita, pois os resultados obtidos demonstraram a existência de uma margem significativa para a transmissão, mesmo no pior caso (ônibus a 60 km/h). O BER é influenciado por vários fatores, incluindo as características técnicas do transmissor e do receptor, que podem afetar a intensidade do sinal transmitido e recebido. Considerando-se o perfeito alinhamento entre eles, o BER depende de sua distância, já que a intensidade da luz no receptor é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Além disso, é influenciado pela divergência do feixe de luz transmitida e pela quantidade de luz coletada pelo receptor (*Field of View* – FOV) [47]. Para otimizar a comunicação na aplicação proposta, seria possível avaliar-se o uso de lentes no transmissor e/ou receptor, a fim de alterar-se o campo de visão (FOV) entre eles. Deve-se observar que o circuito receptor utilizado está na fase de pesquisa e ainda não atingiu as condições ideais de operação. Ainda em relação aos resultados obtidos, observa-se que o menor valor médio do BER ocorreu no cenário de maior ruído de fundo. Como discutido acima, qualquer valor de tensão de saída menor que o limite lógico do microcontrolador pode impedir a detecção da modulação. Muito provavelmente, a maior incidência de luz no fotodiodo observada neste cenário gerou maiores tensões de saída, permitindo a detecção de modulação de sinal com menor taxa de erro. É importante ressaltar que outro elemento que pode ter levado a esses valores de BER é a utilização do sistema operacional Linux no módulo Raspberry PI 2, não adequado a aplicativos em tempo real, pois seu *kernel* não prioriza a minimização do tempo em operações críticas. Ao contrário, tenta otimizar o rendimento médio do sistema [48]. Na prática, outros processos do próprio sistema operacional podem ser

executados simultaneamente ao software de medição o que, eventualmente, pode impedir a obtenção das leituras com o intervalo de 100 ms.

Finalmente, vale lembrar que o objetivo do trabalho foi a validação da metodologia aplicada. A otimização dos elementos de hardware e software utilizados poderá levar a melhores resultados em estudos futuros.

V. CONCLUSÃO E PESQUISA FUTURA

Este trabalho mostrou a viabilidade de uma metodologia para pesquisas envolvendo o uso de VLC em Sistemas ITS considerando a comunicação com veículos em movimento. Por meio dela, podem-se simular e verificar a possibilidade da transmissão confiável de dados entre luminárias públicas a LED e ônibus urbanos trafegando a velocidades de até 60 km/h em faixas exclusivas.

Os testes realizados com o protótipo em escala reduzida demonstraram que o sistema de comunicação de luz visível proposto seria viável em escala real. Os resultados foram importantes para o desenvolvimento e avaliação de um sistema equivalente em escala real, que encontra-se em desenvolvimento e será objeto de um artigo futuro.

Embora tenha demonstrado a possibilidade de usar a tecnologia VLC em uma aplicação específica em ITS, a metodologia utilizada mostrou-se viável e abre uma gama de opções de teste para outras aplicações VLC relacionadas a V2V (por exemplo, sinais de alerta em cenários de *platooning*) e comunicação V2I2V (por exemplo, comunicação *half* ou *full duplex* entre veículos e semáforos), para atender aos vários domínios ITS expressos na norma ISO 14813.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Auer, S. Feese, e S. Lockwood, "History of Intelligent Transportation Systems", United States Department of Transportation. Washington, USA, 2016. [Online]. Available: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/30826>.
- [2] B. Williams, *Intelligent Transport Systems Standards*. London: Artech House, 2008, pp. 836.
- [3] H. Sawant, Jindong Tan, Qingyan Yang, e Qizhi Wang, "Using Bluetooth and sensor networks for intelligent transportation systems", in *The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE Cat. No.04TH8749)*, Washington, USA, pp. 767–772.
- [4] C. Pedraza, F. Vega, e G. Manana, "PCIV, an RFID-Based Platform for Intelligent Vehicle Monitoring", *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 10, no 2, pp. 28–35, 2018.
- [5] H. Al-Deek, A. Sandt, A. Alomari, e O. Hussain, "A technical note on evaluating the effectiveness of bus rapid transit with transit signal priority", *J. Intell. Transp. Syst.*, vol. 21, no 3, pp. 227–238, mai. 2017.
- [6] T. Islam, H. L. Vu, N. H. Hoang, e A. Cricenti, "A linear bus rapid transit with transit signal priority formulation", *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 114, pp. 163–184, jun. 2018.
- [7] L. Peron, "Contribuição metodológica para aplicação de prioridade semafórica condicional em corredores de ônibus.", M.Sc. dissertação, PTR, USP, São Paulo, SP, 2015. [Online]. Available: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-05112015-103715/pt-br.php>
- [8] Z. Ye e M. Xu, "Decision Model for Resolving Conflicting Transit Signal Priority Requests", *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 18, no 1, pp. 59–68, jan. 2017.
- [9] S. Rehman *et al.*, "Visible Light Communication: A System Perspective—Overview and Challenges", *Sensors*, vol. 19, no 5, pp. 1153, mar. 2019.
- [10] N. Kumar, N. Lourenço, D. Terra, L. N. Alves and R. L. Aguiar, "Visible light communications in intelligent transportation systems," 2012 *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Alcalá de Henares, 2012*, pp. 748-753. doi: 10.1109/IVS.2012.6232282
- [11] M. Chernyshev, Z. Baig, O. Bello, e S. Zeadally, "Internet of Things (IoT): Research, Simulators, and Testbeds", *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no 3, pp. 1637–1647, jun. 2018.
- [12] A. Santos, C. Marte, L. Yoshioka, J. Cintra, e C. Fontana, "Integration of Wireless Sensor Network to Intelligent Transportation System for Environmental Monitoring", *WSEAS Trans. on Systems*, vol. 13, pp. 10, 2014.
- [13] M. V. Bhalerao, S. S. Sonavane, e V. Kumar, "A Survey of Wireless Communication Using Visible Light", *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, pp. 10, 2013.
- [14] M. A. Ahmed, "Li-Fi: The Future Bright Technology in Wireless Communication". *Int. Journal of Adv. Res. in Comp. Science and Soft. Eng.* The University of Leeds, UK. vol. 6, no 3, pp. 111-115, 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/303364044_LiFi_The_Future_Bright_Technology_in_Wireless_Communication.
- [15] N. Kumar, L. N. Alves, e R. U. I. L. Aguiar, "Employing Traffic Lights as Road Side Units for Road Safety Information Broadcast", Pensilvania, USA: IGI Global. pp. 143-158. 2015.
- [16] S. Haruyama, "Visible light communication using sustainable LED lights", in *ITU Kaleidoscope: Building Sustainable Communities (K-2013)*. Kyoto, Japão, 2013. pp. 1–6.
- [17] A. Belle, M. Falcitelli, M. Petracca, e P. Pagano, "Development of IEEE802.15.7 based ITS services using low cost embedded systems", in *13th International Conference - ITS Telecommunications (ITST)*, 2013, vol. 5–7, pp. 419-425.
- [18] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019". p. 42, 2015.
- [19] O. Ergul, E. Dinc, e O. B. Akan, "Communicate to illuminate: State-of-the-art and research challenges for visible light communications", *Phys. Commun.*, vol. 17, pp. 72–85, 2015.
- [20] IEEE Computer Society, "IEEE 802.15.7-2018 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications". IEEE, New York, pp. 405, 2018.
- [21] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, e S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications - System and Channel Modelling with MATLAB*. Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2013.
- [22] S. Ishihara, R. V. Rabsatt, e M. Gerla, "Improving reliability of platooning control messages using radio and visible light hybrid communication", in *2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2015, pp. 96–103.
- [23] Y. Kim e Y. Chung, "Experimental outdoor visible light data communication system using differential decision threshold with optical and color filters", *Opt. Eng.*, vol. 54, no 4, pp. 4, 2015.
- [24] H. C. Yeon e O. Se-bin, "Efficient optical filtering for outdoor visible light communications in the presence of sunlight or artificial light", in *Int. Symp. on Intelligent Signal Proc. and Comm. Systems (ISPACS)*, 2013, pp. 749–752.
- [25] S. Arnon, "Optimised optical wireless car-to-traffic-light communication", *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 25, no 6, pp. 660–665, 2014.
- [26] B. W. Kim e S. Y. Jung, "Vehicle Positioning Scheme Using V2V and V2I Visible Light Communications" in *83rd Vehicular Technology Conference*, Nanjing, China, 2016, p. 1–5.
- [27] T.-H. Do e M. Yoo, "An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems", *Sensors*, vol. 16, no 5, pp. 678, 2016.
- [28] R. M. Marè, "Proposta e avaliação de um sistema complementar de posicionamento baseado em comunicação por luz visível aplicado a sistemas inteligentes de transporte", Ph.D. tese, PCS, USP, São Paulo, SP, 2017. [Online]. Available: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-26022018-144410/pt-br.php>
- [29] S. Rajagopal, R. Roberts, e S.-K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no 3, pp. 72–82, mar. 2012.
- [30] Institute of Transportation Engineers, "An Overview of ITS Standards and Protocols", 2017. [Online]. Available: <https://www.ite.org/technical-resources/standards/its-standards-and-protocols/>. [Acessado: 10-maio-2017].
- [31] U. S. Department of Transportation, "RITA | ITS | Welcome to the Benefits Database", 2018. [Online]. Available: <https://www.itsbenefits.its.dot.gov/its/benecost.nsf/BenefitsHome>.
- [32] International Organization for Standardization, *ISO 14813-1:2015*

Intelligent transport systems -- Reference model architecture(s) for the ITS sector -- Part 1: ITS service domains, service groups and services. Geneva: International Organization for Standardization, 2015, p. 88.

- [33] Instituto de Pesquisas Tecnológicas, "CIAM - Centro de Tecnologia da Informação, Automação e Mobilidade", 2016. [Online]. Available: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CIAM.
- [34] Oledcomm, "Oledcomm Lize", 2007. [Online]. Available: <http://www.oledcomm.net>.
- [35] Ilumatic S/A, "Luminária LED Maestra", 2014. [Online]. Available : <http://www.ilumatic.com.br/produtos.asp?codCategoria=40&codSubCategoria=103>.
- [36] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 5101:2012 - Iluminação pública — Procedimento". ABNT, pp. 42, 2012.
- [37] Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo - IEE, "Laboratório de Fotometria", 2016. [Online]. Available: <http://200.144.182.130/iee/?q=node/115>.
- [38] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi — Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi", 2018. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>. [Acessado: 14-ago-2017].
- [39] B. Stroustrup. "The C++ Programming Language". Pearson Educ. Inc. 4th Ed. 2013.
- [40] D. Matos, G.B. Vitor, D.B.Karolak, "Desenvolvimento de uma comunicação VLC aplicada à sistemas 12V nas emergentes cidades inteligentes", *XXII Congresso Brasileiro de Automática, CBA2018, ISSN: 2525-8311 doi:10.20906/CPS/CBA2018-0154*.
- [41] Testo, "Testo 435 - Multifunction Measuring Instrument", 2016. [Online]. Available: <https://media.testo.com/media/fe/b9/3033a7ab04ea/testo-435-Instruction-manual.pdf>.
- [42] IEEE, *IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, IEEE Std 754-2008*, p. 70, 2008.
- [43] F. Deicke, W. Fisher, e M. Faulwasser, "Optical wireless communication to eco-system", in *Future Network & Mobile Summit (FutureNetw)*, 2012, pp. 1–8.
- [44] S. Kitano, S. Haruyama, e M. Nakagawa, "LED road illumination communications system", in *IEEE 58th Vehicular Technology Conference*, 2003, vol. 5, pp. 3346-3350.
- [45] C. Premachandra *et al.*, "Outdoor Road-to-Vehicle Visible Light Communication Using On-Vehicle High-Speed Camera", *Int. J. Intell. Transp. Syst. Res.*, pp. 1–9, 2014.
- [46] N. Kumar, "Visible Light Communication Systems for Road Safety Applications", Ph.D. tese, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/15568535.pdf>
- [47] M. Abualhoul, M. Marouf, O. Shagdar, e F. Nashashibi, "Enhancing the Field of View Limitation of Visible Light Communication-based Platoon". in *6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications: WIVEC 2014*, Vancouver, Canada, 2014.
- [48] C. Scordino e G. Lipari, "Linux and Real-Time: Current Approaches and Future Opportunities", in *International Congress ANIPLA*, 2006. [Online]. Available: http://retis.sssup.it/~lipari/papers/ANIPLA_scordino_lipari.pdf.



Renata M. Marè é graduada em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Mauá (1985), mestre em Engenharia de Construção Civil e Urbana (2010) e doutora em Engenharia de Computação (2013) pela Escola Politécnica da USP (EPUSP). MBA em Gestão Empresarial pelo Instituto Mauá

de Tecnologia - IMT (2011). Coordenadora e docente no MBA de IoT do IMT e docente convidada do Programa de Educação Continuada (PECE) da EPUSP. Principais áreas de pesquisa: Comunicação Sem Fio por Luz Visível de LED (*Visible Light Communication*), Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transport Systems*), Cidades Inteligentes, Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*).



Claudio L. Marte é graduado em Eletrônica pela Universidade Federal de São Carlos (1985) e em Engenharia Elétrica (Modalidade Eletrônica) (1988), mestre (1994) e doutor em Engenharia Elétrica (2000) pela Escola Politécnica da USP. É professor do Departamento de Engenharia de Transportes (PTR) da

EPUSP, colaborador do ITS Brasil, membro das Comissões de ITS da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da Associação Nacional de Transporte Público (ANTP). Colaborador da Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR) desde 1997, sendo em 2013 o coordenador do Salão de Inovação no 8º Congresso da ABCR. Tem experiência na área de Engenharia de Computação, com ênfase em Arquitetura de Sistemas Distribuídos, atuando nos temas: Sistemas de Informações Geográficas aplicados em Transportes (SIG-T) e Sistemas Inteligentes de Transportes (*Intelligent Transport Systems - ITS*), com ênfase em Transporte Público Coletivo.



Carlos E. Cugnasca é graduado em Engenharia de Eletricidade (1980), mestre em Engenharia Elétrica (1988) e doutor em Engenharia Elétrica (1993) pela Escola Politécnica da USP. É livre-docente (2002) pela EPUSP. É Professor Associado 3 da EPUSP e pesquisador do Laboratório de Automação Agrícola (LAA) do Departamento de Engenharia de Computação (PCS) da EPUSP. Tem experiência na área de Supervisão e Controle de Processos e Instrumentação, aplicadas a processos agrícolas e Agricultura de Precisão, com ênfase nos temas: instrumentação inteligente, sistemas embarcados em máquinas agrícolas, monitoração e controle de ambientes protegidos, redes de controle, Redes de Sensores Sem Fio, computação pervasiva e Internet das Coisas.



Osvaldo Gogliano, Sobrinho é doutor em Engenharia de Computação pela Escola Politécnica da USP. Professor Convidado do Programa de Educação Continuada (PECE) da EPUSP. Professor da Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH) da Universidade de São Paulo (2017-2018). Pesquisador outorgado no Projeto PIPE (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Fapesp) e Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP), intitulado Sistema Monitorar. Principais áreas de pesquisas: Engenharia de Software, Rastreabilidade em Cadeias Produtivas, Redes de Sensores para Monitoramento e Telegestão da Iluminação Pública.



Alessandro S. dos Santos é doutor em Engenharia de Transportes pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, mestre em Ciências da Computação pela Universidade de São Paulo (2003), graduado em Ciências da Computação pela Universidade Federal do Mato Grosso (1997).

É gerente do Laboratório de Automação, Governança e Mobilidade Digital do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, Brasil. É secretário do comitê de ITS da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e colaborador da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP). Campos de pesquisa: redes de computadores, Sistemas Inteligentes de Transporte, Internet das Coisas, P & D com TI e Transporte no European Research Framework.