

Visible Light Positioning and Communication Methods and Their Application in the Intelligent Mobility

Ana Luísa R. Gonçalves, Álvaro H. A. Maia, Mateus R. Santos, Danilo A. Lima e Arthur M. Neto

Abstract—The autonomous mobility field is changing worldwide, mainly due to new technologies developed by different actors. However, there are still open challenges related to vehicle-to-vehicle communication (V2V) and vehicle-to-infrastructure communication (V2I), as well as vehicle localization, a crucial topic in navigation. In this scope, this document reports the study of visible light positioning and communication techniques (VLP and VLC, respectively) to trace the state of the art of these technologies. It seeks their applicability in the field of intelligent mobility to integrate Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) with them. Moreover, we present the current challenges of these technologies in the intelligent vehicles field, mainly in the urban environment. The literature cataloged results justify the application proposal and provide an important resource for those interested in this subject.

Index Terms—VLP, VLC, Intelligent Vehicles, V2V, V2I.

I. INTRODUÇÃO

A ascensão de tecnologias nos dispositivos de iluminação de estado sólido (SSL - *Solid State Lighting*), como os Diodos Emissores de Luz (LED - *Light Emitting Diode*) ocasionou sua popularização na iluminação artificial em vários níveis, desde iluminação residencial à iluminação pública [1]. Isso aconteceu devido, principalmente, à sua alta eficiência, durabilidade e baixo custo de implementação. Em decorrência a essas características, iniciaram-se as pesquisas sobre a utilização da luz de LED na comunicação e posicionamento, temas centrais desta pesquisa.

Os sistemas de Comunicação pela Luz Visível (VLC - *Visible Light Communication*) tiveram suas pesquisas iniciadas devido à demanda crescente de largura de banda para comunicação, uma vez que a oferecida pela frequência de rádio (RF - *Radio Frequency*) está chegando ao seu limite devido ao crescimento populacional. Eles se baseiam na utilização de fotodetectores (sensores de luz, fotodiodos, fototransistores, entre outros) ou sensores de imagem (câmeras fotográficas) e transmissores (LEDs, na maioria das aplicações), pelos quais são transmitidos diversos tipos de dados e mensagens. É importante ressaltar que os sistemas citados cumprem com o objetivo de iluminação tanto quanto de transmissão de dados [2].

Sistemas de localização são aqueles usados para se obter o posicionamento de objetos no espaço por meio de uma série de

técnicas que variam de acordo com o propósito da aplicação. A tecnologia mais utilizada ainda é baseada no Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*) com o GPS (*Global Positioning System*). Entretanto, novas aplicações, conhecidas como microlocalização, vêm requerendo tecnologias mais precisas e que reduzam problemas atrelados ao GPS, tais como a perda de sinal em ambientes internos e a grande interferência em ambientes urbanos pela alta densidade de edificações.

A busca por tecnologias que otimizem sistemas de localização faz-se de grande importância para os serviços de mobilidade nos diferentes modais, inclusive para os veículos autônomos. São diversas as tecnologias em estudo, tais como a localização via frequência de rádio, via *Wi-Fi* e aquela que se faz objeto de estudo desta pesquisa, o Posicionamento pela Luz Visível (VLP - *Visible Light Positioning*) [3] e [4].

As técnicas de comunicação, em conjunto com um processamento de sinais específico para o posicionamento, permitem que um sistema seja capaz de calcular sua localização espacial a partir de diferentes fontes de luz. A literatura indica que a precisão do GPS convencional varia em torno de 10 a 15 metros [5], mas os sistemas de localização para veículos inteligentes precisam alcançar uma precisão ainda maior, seja em ambientes externos ou internos.

O objetivo deste estudo é apresentar uma ampla revisão da literatura sobre os sistemas de VLC e VLP e analisar suas principais técnicas, traçando um comparativo entre elas. Os sistemas foram analisados quanto à sua robustez e aplicabilidade, com foco nas tecnologias associadas à mobilidade inteligente. Por meio de tabelas, foi criada uma base importante para pesquisadores interessados nesses temas.

A Tabela I mostra as contribuições de alguns dos principais estudos da literatura sobre sistemas de luz visível dos últimos anos, ressaltando o diferencial deste trabalho dentro da área. Em [6], [7] e [8] são discutidos os principais sistemas de localização baseados na VLC, sendo [7] e [8] aplicados apenas em ambientes internos. Em [4] é apresentado um estudo aprofundado sobre VLP e suas técnicas de modulação, mas não aborda a tecnologia que a originou, a VLC. Em [9] e [10] discute-se a VLC e seus desafios com maior profundidade, mas abordam rapidamente o VLP e suas técnicas.

Observando a Tabela I, a contribuição desta pesquisa está na abordagem mais ampla dos sistemas de VLC e VLP, em relação às técnicas e componentes mais utilizados nos últimos anos. Essa abordagem consiste em apresentar os reais estudos e possibilidades de aplicação das técnicas de modulação por

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. During this study, Ana Luísa and Álvaro received financial support from FAPEMIG, CNPq and PIBIC/UFLA research grants.

TABELA I
COMPARAÇÃO DOS ARTIGOS DE REVISÃO DA LITERATURA (*Surveys*) SOBRE VLP E VLC.

Surveys	Características do Artigo							
	Ano	VLC	VLP	Tipos de Emissores	Tipos de Receptores	Técnicas de Multiplexação	Técnicas de Modulação	Aplicações à Mobilidade Autônoma
[4]	2016	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗
[6]	2016	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗
[7]	2017	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
[9]	2017	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
[10]	2019	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓
[8]	2019	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Esta pesquisa	2020	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

luz visível aplicadas ao âmbito de veículos inteligentes, além de suas tendências neste ramo de pesquisa.

Este estudo foi dividido como segue. Na Seção II é apresentada a Revisão da Literatura, na qual são apresentadas resumidamente as técnicas utilizadas nas tecnologias de VLC e VLP. Ainda nessa seção, é apresentado o estado da arte de ambas as tecnologias, ilustrando na forma de tabelas as principais pesquisas da área. Sendo um tema em grande ascensão, a Seção III dará destaque as aplicações do VLP e VLC na mobilidade autônoma. Em seguida é apresentada a Seção IV, na qual são discutidos os principais desafios da área e as soluções propostas até o momento, apresentando também as perspectivas futuras existentes sobre a área de VLC e VLP. Por fim, as considerações finais e possibilidades de análises e projetos futuros serão abordados na Seção V.

II. REVISÃO DA LITERATURA

A. Comunicação Pela Luz Visível (VLC)

A VLC é a tecnologia que originou o VLP, sendo base das principais técnicas empregadas. A luz de LED pode ser modulada em frequências de até centenas de milhares de oscilações por segundo, permitindo o cumprimento do propósito de iluminação e comunicação pelo mesmo dispositivo. Além de uma solução de baixo custo, sistemas VLC fornecem alta segurança de dados e não sofrem com interferências eletromagnéticas [11].

As principais características que definem os sistemas de VLC são os tipos de emissores, receptores e modulação empregados. Essas características ditarão o custo de implementação do sistema, levando em conta a complexidade de *hardware* e *software*.

No âmbito dos emissores, os μ LEDs [12] vêm sendo amplamente aplicados pela sua grande capacidade luminosa, além de serem menos suscetíveis à perda de luminosidade a longo prazo e terem um tempo de resposta na casa de nanossegundos (ns). Isso se deve ao material inorgânico usado (nitreto de gálio - GaN) [13], que permite que as fontes de LED individuais fiquem mais brilhantes por mais tempo. Estudos também se desenvolveram em torno dos Diodos Laser (LD - *Laser Diodes*) [14] em aplicações de transmissores *front-end*, quando a comunicação é necessária em velocidades muito elevadas [15], e LEDs RGB (*Red, Green and Blue*) [16], em sistemas que

necessitam de modulação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) para aumento de largura de banda.

Na categoria de receptores, os fotodiodos e as câmeras são os maiores protagonistas. Os fotodiodos possuem a grande vantagem de serem componentes de baixo custo. Aliado à essa característica, a resposta mais rápida e linear fazem com que ele seja amplamente utilizado na VLC [9]. No entanto, seu campo de visão limitado requer o uso de sistemas ópticos para o direcionamento da luz [17].

As câmeras com sensores CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), por sua vez, têm sido amplamente utilizadas [18] e [19], principalmente devido ao seu grande campo de visão (FOV - *Field of View*), se comparado ao do fotodiodo, e à sua capacidade de isolamento de fontes de luz parasitas [20]. Em contraponto, essa tecnologia possui desvantagens quanto à limitação do número de quadros por segundo (fps- *frames per second*), o que reduz a taxa de dados. Para aplicações que necessitam de uma velocidade de comunicação maior, as câmeras de alta velocidade tem ganhado destaque, mas podem ser inviáveis devido ao seu alto custo [9].

Além dos tipos de emissores e receptores, a técnica de modulação para envio dos dados pela luz de LED é outra característica determinante nos projetos de VLC. Dentre elas, as mais utilizadas são a *On-Off Keying* (OOK) [21], a *Pulse Position Modulation* (PPM) e suas variantes [7] e [22] e a *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) [23].

A OOK é uma das técnicas de modulação mais simples de serem implementadas em sistemas de VLC. Ela consiste em variar a luminosidade do LED em seus extremos (ligado e desligado) para transmissão dos bits 1 e 0, respectivamente. Essa técnica é adequada em aplicações nas quais a distância de envio é mais importante do que a taxa de dados [20].

A Modulação por Posição de Pulso (PPM) consiste na identificação do símbolo transmitido por meio de sua posição. Isso é feito variando a posição dos pulsos (sinal da portadora) na proporção dos valores instantâneos do sinal analógico (sinal da mensagem). Uma desvantagem dessa técnica é a necessidade da sincronização entre o emissor e o receptor [7] e [24].

A técnica de Multiplexação por Divisão de Frequências

Ortogonal (OFDM) tem como grande diferencial o aumento da utilização da largura de banda e da robustez quando utilizado mais de um emissor [11], tornando-se a técnica mais utilizada atualmente. A OFDM se consiste na transmissão paralela de dados em subportadoras ortogonais. Essa multiplexação é geralmente feita utilizando FFT (*Fast-Fourier-Transform*) [25]. Para utilização da técnica em sistemas VLC, o OFDM necessita de algumas modificações, pois a técnica convencional pode usar sinais complexos e bipolares que não se adequam ao VLC [7].

Existe ainda uma infinidade de técnicas aplicáveis aos sistemas VLC, como a Modulação em Amplitude de Quadratura (*QAM - Quadrature Amplitude Modulation*), a Modulação por Amplitude de Pulso (*PAM - Pulse Amplitude Modulation*) e suas variantes [26]–[28].

B. O Posicionamento Pela Luz Visível (VLP)

Para se compreender o modelo básico de um sistema de VLP, deve-se considerar três parâmetros principais: o transmissor, o receptor e o ambiente. Eles estão simplificados na Fig. 1, na qual se tem o funcionamento básico da camada física. Algumas características devem ser consideradas para a

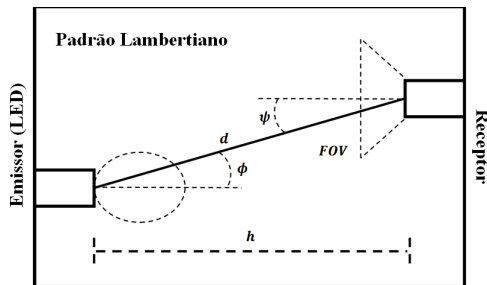


Fig. 1. Esquemático de um sistema de VLP, considerando um receptor único, um transmissor LED, parâmetros utilizados, ângulo de emissão (ϕ), ângulo de Incidência (ψ), LOS (d), campo de visão (FOV) e distância entre emissor e receptor (h).

aplicação dessa tecnologia, tais como os caminhos diretos e indiretos da luz emitida até o sensor (LOS - *Line-of-Sight* e NLOS - *Non-Line-of-Sight*, respectivamente) [29] e o modelo Lambertiano. Esse modelo representa o comportamento da potência luminosa recebida pelo sensor de acordo com a distância e ângulo de emissão, ângulo de recepção e outras características relacionadas aos componentes utilizados [4], [30] e [31]. A Fig. 1 também ilustra o padrão Lambertiano de irradiação e o campo de visão de incidência (FOV).

1) *Métodos de Posicionamento*: Diferentes técnicas são estudadas para o processamento dos sinais recebidos de diversas fontes de luz. Elas visam o cálculo da posição do receptor conhecendo-se a posição dos emissores a priori. Esse receptor pode ser um sensor único ou uma matriz de sensores fotodiodos (ou sensor de imagem, e.g. câmera digital). As quatro principais técnicas são: Divisão Espacial (SDMA - *Space Division Mulpile-Acess*), Divisão Temporal (TDMA - *Time Division Mulpile-Acess*), Divisão de Frequências (FDMA - *Frequency Division Mulpile-Acess*) e Divisão de Código (CDMA - *Code Division Mulpile-Acess*).

São classificadas como SDMA as técnicas de posicionamento as quais demandam a utilização de sensores de imagem. Seu princípio de funcionamento consiste na modulação dos LEDs emissores e na aquisição de imagens em frequências específicas. Dessa forma, as imagens processadas determinam a posição dos sinais luminosos e a presença de frequências específicas [4], [32], [33] e [34].

A TDMA, por sua vez, baseia-se em cada LED enviar um único pulso de sinal sequencial a um dado montante de LEDs que cobrem a mesma área. Cada pulso possui a mesma largura. Dessa forma, um único receptor, após um dado período de tempo, recebe sinais de todos os LEDs da área coberta e assimila a potência do sinal recebido de cada transmissor pela posição do pulso em um período de tempo [35], [36] e [37]. Contudo, essa técnica acarreta algumas desvantagens como a limitação de taxas de transmissão e a necessidade de sincronismo do sistema [4], [36] e [38].

Com relação à técnica FDMA, ela consiste na associação de diferentes frequências a cada LED e o processamento dos sinais no domínio da frequência. Assim, com a aplicação da FFT no sinal recebido, cada transmissor pode ser distinguido pelo espectro transmitido. Devido à não sincronização dos dispositivos, o processamento de sinais tem que ser feito por análise da potência do sinal óptico. A independência de sincronização, somada à baixa complexidade necessária no circuito transmissor, tornam esse um método de baixo custo de implementação, apesar da utilização de controladores analógicos para os LEDs não garantirem máxima eficiência dos dispositivos.

Por fim, CDMA é uma tecnologia que se baseia na transmissão de uma única sequência de informações codificada (digitalmente) por cada LED. Apesar da transmissão de dados, o sistema independe de sincronização devido à característica do receptor de conhecer todos os códigos utilizados em determinada área e, dessa forma, obter informações de cada LED [4].

C. Contextualização e Estado da Arte

Os primeiros pesquisadores a estudarem a modulação da luz para comunicação foram Alexander Graham Bell e seu assistente Charles Sumner Tainter em 1880. Eles desenvolveram o fofone, um dispositivo que transmitia a voz por meio da modulação de um feixe de luz. Seu *design* foi inspirado no telefone da época e utilizou o som modulado projetado em um espelho, causando vibrações. Assim, a luz do sol foi direcionada para o espelho e projetada de volta para o receptor, que foi convertido novamente em som [39]. O fofone foi uma das invenções mais importantes de Alexander Graham Bell e serviu como precursor de várias tecnologias de comunicações ópticas, incluindo a Comunicação pela Luz Visível, um dos temas desta pesquisa.

Desde então, a utilização da luz para envio de informações vem sendo estudada. As primeiras pesquisas conhecidas sobre VLC utilizando LEDs foram observadas na Universidade de Keio no Japão, no *Nakagawa Laboratories* em 2000 [40]. Em aplicações de ambientes internos, os pesquisadores do laboratório criaram um sistema de comunicação que chegou a uma velocidade de comunicação de 100 Mbps em 2009.

Em 2006, a VLC passou a ser explorada por vários pesquisadores de países europeus e dos Estados Unidos, como o professor Mohsen Kavehrad da Universidade Estadual da Pensilvânia [41] e [42]. Ele apresentou estudos de diversos temas dentro da VLC como sistemas híbridos, sustentáveis e de posicionamento em ambientes internos.

Outro nome importante é o do professor Harald Haas da Universidade de Edimburgo com seus estudos sobre aplicação do VLC em sistemas de internet sem fio [43], [44], sendo pioneiro na área e criador do termo Li-Fi (*Light Fidelity*).

Dessa forma, a tecnologia evoluiu com o estudo de diversos métodos de modulação como OOK [45], [46], OFDM [11], [47] e PPM [7]. Além disso, testes de diversos tipos e configurações de LEDs vem sendo feitos, como o μ LED [28], [48], *Laser Diodes* [15], LEDs de Nitreto de Gálio [49] e RGB [50]. No âmbito dos receptores, o fotodiodo [51], as câmeras CMOS [18] e os *smartphones* [52] são recorrentes.

Apesar da VLC já estar sendo usada em aplicações de posicionamento, o conceito de VLP surgiu apenas por volta de 2013 [53]. A partir de então, vários testes e simulações foram realizados com foco voltado para o posicionamento, utilizando as diferentes técnicas de acesso multiplexado [35], [38], [54] e [55]. A validação e comparação das técnicas de modulação, sensores e algoritmos de posição se tornaram temas recorrentes desde então.

Com o aperfeiçoamento das técnicas, o VLC e o VLP estão sendo aplicados cada vez mais em estudos sobre mobilidade em ambientes internos e externos. A Tabela II expõe alguns dos resultados recentes em VLP encontrados na literatura nos últimos 5 anos em função do método de posicionamento utilizado, da área abrangida pelo sistema, do erro associado ao posicionamento e das principais características individuais de cada um. Analisando os dados dessa tabela, percebe-se que todas as técnicas de multiplexação ainda são muito empregadas e um dos principais sensores utilizados para a captação do sinal luminoso é a câmera, a qual é utilizada em multiplexação FDMA [31] e, principalmente, em SDMA [56]–[59] para aplicações que envolvem baixa complexidade de *hardware* e alta performance de captação dos dados do ambiente.

Ainda em VLP, também podem ser utilizados sensores auxiliares para uma melhor precisão de localização, como é o caso do fotodiodo para sistemas de baixos custo e complexabilidade de *software*. Ele é comumente aplicado em sistemas de multiplexação FDMA [60]–[62] e TDMA [63] e [64] e implementado em conjunto com outros fotodiodos, como sistemas em malha, para localização com apenas uma fonte emissora [65]. Recentemente, aplicações envolvendo sensores LIDAR (*Light Detection and Ranging*) [66] foi apresentada para o caso de mapeamento junto com o sistema de posicionamento.

Com relação ao VLC, na Tabela III encontram-se algumas pesquisas relevantes e seus respectivos avanços nos últimos 5 anos. Observando as pesquisas listadas, a técnica de modulação por OFDM se mostra em uso crescente, principalmente em aplicações de VLC juntamente ao VLP. Outra tendência é a utilização de vetores de μ LEDs como emissores, a fim de multiplexar o sinal e enviar dados de forma paralela,

além da câmera como receptor, ampliando a gama de possibilidade de dados a serem enviados [67].

III. APLICAÇÕES PARA A MOBILIDADE INTELIGENTE

Apesar do atual desenvolvimento da mobilidade inteligente e do nível de automação dos veículos que compõe o mercado atual, ainda existem algumas limitações físicas e computacionais nos sistemas de inteligência veicular. No âmbito de posicionamento global, parâmetro fundamental para todo nível de automação veicular, a limitação se encontra nos sistemas de localização tradicionais como o GPS, os quais não fornecem precisão suficiente para garantir a segurança em tarefas de navegação e tem seu funcionamento limitado em áreas urbanas [68].

Esse cenário converge na busca por métodos alternativos que viabilizem a localização precisa, não apenas em ambientes urbanos, mas também em ambientes internos, como túneis, estacionamentos subterrâneos, entre outros. A Mobilidade como um Serviço (MaaS - *Mobility-as-a-Service*) considera o deslocamento como um ato contínuo e que pode ser realizado por diferentes modais, inclusive à pé na última milha ou nos trechos de integração entre as opções de modais. O VLP e o VLC se mostram como uma solução atrativa, visto a possibilidade da junção de um posicionamento local, relativamente preciso, com posicionamento em grandes área. Ademais, tem-se a possibilidade de utilizar a própria infraestrutura de iluminação existente para esse fim [59].

Uma vantagem para o uso dessas tecnologias em veículos de passeio está no fato de todos eles já possuírem dispositivos luminosos (faróis e lanternas de freio, por exemplo), possibilitando seu uso no ramo da Internet dos Veículos (IoV - *Internet of Vehicles*) [69]. Isso viabiliza a comunicação entre veículos e a infraestrutura (V2I - *Vehicle-to-Infrastructure* e I2V - *Infrastructure-to-Vehicle*) e entre veículos (V2V - *Vehicle-to-Vehicle*) [70]. Alguns projetos aplicam o V2V utilizando técnicas de VLC para comunicação entre os faróis dos automóveis [71] e [72]. Nesses trabalhos, é sugerida a definição de protocolos de comunicação para facilitar a troca de informações entre veículos, assim como dados de diversas situações nas quais eles podem se encontrar, tais como em cruzamentos, comboio de veículos, etc. É importante ressaltar que a VLC, em uma análise mais ampla, pode também ser disponibilizada na iluminação pública, contribuindo com o desenvolvimento das cidades inteligentes [2], [59], [73] e [74].

Com a necessidade crescente de comunicação entre as diferentes partes (V2X - *Vehicle-to-Everything*), foi definido um padrão pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE), o SAE J2735, o qual descreve um dicionário de mensagens dedicadas para comunicações de curto alcance (DSRC - *Dedicated Short Range Communications*). Nesse dicionário foi definido o conjunto básico de mensagens de segurança (BSM - *Basic Safety Messages*), composto por um ID temporário, a posição do veículo, dados de movimento como a velocidade, a orientação do movimento, ângulo de esterçamento do volante e aceleração, bem como avisos de frenagem, tamanho do veículo, etc [75].

TABELA II
O ESTADO DA ARTE - VLP.

Técnica VLP	Ref.	Ano	Alcance (m)	Precisão (m)	Características
	[76]	2015	3 x 5 x 4	< 1	AoA (<i>Angle of Arrival</i>) e RSS(<i>Received Signal Strength</i>), sistema previsto em modelo matemático, sem previsão de implementação.
TDMA	[77]	2015	1,2x1,2x1,7	0,03	RSS, sincronizado, baixo custo, <i>bit stuffing</i> para otimização do VLC, robótica móvel.
	[78]	2016	2,5x2,5x2	0,1	RSS, sincronizado, baixo custo, resultados experimentais, robótica móvel.
	[63]	2018	5x4x3	-	AoA, sincronizado, baixa complexabilidade, baixo custo, fotodiodo, resultados experimentais.
	[59]	2016	20x6x5	1	Processamento de imagem, não sincronizado, baixo custo, resultados em simulação, mobilidade terrestre.
SDMA	[56]	2019	1,8x1,8x3	0,16	AoA, baixa complexabilidade, alta precisão, câmera de <i>smartphone</i> e uma única luminária de LED.
	[66]	2019	2x2	0,1	RSS, alto custo, média complexabilidade, câmera e um sensor Lidar, resultados experimentais.
	[58]	2020	5x5x3	< 0,15	RSS, média complexidade, custo médios, câmera, resultados de simulação.
CDMA	[4]	2015	3x3x2	0,7	RSS, não sincronizado, baixo custo, resultados experimentais.
	[3]	2016	20x20x5	< 0,6	Estimação de parâmetros, não sincronizado, baixo custo, resultados em simulação, transmissores em forma de domo.
	[61]	2016	1,5x1,5x2	< 0,04	RSS, não sincronizado, baixo custo, resultados em simulação.
	[79]	2017	5x5x3	0,1	RSS, média complexidade, resultados experimentais, fotodiodo, filtro de Kalman estendido.
FDMA	[31]	2018	1,5x1,2	< 0,15	RSS, alta potência, não sincronizado, baixa complexidade, câmera de <i>smartphone</i> , resultados em simulação.
	[80]	2018	1,8x4,2	< 0,5	RSS, alta potência, softwares complexos, não sincronizado, estrutura simples, fotodetector, resultados experimentais.
	[31]	2018	5x5x3	0,22	RSS, baixo custo, baixa potência, <i>smartphone</i> , fotodetector, resultados experimentais e simulados.
	[81]	2018	(ambiente externo)	0,12	RSS, baixo custo, alta potência, baixa complexabilidade, resultados experimentais.
	[60]	2019	1,2x1,2x2	< 0,5	RSS, baixo custo, arquitetura flexível, análise do ruído ambiente, resultados experimentais.
-	[82]	2019	10x10x2,4	< 0,1	AoA e TDoA (<i>Time Difference of Arrival</i>), triangulação reversa, baixa potência, baixa complexidade, modelo matemático simples, fotodiodos, resultados em simulação.

TABELA III
O ESTADO DA ARTE - VLC.

Modulação	Ref.	Ano	Taxa (Gbps)	Distância (m)	Características
	[83]	2015	5	x=2 y=4	Ambientes internos, <i>Laser Diode</i> (LD), <i>Angle Diversity Receiver</i> (ADR).
	[84]	2015	$1,5 \times 10^{-5}$	23	Ambientes externos, aplicação veicular, I2V, V2V.
OOK	[85]	2015	5	-	Ambientes internos, LD RGB, <i>Beam delay adaptation technique</i> ADR (DAT ADR).
	[86]	2016	25	-	Ambientes internos, localização, <i>Fast Computer Generated Holograms</i> (FCGHs), melhor sinal/ruído.
	[87]	2018	$\downarrow 10^{-5}$ e $\uparrow 5 \times 10^{-6}$	2,4	Ambientes internos, comunicação bidirecional, LEDs e obturadores LCD, fotodiodo.
	[88]	2020	-	0,38 - 0,41	Ambientes internos, LED vermelho, fotodiodo, filtro de luz ambiente em <i>hardware</i> .
OOK/PPM	[89]	2019	$1,0 \times 10^{-4}$	0,08	Ambientes internos, aplicação industrial, IoT.
4-PPM	[90]	2016	$1,0 \times 10^{-5}$	30	Ambientes externos, aplicação automotiva, luzes de farol, fotodiodos, comunicação V2V.
	[91]	2015	3,4	2,88	Ambientes internos, <i>Laser Diode</i> como emissor, comparativo LD e μ LEDs.
OFDM	[92]	2015	$7,0 \times 10^{-2}$	2	Ambientes internos, híbrido WiFi-VLC, LED branco e sistema de transimpedância, fotodiodo .
	[93]	2016	$5,5 \times 10^{-2}$	1,5	Ambiente externo, aplicação automotiva, V2X, baseado em sensor de imagem.
	[94]	2018	1	-	Ambientes externos, radiação solar X localização e horário, sinal/ruído, taxa de dados e erros.
	[95]	2019	1,6	-	Ambiente interno, técnica de Transformação de Matriz Circulante (OCT) e Decomposição de Valor Singular (SVD).
DC-OFDM	[96]	2015	10	0,35	Ambientes internos, <i>Laser Diode</i> com placa de fósforo, melhor eficiência e confiabilidade.
	[49]	2017	7,36	-	μ LED violeta de Nitreto de Gálio (GaN) como emissor e fotodiodo como receptor.
QAM-OFDM	[26]	2015	9	5	Ambientes internos, <i>Laser Diode</i> azul encapsulado GaN, otimização do fluxo de dados.
	[27]	2015	0,2-0,35	0,30 - 0,60	Ambientes externos, LED branco como emissor e fotodetectores, aplicação de filtro azul.
PAM	[28]	2015	1,07	1	Ambientes internos, vetores de múltiplos μ LEDs e fotodiodos, comunicação em alta velocidade.

Esse padrão de comunicação, aliado às técnicas de VLC e VLP, permitem novas possibilidades para impulsionar o desenvolvimento de Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor (ADAS - *Advanced Driver Assistance Systems*) de menor custo e com maior precisão, como em aplicações de comboio de veículos (*platooning*), por exemplo. A navegação por comboio permite que veículos viajem de forma controlada e com uma distância menor entre eles. Isso permite reduzir a resistência do ar entre os veículos e, conseqüentemente, aumentar a eficiência, além de reduzir o número de condutores necessários [97]. Nesse cenário, a VLC torna-se uma aliada ao *platooning* como meio de transmissão de dados entre os veículos, de acordo com a Fig. 2.

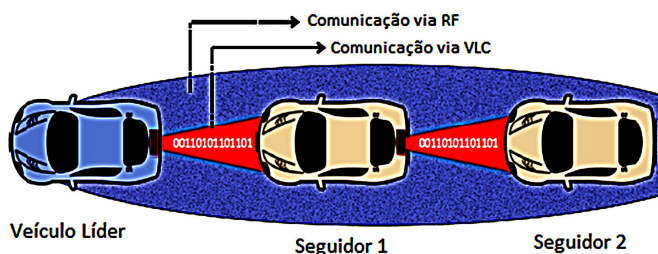


Fig. 2. Utilização de VLC para comunicação entre veículos em comboio [97].

O *platooning* aplicado com o VLC e VLP tem sido testado em simulação, apresentando resultados promissores. A precisão estimada desse sistema pode chegar à escala de centímetros, mesmo utilizando apenas um sensor e uma fonte emissora de luz, além da presença de vários ruídos [98].

Outro experimento aplicado nesse contexto, buscou implementar apenas a comunicação pela luz visível [72], onde duas miniaturas de veículos se comunicavam por meio de microcontroladores. Sempre que o veículo da frente detecta um obstáculo, este envia uma mensagem por meio do VLC à miniatura seguinte para que ela pare. Quando o veículo traseiro recebe a mensagem, ela é decodificada e, além de parar, o carro também sinaliza, por meio de uma buzina, que a mensagem foi recebida. Tal experimento indica resultados promissores para a técnica, uma vez que a comunicação foi bem sucedida. Uma possível evolução desse sistema seria incluir o VLP e fazer o controle da distância entre as miniaturas em quanto estão em movimento.

Além dos casos anteriores, existem outras situações nas quais a tecnologia por meio de luz visível podem ser aplicadas, utilizando estruturas já disponíveis de iluminação e sinalização públicas por exemplo. Esse é o caso do enfileiramento diante de um semáforo ou, simplesmente, trafegando em uma rua com iluminação pública [99]–[101].

Na primeira situação, representada pela Fig. 3, ocorre a comunicação I2V entre o semáforo e o primeiro veículo, sinalizando para que este pare. Em seguida, o veículo retransmite a informação aos demais por meio dos faróis traseiros. Essa ação se repete até que se atinja o último veículo da fila ou que o semáforo fique verde [102].

Na segunda situação, o veículo pode receber dados da infraestrutura de iluminação, estimando sua localização na via

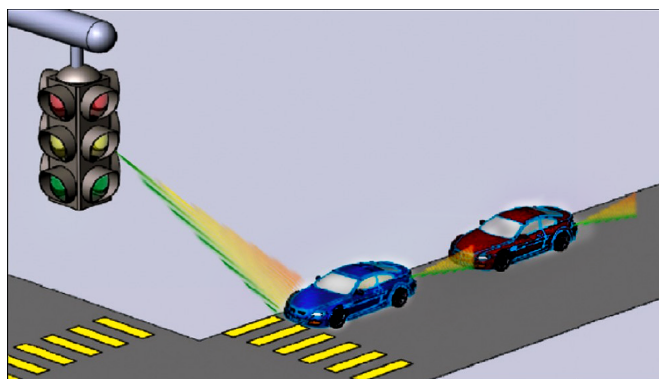


Fig. 3. Utilização de VLC e VLP em uma interseção com semáforo [102].

em que trafega, além de permitir o envio de mensagens e dados sobre o seu estado para a mesma. Em [100], é apresentado um protótipo de infraestrutura pública em escala reduzida onde se aplica o VLC. Nele, um fotodiodo identifica cada um dos cinco emissores (LEDs), simbolizando quatro postes diferentes e um semáforo, cada um com o seu próprio código de identificação. Esse resultado viabiliza a implementação do VLP em projetos semelhantes, pois com a identificação de cada fonte emissora o posicionamento do veículo na via se torna mensurável.

Ainda nesse problema, é possível complementar o sistema com o envio de mensagens sobre possíveis congestionamentos na via, avisos garantindo que é possível a conversão em vias adjacentes sem o risco de colisão com outro veículo ou, até mesmo, alertas solicitando a passagem para veículos de emergência.

Com a análise desses e outros trabalhos desenvolvidos na área, nota-se dois pontos importante e carentes de aprimoramento nas aplicações baseadas na luz visível em veículos inteligentes. O primeiro ponto a ser observado é que nenhum artigo apresenta uma metodologia a qual implemente o VLP sem o auxílio de um método de comunicação complementar. O desenvolvimento dessa aplicação seria importante para se otimizar o processamento e garantir respostas rápidas às situações em que o veículo possa se envolver. O segundo ponto é que esses métodos baseados na luz visível têm sido utilizados somente como ferramentas de auxílio ao condutor, não para tornar um veículo totalmente autônomo. Ou seja, nenhum artigo voltou seus estudos diretamente para a implementação de uma plataforma autônoma que utilize o VLC e/ou VLP em seu funcionamento.

IV. DESAFIOS E SOLUÇÕES POTENCIAIS

Com base no estudo aqui apresentado sobre as técnicas de VLP e VLC, percebe-se que os desafios futuros se diferenciam entre aplicações de ambientes internos e externos. Esta seção abordará esses desafios na mobilidade terrestre em detalhes e a análise das potenciais soluções, fornecendo uma base para orientar futuras pesquisas nesse sujeito tão amplo.

Prevê-se que o mercado de microlocalização aumentará para US\$ 17 bilhões até 2025 [103], o que pode ser uma grande oportunidade para as técnicas de VLC e VLP. A microlocalização é o processo de localização e navegação

de pessoas e objetos em ambientes internos. As principais aplicações nesses ambientes se associam ao ramo da Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) [104], com soluções para grandes hospitais [105]–[109], shoppings, indústrias [89] e estacionamentos cobertos. Nesses locais, as tecnologias podem ser associadas a fim de propiciar desde uma localização precisa de objetos e pessoas a uma interação entre robôs e pacientes.

Nesses ambientes, um dos principais desafios encontra-se no aumento da taxa de envio de dados entre pequenas distâncias. Pesquisas em torno dessa temática abordam a utilização de novos tipos de modulação [110], aplicação de sistemas híbridos [92] e [111] e de novos materiais na composição dos LEDs [9]. Além disso, a interferência de sombras formadas por barreiras físicas, como móveis e paredes em ambientes pequenos [112], e da iluminação externa que entra por janelas [60] também são fatores relevantes. Nesses casos, a limitação do campo de visão tem sido utilizada para aumentar a robustez a esses ruídos.

No entanto, esses desafios aumentam quando são consideradas a VLP e a VLC em ambientes externos. A maior limitação nesse cenário se deve à ampla gama de interferências nos receptores. Isso por estarem em um ambiente não controlado, estando sujeito a luz solar e outras fontes de iluminação artificial (como pode ser visto na Fig. 4) e a condições do tempo, como chuva, neve, neblina, entre outros [113] e [114].

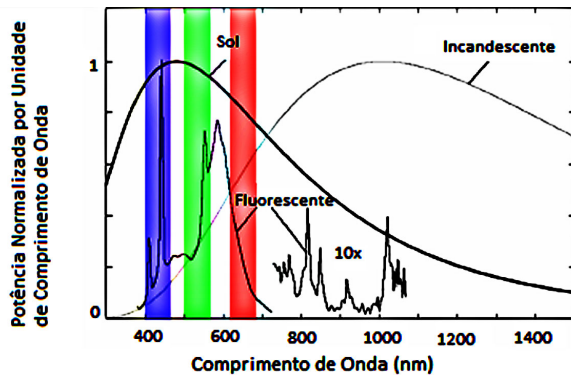


Fig. 4. Espectro de fontes luminosas diversas [115].

A fim de solucionar esses problemas, a literatura mostra resultados promissores na utilização de diferentes tipos de filtros, como os de luz azul e vermelha [27] e os capacitivos [9]. Também tem sido considerada a aplicação de lentes para o direcionamento da luz de LED e bloqueio de interferências luminosas de certos ângulos [115], uso de receptores e emissores adaptativos [20] e de diferentes comprimentos de onda [114], a fim de desenvolver sistemas mais robustos.

Além disso, em se tratando da comunicação V2V e V2I, a segurança de dados também precisa ser observada. Estudos, ainda em fase inicial, apontam que, como todo sistema de comunicação, a VLC também está suscetível a ataques cibernéticos, tais como os de Negação de Serviço (DoS - *Denial of Service*). Nessas situações, *hackers* podem entrar no campo de visão dos veículos, enviando uma série de pacotes de mensagens a fim de sobrecarregar o sistema e obter informações. Para superar esse desafio, a padronização de

métodos de criptografia das mensagens pode ser uma solução viável [116].

A. Perspectivas Futuras da Área

Muito se pode dizer sobre as tendências das técnicas por luz visível, principalmente no âmbito de IoT. As tecnologias por luz visível estão sendo estudadas por pesquisadores para conciliação às redes de quinta geração (5G) [117], principalmente pelas vantagens que oferecem. Essas vantagens estão no baixo custo, segurança, alta precisão, alta taxas de comunicação, etc., que também são características buscadas pelas redes 5G [118].

Em [117] e [118], são apresentados cenários nos quais as técnicas por luz visível são implementadas como uma subcamada de comunicação nas bordas da rede, voltadas para aplicações em ambientes internos. Já em [119], é apresentada a aplicação dessas técnicas, em conjunto com o 5G, com o foco para cenários externos de curto alcance, mais especificamente para uma rede de veículos inteligentes (V2V), dado a enorme massa de dados gerada por esses veículos.

Outra aplicação de VLC e VLP que vem ganhando força para os próximos anos é voltada à Indústria 4.0 [120]. Nesse contexto, é possível implementar um controle de logísticas dos equipamentos, além de um controle mais eficiente de navegação e posicionamentos de maquinários, no caso da implementação com VLP [120].

V. CONCLUSÃO

Esta pesquisa apresentou um estudo sobre diferentes técnicas e aplicações de VLC e VLP encontradas na literatura, com um enfoque nos problemas relativos à mobilidade inteligente. No desmonte dessa pesquisa, com base nos resultados catalogados, observa-se o potencial das tecnologias ascendentes de localização com base em VLC na mobilidade urbana. Resultados mais promissores, como os apresentados nas Tabelas II e III, demonstram precisões entre 0,1 e 1 metro para áreas compatíveis com o ambiente urbano, atrelando robustez e baixo custo em sua implementação. Nesse sentido, VLC e VLP se apresentam como alternativa plausível e a ser estudada para contribuição no desenvolvimento de veículos inteligentes.

Como perspectiva futura, pretende-se aplicar alguns dos métodos aqui estudados em aplicações reais de ADAS de baixo custo, com foco em FDMA, no caso do VLP, e na utilização da modulação OOK, no âmbito do VLC. Essa pesquisa visará a implementação e testes dessas tecnologias em um veículo inteligente em escala reduzida, em desenvolvimento no Laboratório de Mobilidade Terrestre (LMT) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

REFERÊNCIAS

- [1] I. L. Azevedo, M. G. Morgan, and F. Morgan, "The transition to solid-state lighting," *P. IEEE*, vol. 97, no. 3, pp. 481–510, 2009.
- [2] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, 2015.
- [3] M. Vieira, R. Costa, A. Pereira, and P. Fonseca, "A validation framework for visible light positioning in mobile robotics," in *2016 Int. Conf. Auto. Robot Syst. Compet. (ICARSC)*, 2016, pp. 47–52.

- [4] S. De Lausnay, L. De Strycker, J.-P. Goemaere, B. Nauwelaers, and N. Stevens, "A survey on multiple access visible light positioning," in *2016 IEEE Int. Conf. Emerg. Techn. Innov. Bus. Pract. Transf. Soc. (EmergiTech)*. IEEE, 2016, pp. 38–42.
- [5] R. Ross and R. Hoque, "Augmenting gps with geolocated fiducials to improve accuracy for mobile robot applications," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 1, p. 146, 2020.
- [6] T.-H. Do and M. Yoo, "An in-depth survey of visible light communication based positioning systems," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 678, 2016.
- [7] J. Luo, L. Fan, and H. Li, "Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 19, no. 4, pp. 2871–2893, 2017.
- [8] M. Afzalan and F. Jazizadeh, "Indoor positioning based on visible light communication: A performance-based survey of real-world prototypes," *ACM Comput. Surv.*, vol. 52, no. 2, pp. 1–36, 2019.
- [9] A.-M. Căilean and M. Dimian, "Current challenges for visible light communications usage in vehicle applications: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2681–2703, 2017.
- [10] S. U. Rehman, S. Ullah, P. H. J. Chong, S. Yongchareon, and D. Kosmosy, "Visible light communication: A system perspective—overview and challenges," *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1153, 2019.
- [11] M. Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala, and D. Knipp, "Visible light communication using ofdm," in *2nd Int. Conf. Testbeds Res. Infr. Dev. Net. Communities, 2006. TRIDENTCOM 2006*. IEEE, 2006, pp. 6 pp.–134.
- [12] J. J. McKendry, D. Massoubre, S. Zhang, B. R. Rae, R. P. Green, E. Gu, R. K. Henderson, A. Kelly, and M. D. Dawson, "Visible-light communications using a cmos-controlled micro-light-emitting-diode array," *J. lightwave technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 61–67, 2011.
- [13] S. Rajbhandari, J. J. McKendry, J. Herrnsdorf, H. Chun, G. Faulkner, H. Haas, I. M. Watson, D. O'Brien, and M. D. Dawson, "A review of gallium nitride leds for multi-gigabit-per-second visible light data communications," *Semicond. Sci. Tech.*, vol. 32, no. 2, p. 023001, 2017.
- [14] B. Janjua, H. M. Oubei, J. R. D. Retamal, T. K. Ng, C.-T. Tsai, H.-Y. Wang, Y.-C. Chi, H.-C. Kuo, G.-R. Lin, J.-H. He *et al.*, "Going beyond 4 gbps data rate by employing rgb laser diodes for visible light communication," *Opt. Express*, vol. 23, no. 14, pp. 18 746–18 753, 2015.
- [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] Y. Wang, Y. Wang, N. Chi, J. Yu, and H. Shang, "Demonstration of 575-mb/s downlink and 225-mb/s uplink bi-directional scm-wdm visible light communication using rgb led and phosphor-based led," *Opt. express*, vol. 21, no. 1, pp. 1203–1208, 2013.
- [17] M. Seminara, T. Nawaz, S. Caputo, L. Mucchi, and J. Catani, "Characterization of field of view in visible light communication systems for intelligent transportation systems," *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 1–16, 2020.
- [18] 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.
- [19] T. Yamazato, I. Takai, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo, S. Arai, M. Andoh, T. Harada, K. Yasutomi, K. Kagawa *et al.*, "Image-sensor-based visible light communication for automotive applications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 7, pp. 88–97, 2014.
- [20] A.-M. Căilean and M. Dimian, "Toward environmental-adaptive visible light communications receivers for automotive applications: A review," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 9, pp. 2803–2811, 2016.
- [21] S. Arnon, *Visible light communication*. Cambridge University Press, 2015.
- [22] M. H. Ahfayd, M. J. Sibley, P. J. Mather, and P. Lazaridis, "Visible light communication based on offset pulse position modulation (offset-ppm) using high power led," in *2017 XXXIIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [23] M. Aminikashani, W. Gu, and M. Kavehrad, "Indoor positioning in high speed ofdm visible light communications," *arXiv preprint arXiv:1505.01811*, 2015.
- [24] "Difference between PAM, PWM and PPM," ELPROCUS. [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/difference-between-pam-pwm-ppm/>
- [25] E. L. Pinto and C. P. de Albuquerque, "A técnica de transmissão ofdm," *Revista Científica*, vol. 1516, p. 2338, 2002.
- [26] Y.-C. Chi, D.-H. Hsieh, C.-T. Tsai, H.-Y. Chen, H.-C. Kuo, and G.-R. Lin, "450-nm gan laser diode enables high-speed visible light communication with 9-gbps qam-ofdm," *Opt. Expr.*, vol. 23, no. 10, pp. 13 051–13 059, 2015.
- [27] S.-W. Wang, F. Chen, L. Liang, S. He, Y. Wang, X. Chen, and W. Lu, "A high-performance blue filter for a white-led-based visible light communication system," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 2, pp. 61–67, 2015.
- [28] S. Rajbhandari, H. Chun, G. Faulkner, K. Cameron, A. V. Jalajakumari, R. Henderson, D. Tsonev, M. Ijaz, Z. Chen, H. Haas *et al.*, "High-speed integrated visible light communication system: Device constraints and design considerations," *IEEE J. Sel. Area. Comm.*, vol. 33, no. 9, pp. 1750–1757, 2015.
- [29] K. Yan, H. Zhou, H. Xiao, and X. Zhang, "Current status of indoor positioning system based on visible light," in *2015 15th Int. Conf. Contr. Autom. Syst. (ICCAS)*, 2015, pp. 565–569.
- [30] H. Kim, D. Kim, S. Yang, Y. Son, and S. Han, "An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique," *J. Lightwave Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 134–144, 2013.
- [31] Q. Wang, H. Luo, A. Men, F. Zhao, X. Gao, J. Wei, Y. Zhang, and Y. Huang, "Light positioning: A high-accuracy visible light indoor positioning system based on attitude identification and propagation model," *Int. J. Distrib. Sens. N.*, vol. 14, no. 2, p. 1550147718758263, 2018.
- [32] M. S. Rahman, M. M. Haque, and K.-D. Kim, "High precision indoor positioning using lighting led and image sensor," in *14th Int. Conf. Comp. Infor. Technol. (ICCIIT 2011)*. IEEE, 2011, pp. 309–314.
- [33] Y.-S. Kuo, P. Pannuto, K.-J. Hsiao, and P. Dutta, "Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light," in *Proc.20th annual Int. Conf. Mob. Comp. Net.*, 2014, pp. 447–458.
- [34] Y. Nakazawa, H. Makino, K. Nishimori, D. Wakatsuki, and H. Komagata, "Indoor positioning using a high-speed, fish-eye lens-equipped camera in visible light communication," in *Int. Conf. Indoor Posit. Indoor Nav.* IEEE, 2013, pp. 1–8.
- [35] U. Nadeem, N. Hassan, M. Pasha, and C. Yuen, "Highly accurate 3d wireless indoor positioning system using white led lights," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 11, pp. 828–830, 2014.
- [36] T.-H. Do and M. Yoo, "Tdoa-based indoor positioning using visible light," *Photonic Netw. Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 80–88, 2014.
- [37] W. Zhang, M. S. Chowdhury, and M. Kavehrad, "Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications," *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 4, p. 045105, 2014.
- [38] L. Li, P. Hu, C. Peng, G. Shen, and F. Zhao, "Epsilon: A visible light based positioning system," in *11th USENIX Symp. Netw. Syst. Design Implement. (NSDI 14)*, 2014, pp. 331–343.
- [39] "The history of lifi," LiFi.co. [Online]. Available: <https://lifi.co/the-history-of-lifi/>
- [40] "Visible light communication," Nakagawa Laboratories. [Online]. Available: http://www.naka-lab.jp/index_e.html
- [41] M. Kavehrad and P. Amirshahi, "Hybrid MV-LV power lines and white light emitting diodes for triple-play broadband access communications," *IEC comprehensive report on achieving the triple play: technologies and business models for success*, pp. 167–178, 2006.
- [42] M. Kavehrad, "Sustainable energy-efficient wireless applications using light," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 12, pp. 66–73, 2010.
- [43] H. Haas, "Lifi is a paradigm-shifting 5g technology," *Reviews in Physics*, vol. 3, pp. 26–31, 2018.
- [44] H. Haas, C. Chen, and D. O'Brien, "A guide to wireless networking by light," *Prog. Quantum Electron.*, vol. 55, pp. 88–111, 2017.
- [45] C.-W. Chow, C. Yeh, Y. Liu, and Y. Liu, "Improved modulation speed of led visible light communication system integrated to main electricity network," *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 15, pp. 867–868, 2011.
- [46] H. Nguyen, J.-H. Choi, M. Kang, Z. Ghassemlooy, D. Kim, S.-K. Lim, T.-G. Kang, and C. G. Lee, "A matlab-based simulation program for indoor visible light communication system," in *2010 7th Int. Symp. Commun. Syst., Netw. Dig. Sig. Proc. (CSNDSP 2010)*. IEEE, 2010, pp. 537–541.
- [47] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, and B. Pricope, "Ofdm visible light wireless communication based on white leds," in *2007 IEEE 65th VTC P*. IEEE, 2007, pp. 2185–2189.
- [48] H. Chun, P. Manousiadis, S. Rajbhandari, D. A. Vithanage, G. Faulkner, D. Tsonev, J. J. D. McKendry, S. Videv, E. Xie, E. Gu *et al.*, "Visible light communication using a blue GAN μ led and fluorescent polymer color converter," *IEEE Photonic. Tech. L.*, vol. 26, no. 20, pp. 2035–2038, 2014.
- [49] 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.
- [50] F. Wu, C.-T. Lin, C. Wei, C. Chen, Z. Chen, H. Huang, and S. Chi, "Performance comparison of ofdm signal and cap signal over high capacity rgb-led-based wdm visible light communication," *IEEE Photonics J.*, vol. 5, no. 4, pp. 7901 507–7901 507, 2013.
- [51] 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.
- [52] M. Liu, K. Qiu, F. Che, S. Li, B. Hussain, L. Wu, and C. P. Yue, "Towards indoor localization using visible light communication for consumer electronic devices," in *2014 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.* IEEE, 2014, pp. 143–148.
- [53] J. Armstrong, Y. A. Sekercioglu, and A. Neild, "Visible light positioning: a roadmap for international standardization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 12, pp. 68–73, 2013.
- [54] S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "Three-dimensional visible light indoor localization using aoa and rss with multiple optical receivers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 14, pp. 2480–2485, 2014.
- [55] M.-g. Moon and S.-i. Choi, "Indoor position estimation using image sensor based on vlc," in *2014 Int. Conf. Adv. Technol. Commun. (ATC 2014)*. IEEE, 2014, pp. 11–14.
- [56] J. Hao, J. Chen, and R. Wang, "Visible light positioning using a single led luminaire," *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 5, pp. 1–13, 2019.
- [57] L. Bai, Y. Yang, C. Guo, C. Feng, and X. Xu, "Camera assisted received signal strength ratio algorithm for indoor visible light positioning," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 2022–2025, 2019.
- [58] L. Bai, Y. Yang, C. Feng, C. Guo, and J. Cheng, "A high coverage camera assisted received signal strength ratio algorithm for indoor visible light positioning," *arXiv preprint arXiv:2004.06294*, 2020.
- [59] B. W. Kim and S.-Y. Jung, "Vehicle positioning scheme using v2v and v2i visible light communications," in *2016 IEEE 83rd Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [60] A. Costanzo and V. Loscri, "Visible light indoor positioning in a noise-aware environment," in *2019 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. (WCNC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [61] D. Li, C. Gong, and Z. Xu, "A rssi-based indoor visible light positioning approach," in *2016 10th Int. Symp. Commun. Syst. Netw. Dig. Sig. Proc. (CSNDSP)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [62] S. Bastiaens, D. Plets, L. Martens, and W. Joseph, "Impact of nonideal led modulation on rss-based vlp performance," in *2018 IEEE 29th PIMRC*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [63] A. A. Saed, S.-W. Ho, L. Lai, and C. W. Sung, "Combinational code for channel estimation in visible light communications and positioning," in *2018 IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [64] W. Gu, M. Aminikashani, P. Deng, and M. Kavehrad, "Impact of multipath reflections on the performance of indoor visible light positioning systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 34, no. 10, pp. 2578–2587, 2016.
- [65] M. Mohammed, C. He, S. Cincotta, A. Neild, and J. Armstrong, "Communication aspects of visible light positioning (vlp) systems using a quadrature angular diversity aperture (qada) receiver," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1977, 2020.
- [66] R. Amsters, E. Demeester, P. Slaets, D. Holm, J. Joly, and N. Stevens, "Towards automated calibration of visible light positioning systems," in *2019 Int. Conf. IPIN*. IEEE, 2019, pp. 1–8.
- [67] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, and H. Okada, "Improved decoding methods of visible light communication system for its using led array and high-speed camera," in *2010 IEEE 71st Veh. Technol. Conf.* IEEE, 2010, pp. 1–5.
- [68] 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.
- [69] J. Contreras-Castillo, S. Zeadally, and J. A. Guerrero-Ibañez, "Internet of vehicles: Architecture, protocols, and security," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 5, pp. 3701–3709, 2018.
- [70] R. M. Maré, 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.
- [71] N. Al Abdulsalam, R. Al Hajri, Z. Al Abri, Z. Al Lawati, and M. M. Bait-Suwailam, "Design and implementation of a vehicle to vehicle communication system using li-fi technology," in *2015 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. Res. (ICTRC)*. IEEE, 2015, pp. 136–139.
- [72] D. Mohammed, D. K. D. Bourzig, M. Abdelkim, and K. Mokhtar, "Digital data transmission via visible light communication (vlc): Application to vehicle to vehicle communication," in *2016 4th Int. Conf. Control Eng. Inf. Technol. (CEIT)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [73] T.-H. Do and M. Yoo, "Visible light communication based vehicle positioning using a rolling shutter cmos sensor," in *2016 8th Int. Conf. Ubiqu. Fut. Netw. (ICUFN)*. IEEE, 2016, pp. 48–50.
- [74] P. K. Sharma, S. Rathore, and J. H. Park, "Distarch-scnct: blockchain-based distributed architecture with li-fi communication for a scalable smart city network," *IEEE Consum. Electr. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 55–64, 2018.
- [75] "Dadicated short range communications (dsr) message set dictionary," SAE. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2735_200911
- [76] A. Sahin, Y. S. Eroglu, I. Guvenc, N. Pala, and M. Yuksel, "Accuracy of aoa-based and rss-based 3d localization for visible light communications," in *2015 IEEE 82nd Veh. Technol. Conf. (VTC2015-Fall)*. IEEE, 2015, pp. 1–5.
- [77] K. Y. Yi, D. Y. Kim, and K. M. Yi, "Development of a localization system based on vlc technique for an indoor environment," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 436–442, 2015.
- [78] J. Hu, C. Gong, and Z. Xu, "Demonstration of a robot controlling and positioning system based on visible light," in *2016 8th Int. Conf. Wirel. Commun. Sig. Proc. (WCSP)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [79] Z. Vatansever and M. Brandt-Pearce, "Visible light positioning with diffusing lamps using an extended kalman filter," in *2017 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. (WCNC)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [80] T. Little, M. Rahaim, I. Abdalla, E. Lam, R. Mcallister, and A. M. Vegni, "A multi-cell lighting testbed for vlc and vlp," in *2018 Global LIFT Congress (GLC)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [81] D. Konings, B. Parr, F. Alam, and E. M.-K. Lai, "Falcon: Fused application of light based positioning coupled with onboard network localization," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 36 155–36 167, 2018.
- [82] N. Chaudhary, L. N. Alves, and Z. Ghassemloooy, "Feasibility study of reverse trilateration strategy with a single tx for VLP," in *2019 2nd WACOWC*, 2019, pp. 121–126.
- [83] A. T. Hussein and J. M. Elmighani, "High-speed indoor visible light communication system employing laser diodes and angle diversity receivers," in *2015 17th Int. Conf. Transp. Opt. Netw. (ICTON)*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [84] A.-M. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, S. Topsis, Y. Alayli, and M. Dimian, "Visible light communications cooperative architecture for the intelligent transportation system," in *2013 IEEE 20th Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*. IEEE, 2013, pp. 1–5.
- [85] A. T. Hussein and J. M. Elmighani, "Performance evaluation of multi-gigabit indoor visible light communication system," in *2015 20th European Conf. Netw. Opt. Commun. (NOC)*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [86] A. T. Hussein, M. T. Alresheedi, and J. M. Elmighani, "Fast and efficient adaptation techniques for visible light communication systems," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 6, pp. 382–397, 2016.
- [87] J. Li, A. Liu, G. Shen, L. Li, C. Sun, and F. Zhao, "Retro-vlc: Enabling battery-free duplex visible light communication for mobile and iot applications," in *Proc. 16th Int. Work. Mob. Comput. Syst. Appl.*, ser. HotMobile '15. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2015, p. 21–26. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2699343.2699354>
- [88] K. N. Datta, P. Das, M. Saha, and S. Saha, "Designing embedded visible light communication system adaptable to fluctuations in light intensity," in *Proc. 21st Int. Conf. Distrib. Comput. Netw.*, 2020, pp. 1–4.
- [89] X. Liu, X. Wei, L. Guo, Y. Liu, Q. Song, and A. Jamalipour, "Turning the signal interference into benefits: Towards indoor self-powered visible light communication for iot devices in industrial radio-hostile environments," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24 978–24 989, 2019.
- [90] J.-H. Yoo, J.-S. Jang, J. Kwon, H.-C. Kim, D.-W. Song, and S.-Y. Jung, "Demonstration of vehicular visible light communication based on led headlamp," *Int. J. Auto. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 347–352, 2016.
- [91] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "Towards a 100 gb/s visible light wireless access network," *Opt. Expr.*, vol. 23, no. 2, pp. 1627–1637, 2015.
- [92] S. Shao, A. Khreishah, M. Ayyash, M. B. Rahaim, H. Elgala, V. Jungnickel, D. Schulz, T. D. Little, J. Hilt, and R. Freund, "Design and analysis of a visible-light-communication enhanced wifi system," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 10, pp. 960–973, 2015.
- [93] Y. Goto, I. Takai, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Kawahito, S. Arai, T. Yendo, and K. Kamakura, "A new automotive vlc system using

- optical communication image sensor," *IEEE photonics journal*, vol. 8, no. 3, pp. 1–17, 2016.
- [94] M. S. Islim, S. Videv, M. Safari, E. Xie, J. J. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, and H. Haas, "The impact of solar irradiance on visible light communications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 36, no. 12, pp. 2376–2386, 2018.
- [95] Y. Hong, L.-K. Chen, and J. Zhao, "Performance-enhanced gigabit/s mimo-ofdm visible light communications using csi-free/dependent precoding techniques," *Optics express*, vol. 27, no. 9, pp. 12 806–12 816, 2019.
- [96] H. Chun, S. Rajbhandari, D. Tsonev, G. Faulkner, H. Haas, and D. O'Brien, "Visible light communication using laser diode based remote phosphor technique," in *2015 IEEE Int. Conf. Commun. Work. (ICCW)*. IEEE, 2015, pp. 1392–1397.
- [97] M. Y. Abualhoul, O. Shagdar, and F. Nashashibi, "Visible light inter-vehicle communication for platooning of autonomous vehicles," in *2016 IEEE Intell. Veh. Symp. (IV)*. IEEE, 2016, pp. 508–513.
- [98] B. Soner and S. C. Ergen, "Vehicular visible light positioning with a single receiver," in *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [99] R. M. Marê, C. L. Marte, C. E. Cugnasca, O. G. Sobrinho, and A. S. dos Santos, "Feasibility of a testing methodology for visible light communication systems applied to intelligent transport systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 100, no. 1e, 2020.
- [100] D. de Matos, G. B. Vitor, and D. B. Karolak, "Desenvolvimento de uma comunicação vlc aplicada à sistemas i2v nas emergentes cidades inteligentes," *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [101] B. Zhou, A. Liu, V. Lau, J. Wen, S. Mumtaz, A. K. Bashir, and S. H. Ahmed, "Performance limits of visible light-based positioning for internet-of-vehicles: Time-domain localization cooperation gain," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020.
- [102] 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 lifi communication systems in traffic lights," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2019, 2019.
- [103] A. Mehra, "Indoor location market worth \$17.0 billion by 2025," *Markets and Markets*. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/indoor-location.asp>
- [104] L. I. Albraheem, L. H. Alhudaithy, A. A. Aljaser, M. R. Aldhafian, and G. M. Bahliah, "Toward designing a li-fi-based hierarchical iot architecture," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 40 811–40 825, 2018.
- [105] A. Al-Qahtani, H. Al-hajri, S. Al-kuwari, N. Al-yaarabi, A. Al-hababi, E. Al-kubaisi, A. Ahmed, M. Kashef, and Q. H. Abbasi, "A non-invasive remote health monitoring system using visible light communication," in *2015 2nd Int. Symp. Future Inf. Commun. Technol. Ubiquitous HealthCare (Ubi-HealthTech)*. IEEE, 2015, pp. 1–3.
- [106] T. Adiono, R. F. Armansyah, S. S. Nolika, F. D. Ikram, R. V. W. Putra, and A. H. Salman, "Visible light communication system for wearable patient monitoring device," in *2016 IEEE Region 10 Conf. (TENCON)*. IEEE, 2016, pp. 1969–1972.
- [107] Y.-K. Cheong, X.-W. Ng, and W.-Y. Chung, "Hazardless biomedical sensing data transmission using vlc," *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 9, pp. 3347–3348, 2013.
- [108] J. Song, W. Ding, F. Yang, H. Yang, J. Wang, X. Wang, and X. Zhang, "Indoor hospital communication systems: An integrated solution based on power line and visible light communication," in *2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [109] W. A. Cahyadi, T.-I. Jeong, Y.-H. Kim, Y.-H. Chung, and T. Adiono, "Patient monitoring using visible light uplink data transmission," in *2015 Int. Symp. Intell. Sig. Proc. Commun. Syst. (ISPACS)*. IEEE, 2015, pp. 431–434.
- [110] N. Kumar, D. Terra, N. Lourenco, L. N. Alves, and R. L. Aguiar, "Visible light communication for intelligent transportation in road safety applications," in *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. IEEE, 2011, pp. 1513–1518.
- [111] A. Şahin, Y. S. Eroğlu, I. Güvenç, N. Pala, and M. Yüksel, "Hybrid 3-d localization for visible light communication systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 22, pp. 4589–4599, 2015.
- [112] A. T. Hussein and J. M. Elmirghani, "10 gbps mobile visible light communication system employing angle diversity, imaging receivers, and relay nodes," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 8, pp. 718–735, 2015.
- [113] E. Eso, A. Burton, N. B. Hassan, M. Abadi, Z. Ghassemlooy, and S. Zvanovec, "Experimental investigation of the effects of fog on optical camera-based vlc for a vehicular environment," in *2019 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [114] A. W. Mir and K. Q. Maqbool, "Robust visible light communication in intelligent transportation system," in *2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4)*. IEEE, 2020, pp. 387–391.
- [115] Y. H. Chung and S.-b. Oh, "Efficient optical filtering for outdoor visible light communications in the presence of sunlight or artificial light," in *2013 Int. Symp. Intell. Signal Proc. Commun. Syst.* IEEE, 2013, pp. 749–752.
- [116] I. Marin-Garcia, F. Miramirkhani, M. Uysal, and R. Perez-Jimenez, "Performance evaluation of vehicle-to-vehicle visible light communications in the presence of denial of service attacks," in *2019 Global LIFI Congress (GLC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [117] H. Yang, W.-D. Zhong, C. Chen, and A. Alphones, "Integration of visible light communication and positioning within 5g networks for internet of things," *IEEE Network*, 2020.
- [118] S. Idris, U. Mohammed, J. Sanusi, and S. Thomas, "Visible light communication: A potential 5g and beyond communication technology," in *2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [119] D. Marabissi, L. Mucchi, S. Caputo, F. Nizzi, T. Pecorella, R. Fantacci, T. Nawaz, M. Seminara, and J. Catani, "Experimental measurements of a joint 5g-vlc communication for future vehicular networks," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 9, no. 3, p. 32, 2020.
- [120] E. W. Lam and T. D. Little, "Visible light positioning for location-based services in industry 4.0," in *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. IEEE, 2019, pp. 345–350.



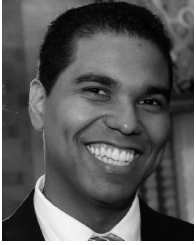
Ana Luísa Rodrigues Gonçalves Técnica em Eletrônica pela Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa (ETE-FMC) em Santa Rita do Sapucaí - MG. Atualmente, graduanda em Engenharia de Controle e Automação na Universidade Federal de Lavras (UFLA) em Lavras - MG e membro do Laboratório de Mobilidade Terrestre (LMT) desde 2017.



Álvaro Henrique Alves Maia Técnico em Mecatrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Nepomuceno. Atualmente graduando em Engenharia de Controle e Automação na Universidade Federal de Lavras (UFLA) em Lavras - MG e membro do Laboratório de Mobilidade Terrestre (LMT) desde 2017.



Mateus Rodrigues Santos é graduado em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) em 2019. Durante a graduação atuou como pesquisador pelo Laboratório de Mobilidade Terrestre (LMT).



Danilo Alves de Lima recebeu o título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 2008 e 2010, e o título de doutor em Tecnologia de Sistemas e Informação pela Universidade de Compiègne (UTC), Compiègne, França, em 2015. Atualmente, é professor adjunto no Departamento de Automática da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e diretor do Laboratório de Mobilidade Terrestre (LMT). Também trabalhou com o Grupo

de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos (PDVA), UFMG, e Heudiasyc UMR 7253, um laboratório de pesquisa comum entre o UTC e o CNRS na França. Suas principais áreas de pesquisa incluem visão computacional, navegação robótica e desenvolvimento de veículos inteligentes.



Arthur de Miranda Neto recebeu (2017) o prêmio Fulbright Faculty Member Award / Universidade da Califórnia, Berkeley. É um laureado (2011) do prêmio Marechal do Ar Casimiro Montenegro Filho da Presidência da República do Brasil por sua tese de doutorado na área de Veículos Autônomos. Realizou Pós-doutorado (2012) em Veículos Autônomos / Inteligentes (Renault/Heudiasyc) na França. Doutor em Tecnologia da Informação e Sistemas pela Universidade de Tecnologia de Compiègne, França, e em Engenharia Mecânica pela UNICAMP. Fundador

do Laboratório de Mobilidade Terrestre (LMT) na Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde é professor, atualmente, licenciado para atividades empresariais. É CEO e Head of R&D da Startup SEVEN GO e pesquisador da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.