RENATA MARIA MARÈ

**PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
COMPLEMENTAR DE POSICIONAMENTO BASEADO EM
COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL APLICADO A SISTEMAS
INTELIGENTES DE TRANSPORTE**

São Paulo
2018

RENATA MARIA MARÈ

**PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
COMPLEMENTAR DE POSICIONAMENTO BASEADO EM
COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL APLICADO A SISTEMAS
INTELIGENTES DE TRANSPORTE**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências.

São Paulo
2018

RENATA MARIA MARÈ

**PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
COMPLEMENTAR DE POSICIONAMENTO BASEADO EM
COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL APLICADO A SISTEMAS
INTELIGENTES DE TRANSPORTE**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Computação

Orientador:
Prof. Dr. Livre Docente
Carlos Eduardo Cughasca

São Paulo
2018

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Marè, Renata Maria

Proposta e avaliação de um sistema complementar de posicionamento baseado em comunicação por luz visível aplicado a sistemas inteligentes de transporte / R. M. Marè -- versão corr. -- São Paulo, 2018.
175 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Sistemas inteligentes de transportes 2.Wireless 3.LED 4.Comunicação por luz visível I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

Dedico este trabalho ao
meu grande amor e
companheiro,
Oswaldo Gogliano Sobrinho.
Sem você, eu seria
bem menos do que sou.

Dedico-o também aos
meus pais, Maria Valentina de
Oliveira Marè e Marcello Marè.

Obrigada por tudo que me
proporcionaram em vida e além.

Sei que vocês sempre estarão
comigo, mas adoraria beijá-los e
abraçá-los novamente!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Livre-Docente Carlos Eduardo Cugnasca, por acreditar em minha capacidade, me orientar, e me resgatar nos momentos mais difíceis dessa jornada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de doutorado concedida.

Aos Profs. Flávio Vaz e André Hirakawa (Engenharia de Transportes e Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, respectivamente), por suas preciosas contribuições ao longo do meu doutorado.

Ao Prof. Claudio Marte (Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), por compartilhar os seus conhecimentos e muitas oportunidades, tornando-se um colega de pesquisa e um amigo.

Aos meus colegas do Laboratório de Automação Agrícola, aqui representados pelo doutorando Bruno Kawano Rógora, grande parceiro e amigo.

À equipe do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE), com destaque ao Prof. Arnaldo Kanashiro, ao Eng. Rinaldo C. Pinto e ao físico Marcelo de O. Jesus, que gentilmente cederam as instalações do IEE, o seu tempo e os seus conhecimentos para a realização de testes relevantes à minha pesquisa.

Ao Prof. José Kleber Cunha Pinto (Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Escola Politécnica), pela produtiva troca de idéias.

Ao técnico Jair Pereira de Souza (Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Escola Politécnica), pelo auxílio durante a montagem dos protótipos eletrônicos.

Ao Prof. Marcelo Martinelli (Instituto de Física da Universidade de São Paulo), pela disposição em compartilhar conhecimentos e instalações.

Às empresas Opencadd, Ilumatic S/A – Iluminação e Eletrometalúrgica, Proteon Indústria e Comércio Ltda., Off Light Indústria Eletrônica Ltda. e Holovision Equipamentos Óticos Ltda., por acreditarem no meu trabalho e cederem equipamentos, dispositivos e softwares

essenciais à minha pesquisa.

À equipe da Gerência de Transportes Especiais da Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), aqui representada pelo Eng. Antonio Tadeu de Oliveira, que me acompanharam em medições estratégicas na cidade de São Paulo.

À equipe do Laboratório de Interoperabilidade de Equipamentos de ITS do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), aqui representada pelo Eng. Alessandro Santiago dos Santos, que cederam suas instalações e colaboraram ativamente na realização de testes do meu protótipo.

Aos colegas de pesquisa graduando Andrei Ferreira e Mestre Eng. Rafael de Aquino Cunha, que me ajudaram a chegar até aqui graças ao seu comprometimento, à sua dedicação e ao compartilhamento de conhecimentos.

Ao graduando Diogo Kawamoto, pela sua colaboração na etapa de simulação computacional.

À Dra. Carolina Michaela Torelli, por todo o apoio em nosso trabalho conjunto no caminho do autoconhecimento.

À minha segunda mãe, Julieta Gogliano, pelo seu olhar amoroso que nunca me deixará.

À Cuca, à Brisa e ao Cacao, amor incondicional em forma de cães.

Lux est umbra Dei – A luz é a sombra de Deus

(John Addington Symonds)

RESUMO

O uso crescente de dispositivos móveis e o advento da Internet das Coisas têm demandado esforços para prover alternativas de comunicação sem fio. A utilização de sistemas óticos para a transmissão de dados apresenta-se como uma tecnologia promissora e complementar à comunicação por radiofrequência, especialmente devido aos desenvolvimentos consideráveis na tecnologia de iluminação por estado sólido e sua adoção em vários domínios. Os diodos de emissão de luz podem ser utilizados na promoção de comunicação por luz visível em ambientes internos e externos. Nos ambientes externos há inúmeras oportunidades a serem exploradas no que concerne aos Sistemas Inteligentes de Transporte, visto que os diodos de emissão de luz têm sido utilizados em luminárias públicas, semáforos e veículos. Esta pesquisa propôs o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de comunicação por luz visível entre elementos da infraestrutura urbana e veículos, mais especificamente, luminárias públicas baseadas em diodos de emissão de luz e o modal de transporte público representado pelos ônibus que circulam em faixas exclusivas. A metodologia foi composta por simulação computacional e pela construção de um protótipo para auxiliar na validação das soluções propostas. O sistema complementar de comunicação sem fio por meio da luz proposto fornece pode fornecer subsídios à determinação do posicionamento preciso dos ônibus, suprimindo as deficiências do sistema GPS em locais menos favoráveis à recepção de seus sinais em uma cidade. Essas informações auxiliam os usuários e os gestores do transporte público, atendendo alguns domínios de serviço em Sistemas Inteligentes de Transporte, de acordo com a norma ISO 14813. Os resultados obtidos nos testes com o protótipo, bem como, aqueles observados na simulação, comprovaram a viabilidade do sistema proposto, com o estabelecimento da comunicação entre luminária e ônibus, inclusive quando trafegando a 60 km/h.

Palavras-Chave: Comunicação por luz visível. Sistemas inteligentes de transporte. Sistemas de posicionamento. Comunicação sem fio. Diodo emissor de luz. LED.

ABSTRACT

The increasing use of mobile devices and the advent of the Internet of Things have called for efforts to provide alternatives for wireless communication. The use of optical systems for data transmission is a promising and complementary technology to radiofrequency communication, especially due to the considerable developments in solid-state lighting technology and its adoption in various domains. Light-emitting diodes can be used to promote visible light communication in indoor and outdoor environments. In outdoor environments there are numerous opportunities to be explored with regard to Intelligent Transport Systems, since light-emitting diodes have been used in public luminaires, traffic lights and vehicles. This research proposed the development and evaluation of a visible light communication system between elements of the urban infrastructure and vehicles, more specifically, public luminaires based on light-emitting diodes and the mode of public transport represented by buses that circulate in exclusive lanes. The methodology was composed by computational simulation and the construction of a prototype, to assist in the validation of the proposed solutions. The proposed complementary wireless communication system through light provides subsidies to determine the precise positioning of buses, supplying deficiencies of the GPS system in places less favorable to the reception of their signals in a city. This information helps the users and the managers of the public transport, attending some service domains in Intelligent Transport Systems, according to the ISO 14813 standard. The results obtained in the tests with the prototype, as well as those observed in the simulation, proved the feasibility of the proposed system, with the establishment of communication between luminaire and bus, even when traveling at 60 km/h.

Keywords: Visible Light Communication. Intelligent Transport Systems. Positioning systems. Wireless communication. Light-Emitting Diodes. LED.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Nota publicada por Round em 1907	28
Figura 2 - Oleg Vladimirovich Losev, 1903–1942.....	29
Figura 3 - Ilustração da parte transmissora de um fotofone, com a luz do sol sendo refletida e, a seguir, modulada por meio da vibração do espelho ...	32
Figura 4 - Ilustração da parte receptora de um fotofone, com a luz do sol sendo demodulada pelo espelho parabólico, provido de uma célula de selênio	33
Figura 5 - Espectro eletromagnético	34
Figura 6 - Modelo simplificado de canal VLC e possíveis interferências	35
Figura 7 - Cenário ilustrativo C-ITS	41
Figura 8 - Matriz de LED e câmera de alta velocidade	43
Figura 9 - Fontes luminosas diversas: potenciais transmissores de informação.....	44
Figura 10 - Constelação de satélites GPS	46
Figura 11 - Exemplo de receptor estacionário ou de referência.....	49
Figura 12 - Recepção de informações por câmera de <i>smartphone</i> em uma exposição	51
Figura 13 - Sistema Philips de posicionamento interno baseado em LED.....	52
Figura 14 - Aplicativo do Sistema Philips de posicionamento	53
Figura 15 - Sistema Li-1st desenvolvido pela empresa pureLiFi.....	53
Figura 16 - Kit LiFi XS desenvolvido pela empresa Oledcomm	54
Figura 17 - Imagem recebida por sensor CMOS a 10 m do transmissor (esquerda) e a 70 m (direita).....	57
Figura 18 - Câmera de alta velocidade empregada em um LPS por imagem ..	57
Figura 19 - Imagem captada por sensor CMOS estável (esquerda) e em movimento (direita).....	60
Figura 20 - Pontos de interesse obtidos após a aplicação de filtros na imagem original	61
Figura 21 - Exemplo de faixa exclusiva.....	63
Figura 22 – Esquemático da tecnologia embarcada em ônibus urbanos.....	66
Figura 23 - Estação de ônibus conectada Ericsson	67
Figura 24 - EyeStop, projeto conjunto do MIT e da ATAF.....	68

Figura 25 - Exemplos de novos pontos de ônibus adotados em São Paulo – SP	68
Figura 26 - e-Ponto instalado pela SPTrans para testes.....	69
Figura 27 – Esquemático da aplicação proposta	75
Figura 28 - Representação ilustrativa de cores falsas segundo simulação com escala de lux: maior incidência de luz na faixa exclusiva.....	76
Figura 29 - Esquema de distribuição e instalação de luminárias	77
Figura 30 - Diferença entre corredor (figura à esquerda) e faixa exclusiva de ônibus (à direita): observa-se que, na faixa exclusiva, o ônibus circula sempre ao lado da calçada.....	78
Figura 31 - Protótipos em escala reduzida e real.....	79
Figura 32 – Luminária a LED LiFi Beacon.....	81
Figura 33 – Onda amarela: associada ao sinal gerado pela luminária LiFi Beacon	82
Figura 34 – Diagrama de blocos do circuito receptor (protótipo em escala reduzida)	82
Figura 35 – Exemplos de sinais elétricos no sensor VLC: (a - azul) saída do fotodiodo; (b - vermelha) saída do sinal com derivação; (c - verde) saída do sinal com <i>triggering</i>	84
Figura 36 - Esquema elétrico do circuito receptor (protótipo em escala reduzida)	84
Figura 37 – Esquema de equivalência entre sistemas VLC: protótipo em escala reduzida (luminária LiFi Beacon) e em escala real (luminária pública Maestra)	85
Figura 38 – Distâncias (Tx – Rx) e iluminâncias: caso real.....	86
Figura 39 - Distâncias (Tx – Rx) e iluminâncias: modelo reduzido	87
Figura 40 – Circuito receptor acoplado ao bólido (verso).....	89
Figura 41 – Circuito receptor acoplado ao bólido (frente)	89
Figura 42 – Configuração do cenário para o teste do sistema VLC proposto...	90
Figura 43 – Bólido em movimento passando em frente à luminária Li-Fi- Beacon	90
Figura 44 – Outras fontes luminosas: janelas ao fundo, lâmpadas fluorescentes e de mercúrio	91
Figura 45 – Equipamento Testo 435	91

Figura 46 - Exemplo de modelo utilizando o <i>script</i> com o gráfico gerado.....	93
Figura 47 - Interface criada com o GUI do MatLab	94
Figura 48 - Modelo de emissão de Lambert.....	102
Figura 49 - Iluminância ao longo da via (lux).....	103
Figura 50 - Montagem da luminária junto à via pública.....	104
Figura 51 - Diagrama de blocos do simulador da luminária	104
Figura 52 - Sinais gerados pelo módulo "Luminária"	105
Figura 53 - Bloco principal da simulação.....	106
Figura 54 - Sinais do bloco de simulação.....	107
Figura 55 - Taxa de Erro (BER) X Relação sinal/ruído (SNR)	108
Figura 56 - Variação de SNR ao longo do plano à altura do teto do ônibus ...	110
Figura 57 - Valores de SNR no plano situado à altura do ônibus	111
Figura 58 – Painel a LED para mensagens variáveis (itinerário eletrônico)....	121
Figura 60 – Túnel Daher Cutait sentidos centro e bairro: diferenças na iluminação interna	154
Figura 61 – Túnel Anhangabaú sentido Zona Norte	155
Figura 63. Terminais rodoviários	157
Figura 64 - Luminária a LED Maestra II 150W dimerizável.....	158
Figura 65 – Esquema elétrico do circuito transmissor (protótipo em escala real)	158
Figura 66 - Diagrama de blocos do circuito receptor.....	159
Figura 67 – Espectro da luz solar.....	160
Figura 68 – Distribuição espectral relativa por cor de LED	161
Figura 69 - Esquema elétrico do circuito receptor.....	162
Figura 70 – Foto do circuito receptor desenvolvido para o protótipo em escala real	163

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Potencial tecnologia de comunicação sem fio e aplicação ITS.....	40
Quadro 2 - Distâncias (Tx – Rx) e iluminâncias (protótipo real e reduzido)	86
Quadro 3 - Diferentes cenários de teste e intensidades luminosas no ambiente e no fotodiodo.....	92
Quadro 4 - Cenários, leituras e os respectivos valores de BER calculados	99
Quadro 5 - Artigos e Patentes relativos a VLC.....	148
Quadro 6 - Intensidades luminosas no Túnel José Roberto Fanganiello Melhem	153
Quadro 7 - Intensidades luminosas no Túnel Daher Cutait (9 de Julho)...	154
Quadro 8 - Intensidades luminosas no Túnel Anhangabaú (Sentido Zona Norte)	155
Quadro 9 - Intensidades luminosas no Túnel Anhangabaú (Sentido Zona Sul).....	156
Quadro 10 - Intensidades luminosas nos terminais (média de 10 leituras realizadas na área central dos mesmos - lx)	157
Quadro 11 - Componentes propostos para o circuito elétrico do transmissor	159
Quadro 12 - Componentes propostos para o circuito elétrico do receptor	162

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BER	<i>Bit Error Rate</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CSK	<i>Color-Shift Keying</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DPPM	<i>Differential PPM</i>
DSRC	<i>Dedicated Short-Range Communication</i>
FOV	<i>Field of View</i>
FSO	<i>Free-Space Optical</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPIO	<i>General Purpose Input-Output</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IoV	<i>Internet of Vehicles</i>
IrDA	<i>Infrared Data Association</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITS	<i>Intelligent Transport Systems</i>
IV	<i>Infravermelho</i>
I2V	<i>Infrastructure-to-Vehicle</i>
I2V2I	<i>Infrastructure-to-Vehicle-to-Infrastructure</i>
JEITA	<i>Japan Electronics and Information Technology Industries Association</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
LC	<i>Light Communications</i>
Li-Fi	<i>Light Fidelity</i>
LPS	<i>Light Positioning Systems</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
OCC	<i>Optical Camera Communications</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>

OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>
PHY	<i>Physical layer</i>
PPM	<i>Pulse-Position Modulation</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RLL	<i>Run-Length limited</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
VLCC	<i>Visible Light Communication Consortium</i>
VLP	<i>Visible Light Positioning</i>
VPPM	<i>Variable Pulse-Position Modulation</i>
V2H	<i>Vehicle-to-Human</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
V2S	<i>Vehicle-to-Sensor</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
V2X	<i>Vehicle-to-Everything</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
HIPÓTESE	21
OBJETIVO	21
JUSTIFICATIVA	22
DIFERENCIAL DESTA PROPOSTA.....	23
DESENVOLVIMENTO DO DOCUMENTO.....	24
1 REVISÃO DA LITERATURA	26
1.1 COMUNICAÇÃO ÓTICA SEM FIO.....	26
1.2 TECNOLOGIA LED	27
1.3 COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL	31
1.4 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE	36
1.5 COMUNICAÇÃO EM ITS	39
1.5.1 VLC em ITS	41
1.6 GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS).....	45
1.6.1 GPS Diferencial (<i>Differential GPS</i> - DGPS).....	48
1.7 VLC E POSICIONAMENTO	49
1.7.1 VLC em Aplicações de Posicionamento Interno.....	50
1.7.2 VLC em Aplicações de Posicionamento Externo	55
1.8 TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS	62
1.9 GPS E O TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS	63
1.10 TECNOLOGIA E O TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS	65
1.11 NORMALIZAÇÃO	70
1.11.1 IV e VLC	70
1.11.2 Comunicação V2V, V2I e I2V	71
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
2.1 Aplicação Proposta.....	75
2.1.1 Condições de contorno.....	76
2.2 Desenvolvimento do Protótipo.....	78
2.2.1 Protótipo em escala reduzida	81
2.2.2 Equivalência entre protótipos	85
2.2.3 Teste de desempenho	88

2.3	Simulação Computacional	92
2.4	Atividades complementares.....	95
2.5	Considerações sobre este capítulo	96
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
3.1	Protótipo em escala reduzida	97
3.1.1	Efetividade da comunicação	97
3.1.2	Taxa de erros de transmissão (BER)	98
3.1.3	Tamanho do pacote de dados em função da velocidade do bólide	100
3.2	Simulação computacional.....	101
3.2.1	Modelagem do Canal.....	101
3.2.2	Taxa de erros de transmissão (BER)	104
3.2.3	Avaliação da relação sinal/ruído (SNR).....	107
3.2.4	Tamanho do pacote de dados em função da velocidade do ônibus	108
3.3	Considerações sobre este capítulo	111
4	CONCLUSÕES.....	113
4.1	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	113
4.1.1	Testes com o protótipo	113
4.1.2	Simulações computacionais	114
4.2	Contribuições	115
4.2.1	Patente	116
4.2.2	Pesquisas em VLC nos contextos de ITS e <i>Internet of Vehicles</i>	116
4.2.3	Sistemas de comunicação sem fio	116
4.2.4	Aplicações em ITS e IoV	117
4.2.5	Cidades inteligentes	117
4.2.6	Testes em laboratório	118
4.2.7	Simulações computacionais	118
4.3	Dificuldades encontradas	118
4.4	Aprimoramentos e pesquisas futuras	119
4.4.1	Circuitos digitais dedicados	119
4.4.2	Conjuntos receptores.....	119
4.4.3	Mensagens diversas.....	120

4.4.4	Protótipo em escala real	120
4.4.5	Sistema de comunicação <i>full duplex</i>	120
4.4.6	Sistema de comunicação V2V	121
4.4.7	Simulações computacionais	121
4.4.8	Receptores óticos baseados em imagem.....	122
4.4.9	Segurança da informação.....	122
4.4.10	Posicionamento em ambientes internos.....	122
4.5	Considerações finais	123
REFERÊNCIAS		125
APÊNDICE A - Resultados Acadêmicos		142
A.1	Artigo Publicado em Periódico.....	142
A.2	Artigos Submetidos e em Desenvolvimento	142
A.3	Pedido de Patente	143
A.4	Congresso Internacional.....	143
A.5	Congresso Nacional	145
A.7	Prêmio	146
A.8	Bolsas da Pesquisadora	147
APÊNDICE B – Quadro comparativo entre artigos e patentes referentes a sistemas de posicionamento VLC em ambientes externos e a presente proposta		148
APÊNDICE C – Resumo e considerações das patentes discriminadas no APÊNDICE B		149
APÊNDICE D – Medições de intensidade luminosa realizadas em túneis da capital paulista: Túnel José Roberto Fanganiello Melhem, Daher Cutait (9 de Julho) e Anhangabaú		153
Medições de intensidade luminosa realizadas em túneis da capital paulista: Túnel Daher Cutait (9 de Julho)		154
Medições de intensidade luminosa realizadas em túneis da capital paulista: Túnel Anhangabaú Sentido Zona Norte		155
Medições de intensidade luminosa realizadas em túneis da capital paulista: Túnel Anhangabaú Sentido Zona Sul		156
APÊNDICE E – Medições de intensidade luminosa realizadas em terminais de ônibus da capital paulista: Lapa, Barra Funda e Pinheiros.....		157

APÊNDICE F - Protótipo em Escala Real - Proposta para Pesquisa	
Futura	158
ANEXO A – Estudo luminotécnico da Luminária Maestra 150	
realizado pelo fabricante.....	164
ANEXO B – Estudo Luminotécnico da Luminária OledComm	
LiFiBeacon realizado pelo IEE / USP	174

INTRODUÇÃO

É crescente em todo o mundo a disseminação de dispositivos móveis de várias naturezas, de *smartphones* a vestíveis. Crescem também as aplicações Máquina-Máquina (*Machine-to-Machine* - M2M), acompanhando a evolução da Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT), com dispositivos providos de mais recursos e “inteligência” (JAYAVARDHANA et al., 2013). Uma pesquisa realizada pela empresa Cisco (CISCO, 2015), voltada às previsões de tráfego de dados devido a estes atores no mundo, mostrou que, só em 2014, cerca de meio bilhão de novos dispositivos móveis e conexões foram inseridos no mercado, sendo que, até 2019, este número atingirá a casa dos 11,5 bilhões. Prevê-se ainda que, dispositivos como receptores do *Global Positioning System* (GPS) embarcados em veículos, sistemas de rastreabilidade de ativos e aplicações *e-health*, dentre outras, promoverão 3,2 bilhões de conexões M2M. Como consequência, demandam-se cada vez mais canais de comunicação sem fio.

Há mais de 30 anos se pesquisa a transmissão de dados por meios óticos sem fio (Optical Wireless Communication – OWC). Trata-se da transmissão de dados por meio de raios óticos, tanto no ar como no vácuo. Dentre as alternativas de sistemas de comunicação OWC, destaca-se aquela realizada por meio da luz visível (Visible Light Communication – VLC). Com o advento do Light-Emitting Diode (LED), um diodo emissor de luz, inúmeros pesquisadores vêm investigando a sua capacidade de transmitir dados, a partir de uma característica singular: a modulação da luz (BORAH et al., 2012) (TSONEV et al., 2013). Uma vez que o LED é um semicondutor, ele pode ser comutado em alta velocidade (da ordem de nanossegundos), de modo a gerar na saída um sinal detectável por um fotodiodo, mas não pelo olho humano. Ou seja, a modulação do LED pode dar-se a frequências superiores à Frequência Crítica de Cintilação (Critical Flicker Frequency – CFF), geralmente da ordem de 100 Hz. Desta forma, pode-se utilizar este recurso para a transmissão de dados, inclusive em altas velocidades (superiores a 1 Gb/s), sem causar dano ou desconforto ao ser humano (BHALERAO et al., 2013). O espectro disponível para a VLC, não regulamentado (faixa de 400 a 790 THz), indica o seu grande potencial de utilização, especialmente quando comparado à radiofrequência

(TSONEV et al., 2013). Um estudo realizado em 2014 pela empresa Markets and Markets estima que o mercado de VLC deva alcançar US\$ 9,30 bilhões até 2020, a uma taxa de crescimento anual de 87,31% (MARKETS AND MARKETS, 2014b). No entanto, a tecnologia VLC também apresenta desvantagens frente à comunicação por rádio. Podem-se destacar a distância reduzida de comunicação e a necessidade de visada direta, que podem ser fatores limitantes em muitas aplicações, além dos desafios ao ar livre, que residem nas interferências geradas por outras fontes de luz (naturais e artificiais), condições climáticas, neblina e fumaça (GHASSEMLOOY et al., 2013) (LOURENÇO et al., 2012).

Com relação ao LED, base da VLC, uma pesquisa da empresa Edison Investment Research aponta para um crescimento expressivo em sua adoção ao redor do mundo, com 63% de toda a iluminação empregando LEDs, até 2020 (EDISON INVESTMENT RESEARCH, 2013). Essa tecnologia apresenta diversas características vantajosas comparando-se as tecnologias de iluminação convencionais, a exemplo de maior vida útil, consumo de energia reduzido, possibilidade de dimerização, além de ser inofensiva ao olho humano. Dentre os domínios de aplicação do LED, destaca-se o das cidades, nas quais diversos elementos de sua infraestrutura como semáforos, painéis e luminárias públicas, vêm incorporando essa tecnologia. Em paralelo, a indústria automobilística vem adotando progressivamente os LEDs em lanternas de veículos (MEDINA et al., 2015) (SHUN-HSIANG et al., 2013) (KUMAR e LOURENCO, 2010).

Combinados, esses dois domínios de aplicação vêm abrindo possibilidades de utilização de sistemas VLC no contexto de Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transport Systems – ITS*), uma vez que ele pode proporcionar a transmissão de dados concomitantemente às funções de sinalização e/ou iluminação. Utiliza-se o termo ITS para descrever sistemas de transporte nos quais veículos, infraestrutura e ambiente interagem, provendo aos usuários melhores experiências de guiagem e deslocamento, por meio de sistemas viários mais seguros e com melhor capacidade de escoamento. Isso é possível a partir da integração de informação, tecnologias da informação e sistemas de comunicação diversos, aplicados ao campo dos transportes (WILLIAMS, 2008) (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE

TRANSPORTES PÚBLICOS, 2012). Pesquisadores de vários países vêm desenvolvendo aplicações e protocolos que possibilitam a comunicação entre veículos, *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), veículos e infraestrutura, *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) e vice-versa, *Infrastructure-to-Vehicle* (I2V) (SHENG-HAI et al., 2011; ZHANG et al., 2011). Pesquisa realizada pela empresa Markets and Markets aponta que o mercado de comunicação entre veículos deve alcançar cifras da ordem de US\$46,69 bilhões até 2020, com uma taxa de crescimento anual de 10,82% (MARKETS AND MARKETS, 2014a).

Dado este contexto, apresentam-se a seguir a hipótese, o objetivo e a justificativa desta pesquisa.

HIPÓTESE

Dado que:

- Especialmente em grandes centros urbanos, há inúmeros fatores que comprometem a recepção de coordenadas posicionais por meio da tecnologia do GPS (interferências, obstáculos à visada de satélites, multicaminhamento dos sinais).
- No que concerne ao transporte público sobre pneus (ônibus), essa informação é essencial aos seus gestores para o dimensionamento e gestão da frota.

Partiu-se da hipótese que:

- A rede de iluminação pública urbana poderia ser também uma rede sem fio de comunicação por luz visível, capaz de transmitir coordenadas posicionais precisas aos ônibus em locais estratégicos, onde não haja a recepção das mesmas por receptores do GPS, em complemento a essa tecnologia.

A partir daí, definiu-se o objetivo da pesquisa.

OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa foi propor e avaliar a viabilidade de um sistema de comunicação por luz visível entre luminárias públicas a LED e os ônibus que trafegam em faixas exclusivas, capaz de transmitir informações

posicionais em locais onde não haja a recepção das mesmas pelo GPS, provendo subsídios essenciais aos gestores, responsáveis pelo dimensionamento e gestão da frota.

JUSTIFICATIVA

Observa-se que esta pesquisa congrega várias áreas que vêm apresentando expressivo desenvolvimento e relevância, conforme exposto: IoT, sistemas de comunicação sem fio, LED, ITS, VLC e sistemas de posicionamento. Pode-se, portanto, justificar a relevância do tema sob vários aspectos:

- A demanda crescente por meios de comunicação sem fio justifica a proposição e a investigação de tecnologias complementares às usuais, como radiofrequência e de telefonia móvel, como o *Global System for Mobile Communications* (GSM), que já apresentam gargalos, como se pode observar em grandes centros urbanos;
- Devido às suas vantagens frente às tecnologias convencionais de iluminação, o LED vem sendo adotado globalmente em inúmeros domínios. O LED pode ser modulado, de tal sorte que, concomitantemente ao provimento de iluminação ou sinalização, pode se tornar um elemento transmissor de dados;
- A área de ITS vem se tornando cada vez mais relevante, visando incrementar a mobilidade, a segurança e a qualidade dos deslocamentos em diversos contextos. Baseia-se em tecnologias diversas incorporadas aos transportes e em informações correlatas;
- Potencialmente, nos centros urbanos já existe uma infraestrutura a ser explorada, capaz de compor uma rede de comunicação sem fio complementar às usuais: essa rede seria composta por luminárias públicas a LED (dentre outros elementos da infraestrutura urbana) e veículos, podendo atender a demandas diversas como, por exemplo, as relacionadas ao transporte público (ITS), por meio da VLC;
- Dentre as oportunidades vislumbradas em ITS, destaca-se a transmissão de coordenadas posicionais aos ônibus, por meio das luminárias públicas, especialmente em locais onde essa informação,

essencial ao planejamento e gestão deste modal, não esteja disponível por via satelital como em ambientes fechados (terminais, túneis, garagens) ou em áreas densamente urbanizadas (geração de sombras ou multicaminhamento).

- Este serviço poderá atender a um ou mais domínios de ITS, de acordo com a norma ISO 14813¹ (ABNT, 2011);
- O compartilhamento de elementos da infraestrutura urbana entre várias utilidades desponta como tendência no contexto de cidades inteligentes, contornando problemas como o forte adensamento urbano que resulta na carência de espaços livres (e no consequente aumento dos preços por m²), no excesso de poluição visual e pontos cegos de comunicação. Além disso, este compartilhamento poderá levar a um modelo de negócio que acelere o tempo de retorno do investimento realizado em infraestrutura, beneficiando todos os usuários e, portanto, a pressão nos orçamentos públicos. A proposta desta pesquisa está alinhada com esta tendência, visto tratar-se de um sistema de comunicação sem fio por meio de luminárias públicas no contexto de ITS.

Quando indagado pela autora sobre a sua opinião em relação à tecnologia Visible Light Communication, o Prof. Dr. Mischa Dohler respondeu²: “Ainda é cedo para ela. No entanto, o seu momento vai chegar e eu acredito no seu potencial comercial. Portanto, agora é um bom momento para estudá-la.”

DIFERENCIAL DESTA PROPOSTA

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, identificou-se o diferencial da proposta quando de um trabalho colaborativo desenvolvido com uma equipe de pesquisadores dos Departamentos de Engenharia de Transportes, de Engenharia de Produção e de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da

¹ Sistemas inteligentes de transporte – Arquiteturas de modelo de referência para ITS.

² Depoimento dado pelo Prof. Dr. Mischa Dohler (Chair Professor of Wireless Communications and Head of the Centre for Telecommunications Research (CTR) at King's College University - London) no curso internacional São Paulo School of Advanced Science on Smart Cities, Universidade de São Paulo, São Paulo, em 25 julho de 2017.

Universidade de São Paulo. Estes já vinham elaborando uma proposta de um sistema e processo correlato de correção diferencial GPS/GNSS de posicionamento de veículos, mas faltava-lhes identificar uma tecnologia complementar capaz de transmitir coordenadas posicionais precisas, em complemento ao GPS, sem grandes intervenções na infraestrutura urbana e custos expressivos. A incorporação da tecnologia VLC no contexto dessa pesquisa à proposta destes pesquisadores, permitiu a conclusão da mesma, inclusive em nível de solicitação de patente, o que denota o seu caráter inovador (MARÈ et al., 2016). Afinal, cada luminária possui coordenadas georeferenciadas únicas e passíveis de determinação por topografia clássica, podendo suprir as deficiências do sinal GPS e/ou fornecer informações redundantes para efeito de correção daquele sistema.

Realizou-se um levantamento do estado da arte nessa área – sistemas de posicionamento de veículos baseados em VLC – tanto em nível acadêmico quanto de patentes, concluindo-se que, até o momento da submissão do pedido de patente ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, 2016), não se tinha conhecimento de um sistema e processo correlato de posicionamento de veículos que utilizassem VLC, GPS Diferencial (*Differential GPS* - DGPS) e GPS. Maiores informações sobre os resultados desse levantamento se encontram disponíveis nos Apêndices B e C.

DESENVOLVIMENTO DO DOCUMENTO

Este documento segue, em sua apresentação, a ordem na qual a pesquisa foi realizada.

No Capítulo 1 apresentam-se, por meio da Revisão da Literatura, os principais conceitos e vários estudos relativos às áreas que fornecem a contextualização para o tema desta pesquisa e o embasamento técnico para o seu desenvolvimento: comunicação ótica sem fio, tecnologia LED, comunicação por luz visível (VLC), ITS, comunicação em ITS, VLC em ITS, GPS, DGPS, GPS e o transporte público, grandes cidades e o transporte público viário e, finalmente, normalização em IV, VLC, e em comunicação V2V, V2I e I2V.

No Capítulo 2, Materiais e Métodos, descrevem-se as atividades desenvolvidas e os materiais aplicados, que permitiram a construção do protótipo e do modelo para a simulação do sistema proposto.

No Capítulo 3, apresenta-se a Análise dos Resultados obtidos na pesquisa.

No Capítulo 4 apresentam-se as Conclusões dessa pesquisa, bem como, sugestões de Trabalhos Futuros.

Após a lista de Referências, têm-se Apêndices e Anexos, que possuem informações adicionais sobre os trabalhos de pesquisa realizados.

1 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura aborda os principais aspectos relacionados aos seguintes temas: comunicação ótica sem fio (*Optical Wireless Communication* – OWC); tecnologia de LED (*Lighting-Emitting Diode* – LED); comunicação pela luz visível (*Visible Light Communication* – VLC); Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transport Systems* – ITS); comunicação em ITS; VLC em ITS; sistemas de posicionamento geográfico por meio da recepção e tratamento de sinais provenientes de satélites (*Global Positioning System* – GPS); GPS Diferencial (*Differential GPS* – DGPS); GPS e transporte público; VLC e posicionamento; grandes cidades e o transporte público viário; normalização relacionada à comunicação por meio de IV e VLC e normalização relativa às comunicações entre veículos e infraestrutura.

1.1 COMUNICAÇÃO ÓTICA SEM FIO

Os sistemas de comunicação ótica sem fio operam por meio de transmissores e receptores, com comunicação ponto a ponto. Normalmente encontram-se com facilidade os componentes utilizados a preços competitivos (BORAH et al., 2012) (TSONEV et al., 2013).

Mais recentemente, verifica-se a maior atenção dedicada aos meios de comunicação OWC, tanto da comunidade científica quanto de empresas, dada a constante demanda da sociedade por meios de comunicação sem fio, que estejam disponíveis a todo o momento e com velocidades de transmissão cada vez maiores.

Atualmente, os meios de transmissão de dados sem fio mais populares baseiam-se em radiofrequência, atingindo velocidades da ordem de 100 Mbps. Para pequenas distâncias (de 0 a 30 m), os meios de comunicação óticos sem fio apresentam-se como alternativas promissoras (LI-FI CONSORTIUM, 2011).

Além das altas velocidades de transmissão de dados, os meios óticos apresentam outras vantagens comparativamente à radiofrequência como (ELGALA et al., 2011) (BORAH et al., 2012):

- Amplo espectro de frequências disponível (da ordem de centenas de

THz), sem restrições de uso, precificação ou regulamentação;

- Inofensivos aos olhos e não causam efeitos biológicos;
- Não sofrem ou causam interferências a outros meios de comunicação e/ou equipamentos;
- *Links* de comunicação extremamente privados, seguros (não atravessam paredes) e direcionáveis;
- Consomem significativamente menos energia, comparativamente aos dispositivos de rádio.

Organizações como a Infrared Data Association – IrDA, que desde 1993 se dedica ao desenvolvimento e normalização da tecnologia de infravermelho (IV), constituiu, em 2011, um novo grupo de pesquisa visando ao aprimoramento da consolidada norma de 1 Gbps para 5 e 10 Gbps (INFRARED DATA ASSOCIATION, 2011) (FRAUNHOFER INSTITUTE FOR PHOTONIC MICROSYSTEMS IPMS, 2012).

Também em 2011, um grupo de empresas do hemisfério norte formou o Li-Fi Consortium (LI-FI CONSORTIUM, 2011), que investe no desenvolvimento de produtos com ênfase na transmissão de dados por infravermelho em ambientes internos.

Apresenta-se, a seguir, a tecnologia de LED, base da VLC e, posteriormente, item específico dedicado a esta tecnologia.

1.2 TECNOLOGIA LED

Associa-se frequentemente o termo LED àqueles diodos que emitem luz visível, ou seja, operam no espectro de 750 nm (vermelho) a 420 nm (violeta) aproximadamente. Há também os chamados LEDs de infravermelho (*Infrared LED* - IR-LED), que operam na faixa superior a 800 nm, ou seja, não visível.

Apresenta-se, a seguir, um breve histórico dos estudos e das descobertas que levaram aos LEDs de luz visível, foco deste trabalho.

Em 1907, o pesquisador inglês Henry J. Round, um dos assistentes do físico Guglielmo Marconi, relatou ter observado emissões de várias cores de luz visível, de forte brilho, a partir da região de um semicondutor próxima a um

ponto de contato com metal. Este diodo era de carbeto de silício (SiC) ou *carborundum*. Este fenômeno, observado pela primeira vez e relatado à época em uma nota de 24 linhas na revista *Electrical World* (Figura 1), é conhecido como eletroluminescência. Trata-se do princípio de funcionamento do LED, ou seja, a emissão de luz por um material em resposta a uma corrente elétrica que o atravessa (DUPUIS e KRAMES, 2008).

Figura 1 - Nota publicada por Round em 1907

Fonte: (ZHELUDEV, 2007)

No entanto, alguns atribuem a descoberta do LED a Oleg Vladimirovich Losev (Figura 2) quando, em 1920, ele observou o fenômeno da eletroluminescência a partir da passagem de corrente elétrica por diodos retificadores, utilizados em receptores de rádio. Este pesquisador russo, pouco citado pela comunidade científica e que não possuía educação formal, publicou 43 estudos em renomadas publicações científicas de origens russa, inglesa e

alemã, além de ser o autor único de 16 patentes. Entre 1924 e 1930, nos 16 estudos por ele publicados, Losev relatou questões como a natureza não térmica (“fria”) desta emissão de luz, bem como a corrente limite para tal. Reconhecendo a ação do diodo neste processo, ele analisou este componente em detalhes, inclusive realizando modulação até a frequência de 78,5 kHz, aplicando uma corrente alternada ao contato. Em 1929, ele publicou medições detalhadas sobre o espectro de LED, observando claramente a sua dependência com a corrente (ZHELUDEV, 2007).

Figura 2 - Oleg Vladimirovich Losev, 1903–1942

Fonte: (ZHELUDEV, 2007)

Na década de 1940, Russell Ohl, dos laboratórios da Bell Telephone, descobriu acidentalmente, em suas pesquisas sobre retificadores de cristal de silício, o que hoje se conhece como região de depleção. Daí veio também a primeira observação da junção p-n. A análise cuidadosa das propriedades elétricas desta estrutura, levaram ao registro de inúmeras patentes pela Bell (retificador, célula solar, dentre outras), com base nas pesquisas de Ohl (DUPUIS e KRAMES, 2008). No entanto, o conhecimento mais profundo sobre a operação da junção p-n de um semiconductor só ocorreu em 1947, quando da invenção do transistor por Bardeen e Brattain, também do Bell Labs. Esta invenção, somada ao importante papel desempenhado pelos semicondutores na II Guerra Mundial, como os retificadores de ponto de contato, levaram ao desenvolvimento de inúmeras pesquisas a eles relacionadas em várias partes

do mundo. Além do Bell Labs, despontaram nomes como Massachusetts Institute of Technology (MIT), Siemens (Alemanha), Abraham F. Ioffe Institute (União Soviética) e Tokyo Tsushin Kogyo (hoje Sony Corporation – Japão).

A literatura mostra algumas controvérsias também em relação ao inventor do primeiro LED de luz visível, ou diodo *laser* semiconductor. Em geral, relata-se que, em 1962, quase simultaneamente quatro pesquisadores apresentaram suas versões de diodo laser semiconductor: Dr. Gunther Fenner (General Electric Schenectady), Dr. Nick Holonyak Jr. (General Electric Syracuse), Dr. Marshall I. Nathan (IBM Research Laboratory), e Dr. Robert Rediker (MIT Lincoln Laboratory) (ZHELUDEV, 2007). No entanto, um destes pesquisadores obteve destaque com a criação de um material semiconductor composto pela liga GaAsP (*Gallium Arsenide Phosphide*), o Dr. Holonyak. Atribui-se a ele a invenção do LED de luz visível, sendo este de cor vermelha. Este material se tornou o primeiro a ganhar importância comercial.

Em 1972, o engenheiro elétrico George Craford, que à época trabalhava na Monsanto Company, inventou o LED de cor amarela. Aliás, relata-se que esta foi a primeira empresa a produzir LEDs de luz visível em massa, já em 1968 (DUPUIS e KRAMES, 2008).

Os investimentos em pesquisas buscando incrementar o desempenho dos LEDs continuaram. O próprio Craford desenvolveu um LED de cor vermelha com luz 10 vezes mais brilhante que o desenvolvido por Holonyak e, em 1976, Thomas P. Pearsall inventou um LED de alta eficiência e extremamente brilhante, a ser empregado em telecomunicações por meio de fibra ótica (HISTORY OF LIGHTING, 2015).

Os ganhadores do Prêmio Nobel de Física de 2014, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura, desenvolveram o LED azul no início da década de 1990, proporcionando uma revolução na tecnologia de iluminação: a luz de LED branca (OSRAM, 2015a). Totalmente alinhada ao espírito do prêmio, que enaltece as invenções que proporcionam grandes benefícios à humanidade, esta permitiu que lâmpadas com maior vida útil e mais eficientes pudessem ser produzidas, em contraponto às alternativas tradicionais. Pode-se ilustrar este fato com os crescentes fluxos luminosos produzidos por lâmpadas de LED brancas: 300 lm/W, equivalentes a 16 lâmpadas comuns ou cerca de 70 lâmpadas fluorescentes. Além disso, pode-se imaginar o quanto esta

tecnologia contribui para a preservação dos recursos naturais do planeta, visto que as lâmpadas LED duram ao redor de 100.000 horas, frente às 1.000 horas das lâmpadas incandescentes e às 10.000 das fluorescentes. O seu baixo consumo energético deve contribuir para a redução do consumo mundial com iluminação, hoje da ordem de um quarto de toda a eletricidade produzida, além de beneficiar algo como 1,5 bilhão de pessoas, atualmente sem acesso às redes de eletricidade, que possam valer-se da energia solar para alimentar lâmpadas de LED (NOBEL FOUNDATION, 2014).

Os LEDs oferecem outras vantagens em relação às demais tecnologias de iluminação disponíveis, configurando-se, sob vários aspectos, como alternativa mais sustentável: possuem dimensões diminutas, demandam baixa manutenção, possuem capacidade de dimerização, apresentam alta resistência aos ciclos de comutação, produzem luz imediata ao serem ligados, são resistentes a impactos e vibração, não emitem radiação ultravioleta ou infravermelha (LEDs de luz visível) e não contém mercúrio em sua composição (OSRAM, 2015b).

Isso justifica o crescimento na adoção dessa tecnologia (AZEVEDO et al., 2009) (MCKIMSEY & COMPANY, 2012) (EDISON INVESTMENT RESEARCH, 2013). Só na cidade de São Paulo, cerca de 600.000 luminárias públicas deverão receber luminárias a LED em até cinco anos, segundo concorrência internacional promovida pela Prefeitura de São Paulo em 2015. Trata-se de contratação de Parceria Público-Privada (PPP), sob a modalidade de Concessão Administrativa, com prazo de vigência do contrato previsto em 24 anos, e valor estimado em R\$ 7,320 bilhões (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2015).

1.3 COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL

Dentre as alternativas de sistemas de comunicação OWC, destaca-se nesta pesquisa aquela realizada por meio da luz visível (*Visible Light Communication* – VLC).

O primeiro experimento com VLC foi realizado por Graham Bell em 1880, que desenvolveu um sistema chamado Fotofone (*Photophone*). O

fotofone de Graham Bell baseava-se na transmissão de som por meio de um raio de luz. Conforme se pode observar na Figura 3, no lado transmissor, a voz de uma pessoa era projetada na direção de um espelho por meio de um aparato. A vibração da voz causava vibrações similares no espelho. A luz do sol era então direcionada ao espelho, onde as vibrações eram capturadas e projetadas de volta para o elemento receptor do fotofone (Figura 4), um espelho parabólico. Em seu ponto focal, havia uma célula de selênio, cuja resistência (entre 100 e 300 ohms) variava inversamente à intensidade da luz nela projetada. A célula de selênio modulava a corrente transmitida pelo circuito, que era então convertida em pressões do ar variáveis, ou seja, som, transmitido ao fone de ouvido. As distâncias de comunicação atingiam mais de 200 m (BHALERAO et al., 2013).

Pode-se deduzir a importância deste invento, atribuída não apenas pelo próprio Bell, mas pelo fato dele ter sido o precursor dos sistemas de comunicação por fibra ótica, tão disseminados pelo mundo a partir de 1980.

Figura 3 - Ilustração da parte transmissora de um fotofone, com a luz do sol sendo refletida e, a seguir, modulada por meio da vibração do espelho

Fonte: (PRINCETON UNIVERSITY, 2015)

Tem-se utilizado a luz visível como meio de comunicação ao longo da história da humanidade como sinais de luz codificados, emitidos a partir de holofotes em tempos de guerra e faróis marítimos destinados à sinalização

para embarcações. O advento do LED trouxe a inúmeros pesquisadores a oportunidade de investigar sua capacidade de transmitir dados, a partir da modulação da luz (KITANO et al., 2003) (HAAS, 2013). Quando uma corrente elétrica constante é aplicada a um LED, este emite um fluxo contínuo de fótons, gerando a luz visível. Portanto, para que esta seja modulada, é necessário modular-se a corrente aplicada. Conforme já exposto, pode-se utilizar este recurso para a transmissão de dados sem que ocorra a cintilação perceptível pelo olho humano. A comunicação por IV é limitada justamente pela baixa potência, que é necessária devido às questões de segurança ao olho humano (BHALERAO et al., 2013).

Figura 4 - Ilustração da parte receptora de um fotofone, com a luz do sol sendo demodulada pelo espelho parabólico, provido de uma célula de selênio

Fonte: (PRINCETON UNIVERSITY, 2015)

Com relação à tecnologia de comunicação por rádio frequência, a VLC apresenta diversas vantagens, com destaque ao amplo espectro de frequências disponível e não regulamentado (faixa de 400 a 790 THz) (Figura 5), podendo operar simultaneamente ao rádio sem interferências.

Figura 5 - Espectro eletromagnético

Fonte: Adaptado de (HAAS, 2013)

Na verdade, a VLC se apresenta como um meio de comunicação complementar à radiofrequência e não substituto, podendo-se explorar o melhor de cada tecnologia em cada aplicação e contexto.

Outra vantagem é relativa à relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR), razão entre a potência do sinal principal e a potência do ruído provocado pelas demais fontes, que é naturalmente alta para a VLC, dado que as fontes de luz têm como propósitos principais iluminar ou sinalizar. Aliás, a VLC permite que se mantenham concomitantemente as funções de iluminação ou sinalização e transmissão de dados.

A adoção da tecnologia VLC mostra-se particularmente atrativa em locais onde interferências a equipamentos não sejam permitidas (hospitais, aviões, indústrias petroquímicas), e onde a comunicação por radiofrequência seja comprometida (operações subaquáticas). Nessa tecnologia de comunicação, não ocorre radiação eletromagnética por radiofrequência, sabidamente nociva ao ser humano (BURCHARDT et al., 2014).

No entanto, a tecnologia VLC também apresenta desvantagens frente à comunicação por rádio, como distância reduzida de comunicação (de 1 a 100 m) e, de um modo geral, taxa de transferência de dados de alguns kb/s até 10 Mb/s. Neste quesito, vale ressaltar que alguns estudos já obtiveram resultados superiores, da ordem de gigabits por segundo (VUCIC e LANGER, 2012) (GROBE et al., 2013) (HAAS, 2013). Wang et al (2016) afirmam ter atingido velocidades de 400 Mb/s a 1 Gb/s e taxa de erros de transmissão (*Bit Error Rate* – BER) inferior a 7%, com uma distância entre transmissor e receptor de

100 m utilizando, para tal, a tecnologia da diversidade de receptores. A intensidade do sinal recebido cai drasticamente com o aumento da distância entre transmissor e receptor, sendo também fortemente afetada em configurações que não apresentam visadas diretas (*Line-of-Sight* – LoS) entre estes dispositivos. Afinal, a LoS é uma das condições prioritárias para o canal VLC, embora a comunicação também possa se estabelecer em condições distintas, especialmente em ambientes internos.

Nas aplicações ao ar livre (Figura 6), grandes desafios também residem nas interferências geradas por outras fontes de luz, além de condições climáticas, neblina e fumaça, conforme exposto anteriormente (KUMAR et al., 2011) (LOURENÇO et al., 2012) (CAILEAN et al., 2014).

Figura 6 - Modelo simplificado de canal VLC e possíveis interferências

Fonte: Adaptado de (CAILEAN et al., 2014)

Essas interferências deterioram o sinal gerado pelo transmissor e/ou podem disparar falsas respostas no receptor, comprometendo o desempenho do sistema. Consequentemente, a intensidade da luz no transmissor torna-se um importante parâmetro a ser observado, bem como, a utilização de filtros para minimizar os efeitos no receptor. A potência do sinal recebido também está atrelada ao campo de visão do receptor (*Field of View* – FOV), uma vez que, campos de visão mais amplos proporcionam uma melhor recepção do sinal principal, mas também, dos ruídos. Estes são os desafios a serem superados quando se considera a aplicação da VLC em ITS, seja para comunicação entre veículos ou entre estes e a infraestrutura.

Embora apresente similaridades em relação à tecnologia IV, o fato da

VLC operar com luz visível, permite ao usuário que identifique facilmente o ponto de transmissão de dados, característica bastante favorável para aplicações onde o posicionamento preciso seja relevante (visada direta) (KITANO et al., 2003; BELLE et al., 2013). Podem-se utilizar os pontos de iluminação como sistemas de localização: atribui-se a cada ponto um identificador (ID) unívoco relacionado à sua posição precisa. Este sistema de localização pode ser particularmente interessante em locais onde o GPS não funciona como em locais cobertos (terminais de ônibus, túneis), ambientes internos (aplicação chamada *Indoor Navigation System*), subsolo (garagens, estações e túneis de metrô, *shopping centers*, etc) (WON. et al., 2008; HARUYAMA, 2013). A adoção da tecnologia VLC em aplicações de posicionamento será detalhada em item posterior.

1.4 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

Segundo Williams (2008), utiliza-se o termo Sistemas Inteligentes de Transporte para descrever sistemas complexos em que veículos, motoristas, passageiros, operadores, gestores, infraestrutura e ambiente interagem, provendo aos usuários melhores experiências de guiagem e deslocamento, por meio de sistemas viários mais seguros e com melhor capacidade de escoamento. Isso é possível a partir da integração de informação, tecnologias da informação e sistemas de comunicação diversos, aplicados ao campo dos transportes.

Propôs-se este conceito originalmente nos Estados Unidos há mais de 50 anos. Japão, União Europeia, Coreia do Sul e Singapura figuram como as regiões do mundo que mais têm pesquisado e investido em ITS (SHENG-HAI et al., 2011).

No modal rodoviário, com o crescimento da frota de veículos especialmente em grandes centros, os congestionamentos, os consequentes crescimentos da poluição e do consumo de combustível impactam diretamente na saúde da população e, portanto, em sua produtividade. Outro efeito indesejado é o crescimento de acidentes, que acabam por retroalimentar os efeitos anteriores (ZHANG et al., 2011). Visto que as vias não podem ser

facilmente modificadas ou melhoradas, os recursos de ITS despontam como eficientes para melhorar o desempenho dos sistemas de transporte, tanto em segurança quanto em mobilidade e impacto ambiental, otimizando os recursos financeiros investidos, a partir de um planejamento adequado de engenharia (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2012). Pode-se inferir a sua importância, analisando-se o contexto brasileiro: dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores apontam que, até 2034, a frota brasileira atingirá 95,2 milhões de veículos, o que corresponde a uma taxa de 2,4 habitantes por veículo, contra os 5,1 registrados em 2013 (ALBUQUERQUE, 2014). Somem-se a isso as frotas circulantes dos outros modais (dados até meados de 2015) que, via de regra, precisam compartilhar espaços viários exíguos, e ainda assim proporcionar aos seus usuários deslocamentos eficazes e seguros: bicicletas, 70 milhões de unidades (SALOMÃO, 2015); motocicletas, 23,8 milhões; micro ônibus, 371,6 mil; ônibus, 586,4 mil; caminhões, 2,6 milhões (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2015).

Um dos princípios de ITS é a integração de tecnologias de comunicação avançadas (sem fio ou cabeadas), tanto à infraestrutura viária como aos veículos (WILLIAMS, 2008; UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2014). Os sistemas de comunicação empregados não precisam, necessariamente, operar em tempo real, mas sim atender às necessidades de sincronicidade e temporalidade correspondentes a cada momento de interação com um tipo específico de usuário, seja este um viajante, um passageiro ou um condutor (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2012).

Estudo da empresa norte americana de pesquisa de mercado Transparency Market Research estima que até 2020, o mercado mundial de ITS deve movimentar perto de US\$ 34 bilhões, tendo uma taxa de crescimento anual de 11,30% (TRANSPARENCY MARKET RESEARCH, 2013). Ele aponta as cinco categorias de sistemas ITS mais demandadas e implementadas ao redor do mundo: Sistema Avançado de Gerenciamento de Tráfego (*Advanced Traffic Management System* - ATMS), Sistema Avançado de Informação ao Viajante (*Advanced Traveller Information System* - ATIS), Sistema de Precificação de Transporte Habilitado para ITS (*Enabled Transportation Pricing*

System - ETPS), Sistema Avançado de Transporte Público (*Advanced Public Transportation System* - APTS) e Operação de Veículos Comerciais (*Commercial Vehicle Operation* - CVO).

Em linhas gerais, os sistemas ATMS visam à redução de congestionamentos, aumento da segurança e melhora do fluxo de veículos, por meio da integração de tecnologias ao ambiente viário (sensores, atuadores, processamento de dados e comunicação).

Os sistemas ATIS proporcionam um aumento da qualidade do serviço oferecido aos usuários, estejam estes em um ambiente interurbano ou em uma rodovia. Por meio de Painéis de Mensagens Variáveis, podem-se disponibilizar informações de tráfego aos condutores, aos viajantes e aos passageiros do transporte público, provendo informações úteis relativas tanto a necessidades específicas (como tempo de espera) como a necessidades personalizadas (como itinerários).

Os sistemas ETPS, por sua vez, tratam das tecnologias de tarifação automática, como os diversos tipos de pedágio existentes ao redor do mundo, ou ainda associados aos sistemas de bilhetagem do transporte público, possibilitando que se faça uma tarifação por trecho percorrido.

Os sistemas APTS empregam tecnologias no planejamento, programação e gestão do transporte público, com o intuito de incrementar sua eficiência operacional e segurança, tanto no gerenciamento da frota, quanto no gerenciamento dos serviços prestados. Podem ser citados, como exemplos, disponibilização de informações em tempo real aos passageiros, sistemas de localização automática de veículos, notificações de chegada de ônibus e priorização semafórica.

Finalmente, os sistemas da categoria CVO destinam-se a incrementar a comunicação entre agências reguladoras e gerenciadores de frotas de transporte de cargas, fornecendo subsídios à sua operação (PATEL e ROWE, 2015; UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2014).

Pode-se, portanto, inferir a considerável quantidade de dados que será gerada a partir de veículos e infraestrutura viária, dados estes necessários para suprir os sistemas mencionados, que passarão a transmitir informações aos diversos atores interessados, visando atender às suas necessidades específicas (ZHANG et al., 2011).

1.5 COMUNICAÇÃO EM ITS

A norma ISO 14813 - Sistemas Inteligentes de Transporte, em sua Parte 1 apresenta 11 domínios de serviço de ITS (ABNT, 2011). A presente pesquisa se relaciona com os domínios “Transporte Público” e “Informações ao Viajante”, onde:

- **Transporte público:** Operação de serviços de transporte público e o fornecimento de informações operacionais ao operador e ao usuário, incluindo aspectos multimodais.
- **Informações ao viajante:** Fornecimento de informações estáticas e dinâmicas sobre a rede de transporte para usuários, incluindo opções modais e baldeações.

As aplicações associadas a estes domínios visam melhorar a segurança e o conforto do viajante (passageiro e condutor), bem como, incrementar a eficiência do transporte e a mobilidade (DAR et al., 2010).

A comunicação em ITS baseia-se no compartilhamento de informações entre veículos e entre estes e a infraestrutura viária. Os meios de comunicação utilizados em ITS precisam ser robustos em relação a interferências e colisões de pacotes de dados, além de lidar com questões de segurança, como integridade, confidencialidade e privacidade (HAMIDA et al., 2015). Cada meio de comunicação sem fio pode ser adequado a algumas das possíveis aplicações de ITS: em alguns casos, a latência mínima será prioritária; em outros, atenção especial deverá ser dada à distância entre transmissor e receptor; por vezes, confiabilidade e taxa de transferência de dados serão igualmente relevantes.

O Quadro 1 relaciona os meios de comunicação sem fio mais usuais e seu potencial de aplicação em ITS (DAR et al., 2010).

Quadro 1 - Potencial tecnologia de comunicação sem fio e aplicação ITS

Funcionalidades	Categoria de aplicação ITS	Tecnologia(s) recomendada(s)
Segurança	Prevenção de colisão Notificações de sinalização de via Gerenciamento de incidentes	DSRC, WAVE DSRC, WAVE, CALM WiFi, DSRC, WAVE, rede celular
Eficiência	Gerenciamento de tráfego Monitoramento da via	DSRC, WAVE, rede celular, DAB IV, ZigBee, DSRC, WAVE
Conforto	Entretenimento informação de contexto	MMWAVE, WLAN, WiMAX, DVB, DVB-H DSRC, WAVE, rede celular, DAB

Fonte: Adaptado de (DAR et al., 2010)

onde:

- DSRC (*Dedicated Short-range Communication*), WAVE (*Wireless Access in the Vehicular Environments*) e CALM (*Communication Air-interface for Long and Medium-range*) são tecnologias de comunicação veicular;
- Rede celular, WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), DVB (*Digital Video Broadcasting*), DVB-H (*DVB-Handheld*, destinada a dispositivos móveis) e DAB (*Digital Audio Broadcasting*) são tecnologias tradicionais de comunicação de longo alcance, baseadas em infraestrutura (diversas estações base dedicam-se à retransmissão dos sinais);
- WLAN (*Wireless Local Area Network*), IV (Infravermelho), MMWAVE (*Millimeter-wave*), WiFi e ZigBee (suporta o protocolo IEEE 802.15.4) são tecnologias tradicionais de comunicação, com alcance de até 1 km, que não dependem de infraestrutura e, portanto, de mais fácil implantação (nesta categoria também se inclui a tecnologia Bluetooth).

Não se detalharão as características técnicas de cada tecnologia de comunicação sem fio, visto não ser este o foco deste trabalho. No entanto, destaca-se a tecnologia que utiliza infravermelho dada a sua similaridade com a VLC (espectro de frequências próximo ao da luz visível). Esta tecnologia pode ser aplicada com sucesso em casos nos quais a comunicação direta (ponto a ponto) seja necessária, visto que a direção bem definida é um dos

seus pontos fortes. Além disso, destacam-se a alta taxa de transferência de dados (1 Mb/s até 100 m), a confiabilidade e a possibilidade de transmissão bidirecional de dados. A IV não demanda licenças ou acordos com provedores e não há restrições à alocação de banda (INFRARED DATA ASSOCIATION, 2011). Sua utilização ocorre com sucesso em diversos projetos de ITS (pedágios e comunicação interveicular), em países como Malásia, Japão e Alemanha (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2012).

1.5.1 VLC em ITS

As pesquisas em VLC, somadas à crescente infraestrutura utilizando LEDs, abriram inúmeras oportunidades em ITS, algumas exploradas no meio acadêmico há quase duas décadas (PANG, 1998a; PANG, 1998b; KWAN, 1999). Mais recentemente, autores como Falcitelli e Pagano (2016) apontam a VLC como um sistema de comunicação sem fio bastante promissor no cenário dos Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativos (*Cooperative ITS - C-ITS*), em complemento aos usuais. Os C-ITS (Figura 7) compõem uma nova geração de sistemas, cuja operação cooperativa visa proporcionar segurança, eficiência e reduzidos impactos ambientais.

Figura 7 - Cenário ilustrativo C-ITS

Fonte: (UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2014)

Apresentam-se a seguir, alguns estudos que vêm propiciando o desenvolvimento de aplicações de VLC em ITS.

Para superar as interferências presentes em espaços abertos (Figura 4), Kumar et al (2012) descrevem um protótipo utilizando a técnica de modulação *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), que demonstrou ser viável estabelecer-se um *link* de comunicação, com baixa taxa de transferência de dados e distâncias variando até 40 m, o que seria adequado para a comunicação entre semáforos ou luminárias públicas e veículos. Cailean et al (2014), simularam o envio de mensagens codificadas por duas técnicas recomendadas para aplicações externas: Manchester e Miller (também conhecida como *Delay Mode*). Embora ambas tenham mostrado desempenho similar em relação à taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* – BER), a primeira, especificada pela norma IEEE 802.15.7 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2011) (com modulação *On-Off Keying* - OOK), mostrou-se adequada para comunicações de canal único, com valores de SNR superiores, enquanto que a segunda mostrou-se mais adequada para aplicações com múltiplos transmissores e receptores *Multi Input Multi Output* (MIMO), onde observam-se valores de SNR inferiores.

Visando a lidar com as diferentes condições ambientais ao ar livre, Anand e Kumar (2014) propuseram um sistema de dimerização de LEDs adaptativo ao contexto, em um sistema VLC aplicado a ITS. A técnica proposta combina duas outras, a *Pulse Dual Slope* (PDS) e a *Amplitude Modulation* (AM), resultando na *Pulse Dual Slope and Amplitude Modulation* (PDSAM). Eles obtiveram resultados máximos de BER para intensidade luminosa mínima e variações de luminosidade muito próximas de 0 a 100%.

Em linha de análise similar, Cailean e Dimian (2016) realizaram uma revisão dos estudos que abordam o impacto das condições ambientais na comunicação VLC. Eles constataram que, devido à variedade de contextos possíveis no tráfego, tanto por fatores ambientais como pela mobilidade dos veículos, um receptor adequado para uma situação pode não atender a outra, mesmo que similar. Com isso, propuseram um receptor adaptativo ao contexto, capaz de lidar com os ruídos de fundo a cada momento, tanto de dia como à noite, maximizando a eficiência da comunicação.

Além do ruído gerado por outras fontes luminosas, em Liu et al. (2011)

simularam-se diversos cenários urbanos, estudando-se problemas potenciais na comunicação entre veículos, como tráfego intenso (horários de pico) e bloqueio da luz visível. No primeiro caso, a disponibilidade de múltiplas rotas de comunicação possibilitou o contato entre veículos, superando as colisões de pacotes de dados. No segundo, mesmo com obstáculos, o sistema VLC foi capaz de realizar transmissões devido à movimentação dos veículos, propiciando áreas de visada entre eles.

Essa mobilidade característica do tráfego também gera problemas na comunicação I2V, derivados de fatores como diferentes distâncias entre transmissor e receptor. Esta questão foi avaliada em Okada et al. (2009) e Cailean et al. (2013) buscando-se a melhor alternativa de receptor, tanto em relação ao custo quanto ao desempenho, visto que, aumentando-se a distância de transmissão, diminui-se a velocidade da comunicação. A escalabilidade é essencial às soluções propostas em ITS, bem como a baixa latência, especialmente em casos de informações relativas à segurança no tráfego. Observou-se que uma combinação de fotodiodo com elemento ótico capaz de filtrar os ruídos de fundo, pode ser uma boa alternativa na atualidade, uma vez que, câmeras que operam em alta velocidade (Figura 8) e que apresentam melhor resposta, ainda são viáveis apenas em nível experimental, devido ao seu alto custo, às dimensões inadequadas para aplicações em ITS e também aos procedimentos complexos de processamento de imagens (NAGURA et al., 2010).

Figura 8 - Matriz de LED e câmera de alta velocidade

Fonte: (NAGURA et al., 2010)

Outros fatores decorrentes da mobilidade e presentes em condições reais, como variação da velocidade e vibração do receptor (veículo), além de

vários potenciais transmissores em uma mesma visada (Figura 9) a partir de muitas fontes de luz também motivaram pesquisas (NAGURA et al., 2010; ARAI et al., 2014). Estas apresentaram esquemas de codificação hierárquica eficazes, proporcionando boa recepção das informações de alta prioridade (mesmo para distâncias de comunicação maiores), em aplicações de suporte à segurança na condução de veículos.

As pesquisas citadas permitem inferir que, à semelhança da evolução das câmeras nos *smartphones*, devem surgir dispositivos óticos adequados às aplicações em ITS baseadas em VLC (V2X e I2V), visto apresentarem vantagens relevantes em relação aos fotodiodos. Atualmente se observa a inclusão de câmeras internas e externas em alguns veículos, com os propósitos de monitorar a atenção do condutor, proximidade de obstáculos, reconhecimento de semáforos e outros objetos, adaptação inteligente da velocidade e controle de distância automática (*adaptive cruise control*), dentre outros (GHASSEMLOOY et al., 2016). As câmeras de alta velocidade são capazes de processar imagens de diversas fontes simultâneas, característica bastante útil quando se utilizam matrizes de LED como transmissores que, potencialmente, podem ter um único LED ou grupos de LEDs transmitindo mensagens distintas simultaneamente. O processamento de imagens abre outras oportunidades como estimativa de posição e distância, detecção de objetos e alvos em movimento (PREMACHANDRA et al., 2014; YAMAZATO e HARUYAMA, 2014; OHMURA et al., 2013).

Figura 9 - Fontes luminosas diversas: potenciais transmissores de informação

Fonte: (ARAI et al., 2014)

1.6 GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

O sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* - GPS) foi concebido em 1973, por um grupo de militares nos Estados Unidos da América, com o objetivo de atender a todas as demandas do seu Departamento de Defesa. Conhecido inicialmente por *Defense Navigation Satellite System* (DNSS), ainda naquele ano foi denominado *Navigation System Using Timing and Ranging* (Navstar). A partir de 1978 inúmeros satélites foram lançados ao espaço, passando a constituir uma constelação, o que levou à denominação *Navstar-GPS* (PARKINSON e GILBERT, 1983; NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, 2015).

A base de funcionamento do GPS é a triangulação baseada em satélites. Um receptor GPS na Terra determina a sua posição, a partir da sua distância em relação a um conjunto de satélites visíveis. Em linhas gerais, essa distância é determinada com base no tempo de transmissão da mensagem, via rádio, transmitida por cada satélite, multiplicada pela velocidade da luz.

Os 24 satélites GPS (31, considerando-se os satélites reserva) se distribuem em seis planos orbitais distintos, circundando a Terra a uma altura média de 20.000 km e inclinação de 55° em relação ao Equador (Figura 14). Por meio de ondas eletromagnéticas, cada satélite emite continuamente a sua localização e uma referência de tempo, o que é captado por um receptor que as processa e converte em coordenadas geográficas (latitude e longitude) (NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, 2015). Em seu trajeto até a Terra, as ondas de rádio sofrem interferências de várias naturezas (partículas em suspensão, vapor de água) ou seja, ocorre um atraso em sua recepção. Para que os satélites emitam sinais de forma sincronizada, eles contam com a alta precisão dos relógios atômicos neles embarcados. No entanto, em receptores comuns, onde os relógios não contam com a mesma precisão, imprime-se um erro ao intervalo de tempo lido, conhecido como pseudo-intervalo (*Pseudo-range*). Para compensar este erro, que traria grande imprecisão à posição calculada, utilizam-se os sinais de, no mínimo, quatro satélites (NASA EDUCATIONAL RESOURCES, 2005).

Figura 10 - Constelação de satélites GPS

Fonte: (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015)

Controlado e mantido pelo governo dos Estados Unidos, o GPS provê aos seus usuários serviços associados ao posicionamento (latitude, longitude, altitude), navegação (trajetória, velocidade) e tempo. O GPS é constituído por três segmentos: segmento espacial, segmento de controle e segmento do usuário. A Força Aérea dos Estados Unidos é responsável pelo desenvolvimento, controle e operação dos segmentos espacial e de controle. Ela coordena a constelação de satélites, de modo a mantê-los disponíveis aos usuários de qualquer parte do mundo 95% do tempo.

Embora haja um forte compromisso do governo americano para prover um sinal cada vez melhor aos usuários, inúmeros fatores, além dos efeitos atmosféricos, podem afetar a acurácia e a precisão do sinal recebido como satélites em órbitas imperfeitas (*ephemeris errors*), bloqueios, reflexos (devido ao fenômeno de multicaminhamento dos sinais ou *multipath*) ou mesmo a qualidade do receptor (RODRIGUES et al., 2009). Os receptores de melhor qualidade utilizados pela *Federal Aviation Administration* (FAA) desfrutam de uma acurácia horizontal da ordem de 3,5 m. No entanto, a acurácia pode ser melhorada por meio da combinação do GPS com diversos sistemas incrementais (*augmentation systems*), que proporcionam maior integridade, disponibilidade ou melhores informações relativas ao posicionamento,

navegação ou tempo. Dentre estes sistemas, destacam-se aqueles aplicados em operações militares, espaciais (*Global Differential GPS* - GDGPS) e/ou de uso exclusivo nos Estados Unidos, especialmente pelos diversos modais de transporte (*Nationwide Differential GPS System* – NDGPS, *Wide Area Augmentation System* - WAAS). Pode-se citar ainda o *International GNSS Service* (IGS), resultado da cooperação entre 80 países, que provê dados e serviços de alta qualidade à comunidade científica, facilitando, em última instância, o desenvolvimento de aplicações que beneficiem a sociedade como um todo. Há também o *Continuously Operating Reference Stations* (CORS), que conta com bases de dados fornecidas por cerca de 200 organizações públicas, privadas e acadêmicas, além de oferecer gratuitamente um serviço *online* de posicionamento ao usuário (*Online Positioning User Service* - OPUS) que proporciona precisão em nível de centímetros após o processamento destes dados.

São inúmeras as vantagens do GPS nas aplicações de rastreamento de veículos, como a sua abrangência mundial, a alta precisão para este tipo de aplicação (em torno de 10 m), a não necessidade de implantação de infraestrutura para a sua operação e o baixo custo dos equipamentos receptores. No entanto, essa tecnologia também apresenta limitações, como não operar em locais fechados (garagens, terminais e túneis), a possibilidade de obstrução dos sinais de satélite por obras de arte, edifícios e cobertura vegetal, além do já citado multicaminhamento (ou reflexão do sinal), que pode comprometer a precisão das coordenadas.

Uma opção para contornar os problemas gerados em ambientes urbanos que está se expandindo é o GPS Assistido (*Assisted GPS* – A-GPS). Trata-se de um sistema GPS literalmente assistido pela rede de telefonia celular, que recebe os sinais de satélite, processa as suas informações e as retransmite ao receptor, poupando tempo de aquisição de dados e permitindo a operação mais precisa, mesmo em locais fechados ou com grandes interferências. No entanto, esta técnica requer, além da infraestrutura de telefonia celular, receptores específicos e, por vezes, trata-se de serviço tarifado pelas operadoras (RODRIGUES et al., 2009).

Neste trabalho destaca-se a técnica de correção Diferencial GPS (*Differential GPS* - DGPS), visando-se à correção dos inúmeros possíveis erros

imputados nas leituras GPS.

1.6.1 GPS Diferencial (*Differential GPS* - DGPS)

A técnica DGPS, que teve sua origem visando a reduzir os efeitos da Disponibilidade Seletiva (*Selective Availability* – SA), que degradava a acurácia do sinal para uso civil, proporciona uma melhora desta (da ordem de 0,5 a 3,0 m) e também da integridade do GPS. Ela se utiliza das pseudodistâncias geradas pelo não sincronismo entre os relógios (ou osciladores) contidos nos satélites (com padrões atômicos de alta precisão) e aqueles contidos nos receptores (de menor qualidade). A pseudodistância corresponde ao tempo de propagação do sinal (ou diferença entre os tempos registrados no receptor, quando da recepção do sinal do satélite, e neste, quando da transmissão do sinal), multiplicado pela velocidade da luz no vácuo.

No DGPS, utiliza-se um receptor em uma estação base de referência (fixa, com coordenadas posicionais conhecidas), que rastreia todos os satélites visíveis (Figura 15). Os sinais recebidos são processados, calculando-se as correções posicionais e as pseudodistâncias. Comparativamente às distâncias dos satélites à Terra, a distância entre estes dois receptores é ínfima (ainda que da ordem de centenas de km) portanto, é razoável considerar-se que os sinais que ambos recebem passaram pelas mesmas influências em suas trajetórias, ou seja, receberam os mesmos erros (exceto os resultantes de multicaminhamento e os inerentes aos próprios receptores). Assim, as correções calculadas são transmitidas à estação móvel (cuja posição se deseja determinar), que as utiliza para corrigir as próprias posições.

Usualmente utilizam-se as pseudodistâncias, pois com essa técnica não há a necessidade de estação fixa e móvel rastrear a mesma constelação de satélites, visto que se aplicam apenas as correções dos satélites efetivamente rastreados (MONICO, 2007; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

Figura 11 - Exemplo de receptor estacionário ou de referência

Fonte: (KÜNN, 2015)

Percebe-se que, para que toda essa operação seja válida, o tempo de cálculo, transmissão e recepção de dados deve ser mínimo, uma vez que, tanto as condições do emissor (satélite) quanto do receptor móvel se alteram constantemente.

Dentre as aplicações do DGPS estão transporte e gestão de frotas, segurança pública, agricultura, aviação, localização e socorro em catástrofes, reparo e manutenção de utilidades públicas, etc.

1.7 VLC E POSICIONAMENTO

A disseminação dos LEDs (elemento básico da VLC) para iluminação em diversos domínios vem criando oportunidades de investigação e proposição de sistemas de posicionamento baseados em luz visível, conhecidos como *Light Positioning Systems* – LPS ou *Visible Light Positioning* – VLP. Afinal, a VLC combina características de comunicação com posicionamento, dado que o receptor pode receber dados assim como identificar a posição do transmissor (LIU et al., 2012; KARUNATILAKA et al., 2015).

Apresentam-se a seguir, algumas soluções de mercado e pesquisas relativas à adoção da VLC em aplicações de posicionamento interno e externo.

1.7.1 VLC em Aplicações de Posicionamento Interno

Estudo da empresa de pesquisa de mercado Global Market Insights, publicado em maio de 2016 (GLOBAL MARKET INSIGHTS, 2016), relata que os serviços baseados em posicionamento (*location based services*) representavam mais de 40% do lucro apurado pelo mercado global de *Li-Fi* em 2015. A previsão de crescimento para esta aplicação é de 79,5% ao ano, de 2016 a 2023.

Em ambientes internos, o seu objetivo é a localização precisa e ubíqua de pessoas e objetos nestes locais, utilizando-se sistemas VLC que empregam, em linhas gerais, luminárias como transmissores e dispositivos móveis, providos de elementos óticos (fotodiodos ou sensores de imagem), como receptores. Encontra-se farta literatura sobre o tema, com pesquisas em desenvolvimento em vários países da Europa, no Japão, na Coreia e na Austrália, só para citar alguns exemplos (DO e YOO, 2016a). Abordam-se inclusive questões relevantes como a necessidade de normalização, visando à interoperabilidade de produtos ao redor do mundo (ARMSTRONG et al., 2013).

Apresentam-se a seguir, alguns registros de utilização de câmeras fotográficas de *smartphones* comerciais como receptores.

A Panasonic apresentou na feira CES 2015 em Las Vegas, aplicações que demonstram que a empresa superou a barreira da baixa taxa de transferência proporcionada pelas câmeras de *smartphones* (da ordem de 10 bps). A tecnologia desenvolvida pela empresa requer apenas que o usuário faça o *download* de um aplicativo específico em seu *smartphone*, que proporciona taxas de transferência de muitos kb/s, nas mesmas câmeras, tornando-as excelentes receptores de VLC. Como transmissor, utiliza-se um LED modulado, que tanto pode ser instalado como ponto de iluminação, como em painéis de sinalização do tipo *backlight* em ambientes de interesse. A informação é lida por meio da divisão das imagens em blocos, o que agiliza a sua decodificação (PANASONIC, 2015).

Figura 12 - Recepção de informações por câmera de *smartphone* em uma exposição

Fonte: (PANASONIC, 2015)

A Philips também desenvolveu uma solução de divulgação de ofertas e localização de produtos para os supermercados Carrefour na França (Figura 13), já em operação na loja de Lille (PHILIPS, 2015a). Trata-se de uma solução combinada de emissão de informações pelas luminárias a LED da loja (2,5 km de extensão) e recepção das mesmas por um aplicativo em um *smartphone*, a partir de sua câmera frontal (Figura 14). As luminárias enviam as ofertas e as respectivas localizações na loja, e o aplicativo as identifica no mapa.

Desenvolveu-se na GE uma solução incorporada às suas luminárias, que envolve Bluetooth e luz visível. Energiza-se o *chip* Bluetooth, provido à empresa pela Acuity Brands (2015) pela própria luminária, o que promete uma vida útil de 15 anos, contra os cerca de dois anos das baterias dos tradicionais *beacons*, já empregados no mercado. Outro forte argumento da Acuity Brands são as previsões de economia de energia proporcionadas pela migração da iluminação para LED em grandes lojas dos Estados Unidos: da ordem de 340.000 kWh, equivalentes a US\$ 34.000 de economia ao ano por loja. A GE afirma que já estão em teste aplicações no Walmart e Walgreens (KANH, 2014).

Além dos exemplos citados, apresentam-se a seguir outras empresas que vêm investindo nessa tecnologia e apresentando soluções com grande foco na velocidade de transmissão de dados.

Figura 13 - Sistema Philips de posicionamento interno baseado em LED

Fonte: Adaptado de (PHILIPS, 2015a)

A empresa pureLiFi, situada na Escócia, investe em soluções de comunicação por meio da luz de LED, primordialmente em ambientes internos (pureLiFi, 2014). Fundada em 2012, é fruto do projeto de pesquisa D-Light, desenvolvido na Universidade de Edimburgo, sob a tutela de um de seus fundadores e atual coordenador científico, o professor Harald Haas (THE UNIVERSITY OF EDINBURGH, 2011). Atribui-se ao professor Haas a criação do termo *Light Fidelity (Li-Fi)* fazendo uma alusão ao *Wi-Fi*, mas utilizando-se a luz como meio de transmissão de dados a altas velocidades. Apresenta-se na Figura 15 um dos produtos da empresa, o sistema Li-1st. Desenvolvido com o

objetivo de prover uma plataforma básica e comum aos interessados no desenvolvimento de aplicações e produtos baseados em sua tecnologia, pode operar com quaisquer luminárias a LED de mercado.

Figura 14 - Aplicativo do Sistema Philips de posicionamento

Fonte: (PHILIPS, 2015b)

Segundo a pureLiFi, este sistema oferece comunicação bidirecional, com capacidade de até 11,5 Mbps nos dois sentidos (*download* e *upload*), para distâncias entre transmissor e receptor de até 3 metros, provendo iluminação, simultaneamente.

Figura 15 - Sistema Li-1st desenvolvido pela empresa pureLiFi

Fonte: (pureLiFi, 2014)

A empresa francesa Oledcomm (OLED COMM, 2007) divulga em seu site uma aplicação similar, por eles denominada LiFi BEACON[®], a ser aplicada em centros comerciais. Divulga ainda as seguintes aplicações (muitas delas variações sobre o tema anterior): em galerias de arte, onde cada luminária

dedicada a uma obra emite, para o *smartphone* do visitante interessado (e corretamente posicionado), a ficha técnica daquela obra; o mesmo em hospitais, só que desta vez, luminárias emitem informações de pacientes (LiFi ONEWAY®); em escritórios, cada ponto de iluminação a LED torna-se, segundo a empresa, um ponto de conexão à internet com *upload* e *download* de dados, por meio da tecnologia proprietária LiFiNET®. Observa-se ainda, na Figura 16, o Kit LiFi XS desta empresa, composto pelos seguintes componentes: três luminárias a LED LiFi Beacon (dotadas de modulador de luz), um *tablet* proprietário dotado do sistema operacional Android e de um dispositivo ótico (receptor de dados), um dispositivo ótico extra (receptor com *plug headset*) e um *kit* de desenvolvimento de software. Este produto também se destina a desenvolvedores de aplicações baseadas na tecnologia *Li-Fi* e enfoca o posicionamento preciso em ambientes internos.

Figura 16 - Kit LiFi XS desenvolvido pela empresa Oledcomm

Fonte: (OLED COMM, 2007)

Dentro da busca por altas velocidades de transmissão de dados, em novembro de 2015, a empresa estoniana Velmenni (VELMENNI, 2016) realizou testes da tecnologia *Li-Fi* em escritórios e ambientes industriais, afirmando ter atingido velocidades de 224 Gb/s, ou seja, cerca de 100 vezes mais rápida que a média observada para *Wi-Fi* (CREW, 2015).

Em agosto de 2016, pesquisadores da King Abdullah University of Science and Technology, situada na Arábia Saudita, anunciaram uma nova

lâmpada de LED habilitada para a tecnologia *Li-Fi*, a partir da utilização de novos materiais em sua composição. Os LEDs que contém fósforo em sua composição, possuem uma largura de banda de modulação limitada, impedindo que se explore todo o potencial da VLC. Partindo deste princípio, eles desenvolveram um conversor para VLC à base de nanocristais de Perovskite, cuja formula é CsPbBr_3 , combinado com fósforo vermelho convencional. A luz branca produzida exibiu uma largura de banda de modulação sem precedentes, de 491 MHz, ou seja, cerca de 40 vezes maior que o fósforo convencional, e uma capacidade de transmitir dados a mais de 2 bilhões de bits/s (DURSUN et al., 2016).

1.7.2 VLC em Aplicações de Posicionamento Externo

Em ambientes externos, o foco deste trabalho, a utilização destes sistemas para a localização de veículos vem sendo considerada desde a década de 1990, avaliando-se a possibilidade de comunicação entre veículos e semáforos a LED (PANG, 1998b). Mas, embora a adoção de LEDs em ambientes externos também seja crescente, há que se ressaltar algumas características peculiares dos sistemas VLC que podem ser favoráveis ou não neste contexto. Eles são muito suscetíveis a ruídos de fundo (outras fontes luminosas naturais e artificiais), especialmente quando se utilizam fotodiodos como receptores. Estes dispositivos saturam facilmente sob a luz do Sol, cuja intensidade luminosa supera em centenas de milhares de lux qualquer LED comercial dificultando, portanto, a recepção de informações por ele transmitidas à luz do dia (TRONG-HOP e MYUNGSIK, 2015; UYSAL et al., 2015). Há, no entanto, pesquisas que visam superar este desafio, por meio da aplicação de filtros óticos junto ao fotodiodo (YEON e SE-BIN, 2013; KUMAR et al., 2012). O ângulo de visada entre transmissor e receptor também afeta o desempenho da VLC (ARNON, 2015; ERGUL et al., 2015).

A utilização de sensores de imagem como receptores permite um melhor desempenho frente aos ruídos de fundo, mesmo à luz do dia, uma vez que estes dispositivos podem distinguir diferentes fontes de luz (e, portanto, de informação), descartando as indesejadas. Além da intensidade luminosa, estes

dispositivos permitem uma acurada estimativa do ângulo de chegada da luz (*Angle of Arrival* – AoA), informação útil para a determinação precisa do posicionamento (YAMAZATO e HARUYAMA, 2014). Nestes dispositivos há o problema da distorção causada pela lente: lentes com ângulos de visada menores provocam distorções menores, mas demandam um alinhamento maior com o transmissor o que, em aplicações ITS, é mais difícil de obter devido à característica dinâmica do tráfego.

Outros aspectos que requerem atenção, especialmente quando se determina a posição com base no tempo, são a resolução do *clock*, a sincronização entre transmissor e receptor, e o tempo de resposta do receptor (seja ele um fotodiodo ou um sensor de imagem) (TRONG-HOP e MYUNGSIK, 2015).

Os sistemas de posicionamento preciso de veículos são reconhecidamente importantes para aplicações em ITS em suas inúmeras finalidades, como proporcionar segurança na condução de veículos, subsídios ao dimensionamento e gestão de frotas e maior fluidez ao tráfego. Conforme já exposto, o sistema por GPS pode apresentar deficiências em virtude do multicaminhamento e/ou do bloqueio de sinais. Diante disso, sistemas complementares fazem-se necessários e, neste contexto, inúmeros trabalhos vêm propondo sistemas alternativos de navegação e posicionamento baseados em luz visível, conforme exposto a seguir.

No domínio de ITS, vários autores vêm propondo sistemas VLC em aplicações que empregam matrizes de LED como transmissores (primordialmente semáforos) e câmeras de alta velocidade como receptores (PANG e LIU, 2001; LIU e PANG, 2003; BELLE et al., 2013; ARNON, 2015). Estas câmeras utilizam sensores de imagem CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), que vêm ganhando popularidade devido a fatores como alta qualidade da imagem, *frame rate* elevado, baixo consumo de energia e queda nos custos de fabricação (DO e YOO, 2016b). Eles possuem uma matriz de fotodiodos, em que cada um corresponde a um *pixel*. Quando a luz de uma fonte luminosa atravessa a lente da câmera, ela atinge os fotodiodos que a convertem em valores de tensão. Estes valores são convertidos por um conversor analógico-digital em valores de intensidade luminosa que, arranjados em uma matriz, retratam digitalmente a imagem recebida (YAMAZATO et al.,

2014). Esse é o mecanismo que permite o descarte de *pixels* associados a ruídos de fundo.

O emprego de câmeras permite que se identifique a posição dos LEDs em uma matriz com relativa facilidade, devido ao seu amplo ângulo de visada. Se os LEDs forem modulados individualmente ou em blocos, podem-se transmitir simultaneamente mensagens distintas.

No entanto, também há desvantagens no emprego de câmeras como a perda de foco e detalhamento da imagem com o aumento da distância desta ao transmissor e a consequente perda de informações (Figura 17).

Figura 17 - Imagem recebida por sensor CMOS a 10 m do transmissor (esquerda) e a 70 m (direita)

Fonte: (NAGURA et al., 2010)

Estas câmeras requerem recursos consideráveis para o processamento de imagens, o que se reflete em seu alto custo, inviabilizando-as para aplicação em larga escala na atualidade. Além disso, elas ainda apresentam dimensões inadequadas para aplicações em ITS (Figura 18).

Figura 18 - Câmera de alta velocidade empregada em um LPS por imagem

Fonte: (YAMAZATO et al., 2014)

Bai et al (2011) apresentam propostas de LPS baseadas em um ou dois semáforos como transmissores e, como receptores, dois fotodiodos instalados na parte frontal de um veículo. Por meio de um canal VLC, cada semáforo transmite os seus dados posicionais aos fotodiodos e, juntamente com a diferença do tempo de recepção entre eles (*Time Difference of Arrival* – TDoA), essas informações são utilizadas para a estimativa da posição do veículo em movimento. Quando se introduz o efeito não coplanar às análises numéricas, e ainda se considerando tanto a aplicação como a ausência da rotação coplanar, conclui-se que a sua aplicação evita distorções na determinação do posicionamento, visto que ela não introduz erro nas medições. Os resultados da simulação mostram que a acurácia deste sistema depende diretamente da distância entre semáforo e veículo, bem como, da velocidade deste. Para distâncias inferiores a 5 m, o erro foi maior que a uma distância de 50 m (apenas 0,5 m). No entanto, a distâncias superiores a 20 m, a influência da velocidade do veículo sobre o erro mostrou-se irrelevante.

Em (LIU et al., 2012), os autores propõem um sistema híbrido de VLC e radiofrequência (RF) para comunicação e posicionamento em ITS, visando a superar as limitações da VLC no que concerne a distâncias maiores entre transmissor e receptor, além da confiabilidade do sistema (por meio da RF) e proporcionar maior precisão no posicionamento (por meio da VLC). Em oposição a outros sistemas híbridos encontrados na literatura, em que os dois sistemas operam em sentidos opostos, aqui ambos atuam no mesmo sentido, tirando proveito de suas características complementares. Transmite-se uma maior quantidade de informações pela RF, considerada pelos autores como um meio mais confiável que a VLC (sujeita a condições climáticas, ruídos de fundo e obstáculos), enquanto que a VLC se encarrega das informações relativas a posicionamento, valendo-se do seu direcionamento preciso. Este sistema de comunicação entre veículos e semáforos utiliza a técnica *Code Division Multiple Access* (CDMA), visto que há múltiplos acessos às informações disponíveis. Como receptores óticos propõem-se fotodiodos (ângulo de visada mais restrito comparativamente a câmeras), uma vez que os autores propõem a comunicação entre veículo e semáforo situados em uma mesma faixa da via. Cada semáforo transmite por VLC apenas as suas informações unívocas (ID), enquanto que a RF, utilizada por um entre vários semáforos vizinhos, se

encarrega das informações úteis aos veículos em todas as faixas. A tecnologia CDMA permite que cada veículo identifique apenas o pacote de dados associado à sua faixa (ou ID do semáforo correspondente) e, portanto, as informações que de fato lhe interessam (informações baseadas em posicionamento). Os resultados da simulação mostram um incremento da comunicação utilizando-se o sistema híbrido, comparativamente à apenas a utilização do sistema VLC.

Em (TRONG-HOP e MYUNGSIK, 2015), os autores investigam as técnicas de posicionamento em ambientes internos baseadas em VLC, avaliando quais poderiam ser aplicadas em ambientes externos. Primeiramente avaliam aquelas baseadas em Triangulação: *Time of Arrival* (ToA), *Time Difference of Arrival* (TDoA) e *Received Signal Strength* (RSS). A acurácia de posicionamento na técnica ToA depende da sincronização entre estações base (transmissores) e receptor, o que é complexo de se alcançar em ambientes externos. Na técnica TDoA, a sincronização também é necessária, mas apenas entre os transmissores o que, teoricamente, facilita a sua implementação. No entanto, faz-se necessária a determinação precisa dos tempos de recepção, o que demanda a utilização de um fotodiodo como receptor que, conforme já apontado, apresenta grandes limitações em ambientes externos. Esta também é apontada como a principal limitação da técnica RSS pelos autores. A seguir, avaliam as técnicas baseadas em Triangulação por *Angles of Arrival* (AoA), utilizando matrizes de fotodiodos ou sensores de imagem como receptores. Os autores avaliam apenas estudos com fotodiodos que, a partir da combinação das técnicas RSS e AoA, apresentam resultados satisfatórios. No entanto, teriam as mesmas limitações anteriores em ambientes externos. Finalmente, analisam a técnica baseada na condição de Colinearidade, que utiliza sensores de imagem. Esta técnica relaciona as coordenadas reais do objeto do posicionamento, do sensor de imagem e as coordenadas do objeto projetadas no plano do sensor. Pelos estudos avaliados, concluem que, embora fornecendo resultados menos precisos que as demais técnicas, devido a fatores como ruídos de fundo, resolução do sensor, distorções da lente e seu ângulo de visão, esta técnica de posicionamento é a mais adequada para aplicação em ambientes externos.

Em (DO e YOO, 2016b), os autores propõem um sistema de

posicionamento de veículos em movimento baseado em VLC, a partir de luminárias públicas. O receptor instalado no veículo é um sensor de imagem CMOS que, a despeito das vantagens já apresentadas, tem o seu desempenho afetado pelo mecanismo *rolling shutter*. Este mecanismo expõe as linhas do sensor à luz em diferentes momentos, provocando uma distorção da imagem, o que, para posicionamento é bastante indesejável. Esse fato é agravado quando a câmera está em movimento relativamente ao transmissor (luminária), o que ocorre no sistema aqui proposto. Imagens captadas quando o veículo se aproxima de luminárias retratam uma situação irreal, em que estas parecem estar mais próximas da câmera (Figura 19).

Figura 19 - Imagem captada por sensor CMOS estável (esquerda) e em movimento (direita)

Fonte: (DO e YOO, 2016b)

A partir da condição de colinearidade e de características conhecidas como o *row readout time* do sensor, a velocidade do veículo e sua direção, os autores propõem um algoritmo de compensação do efeito *rolling shutter*. Ao final da simulação, em que consideram quatro pontos de iluminação distintos ao longo de dois lados da via e veículo em movimento de 0 a 20 m/s, provam que, com a aplicação do algoritmo de compensação a acurácia do posicionamento se mantém constante em 0,04 m, independente da velocidade do veículo enquanto que, sem o algoritmo, o erro de posicionamento chega a 1,8 m para 20 m/s.

Kim e Jung (2016) propõem um método para a determinação da posição de veículos em túneis, a partir das comunicações V2V e V2I e da condição de Colinearidade (Figura 20).

Figura 20 - Pontos de interesse obtidos após a aplicação de filtros na imagem original

Fonte: (KIM e JUNG, 2016)

As lanternas traseiras de um veículo e as luminárias do túnel (todas a LED) transmitem as suas coordenadas absolutas por meio da modulação *On-Off Keying* (OOK). Uma câmera no veículo posterior capta todas as fontes luminosas do túnel sendo que, após a aplicação de filtros, descarta os ruídos de fundo, apresentando apenas as fontes luminosas de interesse. Para que se determine a posição do veículo em questão (que equivale à posição da câmera nele instalada, tridimensional), a partir da imagem bidimensional da câmera e das coordenadas tridimensionais transmitidas por ao menos três fontes luminosas, aplica-se a condição de colinearidade. Observa-se pelos resultados da simulação que, na medida em que a câmera se aproxima das fontes luminosas, o erro na medição da posição diminui. Quando a distância à fonte

mais próxima chega a menos de 20 m, o erro atinge 1 m. Destas observações conclui-se que quanto melhor a definição da câmera utilizada (número de *pixels*) e mais próximas as fontes, mais preciso será o posicionamento do veículo.

1.8 TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS

A população total do Brasil em 2015 chegou a mais de 204 milhões de habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2015). Destes, 46 milhões utilizam transporte público diariamente sendo que, 87% dessas viagens, são realizadas por ônibus (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (NTU), 2014). Pode-se inferir o tamanho do desafio que os gestores públicos e operadores enfrentam cotidianamente, para atender aos anseios destes usuários. Motivada pelos protestos populares relativos à mobilidade urbana e ao transporte em 2013, a NTU encomendou uma pesquisa destinada a ouvir, das lideranças do setor de transporte, quais seriam as soluções para atender a população. Foram entrevistados 91 formadores de opinião, destacando-se aqui uma das prioridades para que se proporcione maior qualidade do serviço: dentre as modalidades de transporte de massa, as faixas exclusivas encontram-se em segundo lugar nas prioridades de investimento, com 69,2% das respostas. A própria NTU encaminhou ao Ministério das Cidades, em 2013, uma proposta de implantação de 4000 km de faixas exclusivas em 46 municípios com população superior a 500 mil habitantes em 12 meses.

Em São Paulo foi implementado o programa “Dá Licença para o Ônibus” (COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET), 2013b), cujo objetivo é possibilitar aos usuários de ônibus viagens que demandem menor tempo, inclusive de espera no ponto, com mais conforto e maior eficiência do sistema como um todo.

Segundo dados da Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), em 2014 as faixas exclusivas proporcionaram ao paulistano usuário de ônibus um ganho de 40,7 minutos ao dia e um aumento da velocidade média dos ônibus em 68,7%.

Figura 21 - Exemplo de faixa exclusiva

Fonte: (Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), 2013a)

Até fevereiro de 2016, São Paulo já contava com cerca de 500 km de faixas exclusivas para ônibus (COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET), 2016).

1.9 GPS E O TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS

Em 2008, o jornal O Estado de S. Paulo publicava a seguinte manchete: “Ônibus de São Paulo serão monitorados por satélite - 85% da frota já está rastreada. Até o final do ano, 100% dos ônibus serão monitorados *online*” (O ESTADO DE S. PAULO, 2008). Em abril de 2016, o mesmo jornal publicava: “Prefeitura vai ampliar fiscalização de ônibus em São Paulo”, divulgando que, por meio do uso intensivo da tecnologia GPS, seria possível um maior controle de horários de saída dos veículos de terminais, bem como, partidas relativas a um determinado intervalo de tempo (ITALIANI et al., 2016). Este exemplo vem sendo seguido por inúmeras cidades brasileiras a exemplo de Belo Horizonte, Manaus, Porto Velho, Campinas, João Pessoa, Rio de Janeiro, Uberlândia, etc.

Monitora-se a frota de ônibus da cidade de São Paulo (hoje da ordem de 15.000 veículos) por meio da tecnologia *Automatic Vehicle Location* (AVL), um computador de bordo com um equipamento GPS a ele acoplado. Em intervalos de tempo predeterminados, o AVL transmite informações do veículo

a uma central de processamento de dados. Transmitem-se ao Sistema Integrado de Monitoramento (SIM) informações como prefixo, linha, sentido, posição do veículo, estado de ignição, se parado ou em trânsito. Isto possibilita “monitorar, controlar e fiscalizar de forma segura e eficiente a qualidade do serviço prestado à população, por meio de coleta e da disponibilização contínua de informações sobre os veículos, passageiros, sistema viário e sobre as interfaces entre estes elementos” (SÃO PAULO TRANSPORTE - SPTRANS, 2009). O SIM processa todas as informações recebidas e as redireciona aos diversos centros de controle e garagens: Centro de Operação de Terminais (COT), instalados nos terminais de transferência de passageiros, Centros de Operação das Concessionárias (COC), Centro de Controle Operacional (CCO) e Centro de Controle Integrado (CCI).

A partir da identificação local e temporal de cada veículo, é possível obter-se outras informações tais como o histórico das partidas, o tempo de percurso e a velocidade. Com isso, verifica-se se o veículo está cumprindo a sua ordem de serviço, que estipula itinerário, paradas e velocidade média, dentre outros parâmetros. Se constatadas anomalias relativas à rota do veículo ou a outros procedimentos, alarmes disparados à CCO permitem que os gestores deste modal tomem as providências cabíveis.

O sistema de posicionamento de veículos fornece subsídios à gestão e ao planejamento de frotas, essencial à qualidade do serviço no transporte público. Essas informações também alimentam sistemas como o Olho Vivo da SPTrans (SÃO PAULO TRANSPORTE - SPTRANS, 2015) que monitora a fluidez do tráfego nas vias de São Paulo e Moovit (MOOVIT, 2015), aplicativo móvel que possibilita o melhor planejamento das viagens pelo usuário que pretende utilizar o transporte público.

Percebe-se a relevância do sistema de posicionamento no contexto do transporte público e, portanto, justifica-se a busca por alternativas que permitam suprir as deficiências do GPS nas situações citadas anteriormente.

1.10 TECNOLOGIA E O TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS

Os centros urbanos enfrentam problemas expressivos relacionados a inúmeros aspectos básicos como mobilidade, iluminação e acesso à comunicação móvel. Muitos destes problemas decorrem da grande concentração de pessoas. Afinal, a população urbana mundial cresce a uma taxa de 7500 indivíduos a cada hora. Estima-se que, até 2050, 70% da população mundial viverá em cidades (ERICSSON, 2015b).

Atualmente, no Brasil, 85% da população vivem em cidades. Estudo recente aponta que os habitantes que trabalham fora de casa gastam, em média, 100 minutos ao dia com os deslocamentos entre suas residências e o trabalho (ida e volta) devido aos congestionamentos. Reduzindo-se este intervalo de tempo em 30 minutos, o aumento de produtividade resultante equivaleria a 2,83% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, ou seja, R\$ 156,2 bilhões (HADDAD e VIEIRA, 2015).

Diante de fatos como estes, grandes atores das áreas de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), além de pesquisadores, encabeçam movimentos, em prol da adoção crescente da tecnologia, proporcionando recursos às cidades para mitigar ou até solucionar algumas de suas questões.

Carlo Ratti, diretor do City Lab do Massachusetts Institute of Technology (MIT) (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2014), preconiza que grande parte do projeto de cidades inteligentes não se refere propriamente à tecnologia, mas sim como ela desaparece no cenário urbano, permeando, de forma ubíqua, a vida de seus cidadãos. Ainda segundo Ratti, estes projetos terão um avanço expressivo, quando os envolvidos estiverem imbuídos de uma cultura de inovação nestes contextos (DREHER, 2014).

Os Sistemas Inteligentes de Transporte são perfeitamente alinhados a esses princípios. No que concerne ao transporte público urbano por ônibus, observa-se que já há a incorporação de inúmeras tecnologias aos veículos, que proporcionam funcionalidades como contagem de passageiros, informações aos passageiros, comunicação do motorista com a central, monitoramento remoto de condições do veículo, botão de pânico, conexão Wi-Fi, tecnologias celular, GPS, etc (Figura 22).

Figura 22 – Esquemático da tecnologia embarcada em ônibus urbanos

Fonte: (SÃO PAULO TRANSPORTE - SPTRANS, 2014)

Adicionalmente, observam-se movimentos expressivos de grandes empresas de TIC, aliadas às gigantes do setor automotivo, a exemplo da parceria entre Ericsson e Volvo Bus Latin America (sediada em Indaiatuba - SP). Anunciada em dezembro de 2015, as duas gigantes lançaram uma versão do sistema ITS4Mobility da Volvo Bus, para o mercado da América Latina, atendendo às necessidades locais de gerenciamento de tráfego e fornecimento de informações aos usuários, em tempo real (ERICSSON, 2015a). O ITS4Mobility já é utilizado em vários países da Europa, no Canadá e na África do Sul e, no Brasil, está em operação em Goiânia.

A Ericsson também apresentou na UITP World Congress and Exhibition 2015 o ponto de ônibus conectado (Figura 23). O objetivo do projeto é prover, nestes locais, informações aos viajantes e uma nova fonte de renda aos gestores do transporte público. No caso dos viajantes, disponibilizam-se informações relativas a horários e posições das linhas de ônibus, telas interativas com mapas, notícias locais, informações turísticas e publicidade. Adicionalmente, poderão incorporar câmeras de circuito fechado de TV, botões de pânico e dispositivo para contato direto com a polícia, proporcionando maior

segurança aos usuários. Os gestores terão novas fontes de renda por meio da locação dos painéis às empresas de celular que queiram prover pontos de acesso Wi-Fi à internet (*Hot Spots*), além de empresas interessadas em realizar publicidade nestes locais (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT, 2015).

Figura 23 - Estação de ônibus conectada Ericsson

Fonte: (ERICSSON, 2015b)

Observa-se um movimento em várias partes do mundo na direção de pontos cada vez mais funcionais e conectados, como o EyeStop (Figura 24), projeto conjunto do MASSACHUSSETS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (2014a) e da autoridade responsável por transportes na cidade de Florença, Itália. Ambos vêm trabalhando no ponto de ônibus do futuro, que vai incorporar inúmeras tecnologias que, por meio de interação com o usuário, proporcionarão informação e entretenimento.

Figura 24 -, projeto conjunto do MIT e da ATAF

Fonte: (Massachusetts Institute of Technology)

Figura 25 - Exemplos de novos pontos de ônibus adotados em São Paulo – SP

Fonte: (FOLHA DE S. PAULO, 2012)

Mesmo no Brasil observam-se importantes iniciativas nessa área. Em São Paulo, a partir de 2013, iniciou-se a substituição dos tradicionais abrigos por outros cujos projetos buscam identidade com a região de implantação, além de incorporarem painéis para publicidade e iluminação a LED (Figura 25). O plano considera 6500 novos abrigos em três anos e mais 1000, em quinze anos.

Observou-se em 2012 uma iniciativa mais sofisticada, que esteve em testes no cruzamento da Av. Paulista com a R. da Consolação, o e-Ponto (SÃO PAULO TRANSPORTE - SPTRANS, 2012). Nele o usuário encontrava painéis dinâmicos com informações das linhas em tempo real, geração de energia a partir da passagem dos ônibus pelo local (energia cinética) e placas fotovoltaicas na cobertura do ponto, qualidade do ar e umidade relativa controladas, e acesso Wi-Fi gratuito à Internet, dentre outras funcionalidades (Figura 26).

Figura 26 - e-Ponto instalado pela SPTrans para testes

Fonte: (SÃO PAULO TRANSPORTE - SPTRANS, 2012)

A proposta desta pesquisa está plenamente alinhada a este contexto, visto que considera o compartilhamento de elementos da infraestrutura urbana entre várias utilidades públicas (iluminação pública e sistema de comunicação sem fio voltado ao transporte público), além de considerar a incorporação de novas tecnologias aos ônibus (dispositivos de comunicação VLC).

1.11 NORMALIZAÇÃO

Apresentam-se a seguir, informações e resultados obtidos pelos grupos que trabalham com o desenvolvimento de normas referentes à comunicação por IV e VLC, bem como, à comunicação V2V, V2I e I2V.

1.11.1 IV e VLC

Os meios de comunicação ótica sem fio vêm recebendo maior atenção, tanto da comunidade científica quanto de empresas. Percebe-se este movimento por parte de organizações como a Infrared Data Association – IrDA que, desde 1993, se dedica ao desenvolvimento e normalização da tecnologia de infravermelho. Incorporaram-se mais de um bilhão de dispositivos em equipamentos eletrônicos, segundo os seus padrões (INFRARED DATA ASSOCIATION, 2011). Em 2011, constituiu-se um novo grupo de pesquisa visando ao aprimoramento da consolidada norma de 1 Gbps, Giga – IV, para 5 e 10 Gbps (INFRARED DATA ASSOCIATION, 2011; FRAUNHOFER INSTITUTE FOR PHOTONIC MICROSYSTEMS IPMS, 2012).

Em vista do potencial da tecnologia VLC, realizam-se significativos esforços para a sua padronização. O Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) iniciou o seu trabalho de normalização do VLC em 2003, por meio do Task Group 7. Em meados de 2011, o grupo concluiu suas atividades publicando a norma IEEE 802.15.7 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2011), que considera três camadas físicas, de acordo com a taxa de transmissão de dados (baixa, média e alta), para comunicações óticas sem fio em curtas distâncias. Em relação à modulação, enfoca as técnicas de chaveamento liga-desliga (*On-Off Keying* - OOK) e de modulação variável por posição de pulso (*Variable Pulse-Position Modulation* - VPPM), sendo esta uma combinação da modulação por posição de pulso (*Pulse-Position Modulation* - PPM) com a modulação por largura de pulso (*Pulse-Width Modulation* - PWM). Aborda, ainda, métodos de compensação de cintilação (*flicker*). Também de 2011, a norma ISO 17417 especifica as camadas PHY e MAC, mas para a comunicação por luz visível entre

dispositivos a uma distância máxima de 10 cm, a exemplo de dispositivos móveis (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2011).

No Japão, o Visible Light Communication Consortium – VLCC (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION CONSORTIUM, 2007) trabalha pela normalização do sistema VLC há anos. Em 2007, a Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA) incorporou duas de suas propostas (JAPAN ELECTRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGY INDUSTRIES ASSOCIATION (JEITA), 2010), dando origem às normas CP-1221 e CP-1222. O VLCC promoveu a CP-1223 da JEITA, reconhecida em 2013. Esta norma define o método de comunicação utilizando-se um raio de luz visível, que permite aplicações diversas de localização por meio de identificador (ID) único. Para identificação de equipamentos, o ID pode incluir o seu número de série, fabricante, nome do produto, dados de especificação, manual, dentre outros parâmetros. A intensidade da luz visível é modulada por sinais 4PPM, com taxa de transmissão de 4,8 kb/s.

Atualmente, outro grupo de trabalho do IEEE denominado Optical Camera Communications (OCC) Study Group (SG 7a) pesquisa a utilização de dispositivos óticos como *flashes*, *displays* e sensores de imagem, para a transmissão e recepção de dados, permitindo transferência de dados escalável, posicionamento e localização, dentre outras aplicações. Este grupo busca criar, em última instância, um apêndice à norma IEEE 802.15.7 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017d).

1.11.2 Comunicação V2V, V2I e I2V

Visto que os países se encontram em fases distintas de adoção das aplicações de ITS, devido às diferentes culturas, legislações e aos contextos econômicos, ainda não existem padrões universais de comunicação entre veículos e entre estes e a infraestrutura, especialmente por meio da luz visível, tecnologia ainda em estágio de pesquisa. No entanto, encontram-se em andamento diversos projetos no contexto de C-ITS ao redor do mundo, podendo-se citar como exemplos que têm contribuído para o desenvolvimento de normas, tecnologias de comunicação e aplicações em ITS: Connected Vehicle Safety Pilot (Estados

Unidos); DRIVE C2X, SAFESPOT, CVIS, FOTsis, EasyWay, COMeSafety2, COOPERS (União Europeia); SMARTWAY, UTMS/DSSS, ASV (Japão); CoCarX (Alemanha) (SILVA et al., 2014; WEISS, 2011; UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2014). Além destas iniciativas, países como Coreia, Singapura, Taiwan e Austrália também investem em importantes ações de ITS, reconhecidas mundialmente (MINISTRY OF LAND, 2014; AUSTROADS, 2015).

Nos Estados Unidos, o programa de desenvolvimento de normas em ITS, liderado pelo Departamento de Transportes (United States Department of Transportation - The USDOT's ITS Standards Program), teve início em 1991, com os objetivos de desenvolver e implementar normas e protocolos, promovendo a disseminação do uso das tecnologias relacionadas a ITS, bem como promover a compatibilidade entre tecnologias de sistemas inteligentes veículo-rodovia (UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2013). Por meio de relatórios, o USDOT vem divulgando as ações efetivamente adotadas e o planejamento estratégico dedicado a cada quadriênio. Desde 2009, ele busca a cooperação com outros países, visando promover a interoperabilidade entre sistemas veiculares (C-ITS), a exemplo de União Europeia, Japão e Canadá (UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2014). Com relação às normas adotadas nos Estados Unidos, cabe ressaltar a IEEE 802.11p e a família de normas IEEE 1609. A IEEE 802.11p (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2010) é uma extensão da norma IEEE 802.11 (dedicada à comunicação em redes locais sem fio), especificando a comunicação sem fio no ambiente veicular (*Wireless Access in Vehicular Environments* - WAVE). Esta base é necessária para suportar aplicações em ITS, como a troca de dados entre veículos em movimento e entre estes e a infraestrutura viária (banda de 5,9 GHz). Já a IEEE 1609 é uma família de normas para WAVE, ou seja, define uma arquitetura e um conjunto de protocolos, serviços e interfaces que, conjuntamente, proporcionam comunicações seguras sem fio V2V e V2I. Podem-se citar, como exemplos de aplicações suportadas pelo conjunto IEEE 1609, a segurança veicular e o pedágio automático (UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2009).

Em 2010, por solicitação da Comissão Europeia, as organizações

européias de normalização Comité Européen de Normalisation – CEN (2014) e European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (2014) foram incumbidas de apresentar um conjunto de normas em ITS visando à interoperabilidade na região. Sob a liderança do Car 2 Car Communication Consortium (C2C-CC), da ERTICO e do ETSI, no início de 2014 a tarefa foi concluída, com a apresentação do conjunto inicial das normas C-ITS, resultantes dos mais de 40 projetos de pesquisa realizados por membros da União Europeia. Baseado na arquitetura ISO 21217 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014; SILVA et al., 2014), o conjunto abrange tópicos ligados à ITS G5 por rádio (sendo que G5 corresponde à banda de frequência de 5 GHz), variante da IEEE 802.11p, com as devidas adequações ao contexto europeu. Além disso, aborda questões como redes *ad hoc* de transporte com endereçamento georreferenciado, protocolos de envios de mensagens, questões de segurança e privacidade, dentre outras (FESTAG, 2014). Os fabricantes de veículos filiados ao C2C-CC assinaram, em 2013, um compromisso para introduzir o sistema na Europa a partir de 2015. Trata-se do Cooperative ITS Corridor, uma estrada “inteligente” que ligará as cidades de Roterdã e Viena, passando por Munique e Frankfurt. O projeto será iniciado por Holanda, Alemanha e Áustria, contando com a participação futura de França, República Checa e Polônia (GROUP, 2014).

O Japão investe em ações de ITS desde 1980, com o intuito de aumentar a segurança nos transportes rodoviários e diminuir os congestionamentos. O provimento ao público de informações relativas ao tráfego, por meio de tecnologias avançadas de navegação veicular, utilizando sistemas cooperativos V2I (DSRC em 5,8 GHz), permitem a comunicação em tempo real entre sensores instalados em pontos estratégicos das rodovias (*beacons*), equipamentos embarcados nos veículos (*On Board Units* – OBU) e mapas digitais. Trata-se da plataforma cooperativa e aberta Smartway, em que o veículo, o motorista, outros veículos, os gestores da rodovia e os provedores de serviços são os elementos que compõem o ITS. Espera-se que este venha a ser um canal de prestação de inúmeros serviços pela iniciativa privada (MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2013).

Um sistema similar para uso urbano, o Universal Traffic Management System/Driving Safety Support System (UTMS/DSSS), opera com a tecnologia

de comunicação por IV. Na comunicação I2V2V destaca-se o Advanced Safety Vehicles (ASV), operando em 5,8 GHz (DSRC). No entanto, tratam-se de testes preliminares, realizados em 2014 em Hiroshima, migrando paulatinamente para a banda de 700 MHz (UHF), aberta no país desde 2011 (TSUGAWA, 2011; TSUBOI e SEKIGUCHI, 2014).

Neste capítulo apresentou-se a Revisão da Literatura nos vários tópicos de interesse a esta pesquisa, quais sejam: comunicação ótica sem fio (*Optical Wireless Communication* – OWC), tecnologia de LED, comunicação pela luz visível (*Visible Light Communication* – VLC), Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transport Systems* – ITS) e comunicação em ITS, VLC em ITS, sistemas de posicionamento geográfico por meio da recepção e tratamento de sinais provenientes de satélites (*Global Positioning System* – GPS) e GPS Diferencial (*Differential GPS* – DGPS), GPS e sua relevância no transporte público, VLC em aplicações de posicionamento, o transporte público no contexto das grandes cidades e, finalmente, normalização relacionada à comunicação por meio de Infra Vermelho (IV) e VLC, bem como, a relativa às comunicações entre veículos e infraestrutura.

No capítulo a seguir, apresentar-se-ão os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Descrevem-se, a seguir, os materiais e métodos utilizados nessa pesquisa. Mas primeiramente, apresenta-se o descritivo sucinto da aplicação proposta.

2.1 Aplicação Proposta

A pesquisa realizada baseou-se na seguinte proposta de aplicação:

- A. O dispositivo transmissor, acoplado à luminária pública a LED, transmitirá dados posicionais ao ônibus, em locais onde não haja a sua recepção por meio de GPS (Figura 27).
- B. O dispositivo receptor, embarcado no ônibus, estará conectado à sua Unidade Central de Processamento (UCP), à semelhança de outros dispositivos já em uso neste modal, conforme exposto no item 2.10 - Figura 22.
- C. A informação recebida será transmitida, por meio da UCP, à Central de Controle e Operação (CCO), para utilização pelos responsáveis pelo planejamento e gestão do transporte público (Figura 27).

Figura 27 – Esquemático da aplicação proposta

2.1.1 Condições de contorno

Definiu-se como prioridade, a avaliação da comunicação entre luminárias e os ônibus que trafegam em faixas exclusivas. Realizou-se essa linha de corte devido aos fatores técnicos e práticos descritos a seguir.

Primeiramente, estudo luminotécnico realizado pelo fabricante da luminária pública cedida para o estudo (Anexo A), apontou que a área de maior incidência de luz seria justamente na faixa exclusiva (Figura 28).

Figura 28 - Representação ilustrativa de cores falsas segundo simulação com escala de lux: maior incidência de luz na faixa exclusiva

Fonte: (ILUMATIC S/A, 2015)

Os parâmetros adotados pelo fabricante para o traçado de trecho típico são usuais e aderentes às normas pertinentes (Figura 29).

Figura 29 - Esquema de distribuição e instalação de luminárias

Fonte: (ILUMATIC S/A, 2015)

onde:

- (1) Altura da instalação: 10 m
- (2) Pendor: 0,70 m
- (3) Inclinação do braço extensor: 5°
- (4) Comprimento do braço extensor: 1 m
- Luminária LED Maestra 150 W dimerizável
- Distância entre postes = 30 m
- Via com 5 faixas (uma exclusiva para ônibus; demais para veículos de passeio).

Adicionalmente, observou-se que os ônibus que circulam nas faixas exclusivas estão próximos às calçadas, onde já existem luminárias públicas instaladas ou, na pior das hipóteses, a instalação demandaria intervenções menos trabalhosas e onerosas que os corredores, onde a circulação dos ônibus se dá à esquerda dos veículos de passeio (Figura 30).

Outro fator relevante já citado é a atenção que as faixas exclusivas vêm recebendo das instâncias governamentais competentes no Brasil, indicando uma grande rede de transporte que, potencialmente, poderá ser beneficiada pelo sistema proposto.

Figura 30 - Diferença entre corredor (figura à esquerda) e faixa exclusiva de ônibus (à direita): observa-se que, na faixa exclusiva, o ônibus circula sempre ao lado da calçada

Fonte: (FOLHA DE S. PAULO, 2015)

A análise foi realizada considerando-se os ônibus em movimento, considerando-se velocidades variáveis e limitadas à velocidade máxima estipulada para as faixas exclusivas sendo, no caso da cidade de São Paulo, 60 km/h.

Vale ressaltar que, embora as condições de recepção do GPS possam ser comprometidas em ambientes diversos (túneis, terminais rodoviários, garagens ou mesmo vias a céu aberto) e, portanto, condições de fixação das luminárias também diversas, bem como, sua potência, para este estudo foram adotadas as condições apontadas no Anexo A.

Partindo-se dessas premissas, o desenvolvimento da pesquisa foi estruturado em duas frentes: o desenvolvimento do protótipo destinado à etapa experimental e a etapa de simulação computacional.

2.2 Desenvolvimento do Protótipo

Nesta pesquisa desenvolveu-se um protótipo em escala reduzida, descrito em detalhes mais adiante (Figura 31). É importante ressaltar-se que o desenvolvimento do protótipo (especialmente do circuito receptor) foi apenas uma ferramenta para o melhor entendimento das características da VLC (qualidades e limitações) quando utilizada na aplicação aqui proposta.

No Apêndice F encontra-se descrito um protótipo em escala real como

parte das propostas para pesquisas futuras.

Figura 31 - Protótipos em escala reduzida e real

Fonte: Autora

Para o desenvolvimento do protótipo buscou-se um maior embasamento técnico na literatura, priorizando-se a norma IEEE 802.15.7 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2011).

Essa norma especifica em seu escopo, as camadas PHY (*Physical Layer*) e MAC (*Media Access Control*) para as comunicações sem fio de curto alcance, baseadas em luz visível e operando em meios óticos transparentes. Ela trata de taxas de transferência de dados suficientes para suportar serviços que envolvam áudio e vídeo, considera a mobilidade do *link* de comunicação, a compatibilidade com infraestruturas de luz visível e as deficiências causadas por ruídos e interferências provindos de outras fontes de luz no ambiente. A camada MAC acomoda *links* de luz visível. Essa norma é aderente às regulamentações que tratam da segurança à visão humana.

A camada PHY suporta vários tipos sendo:

- PHY I: recomendada para aplicações ao ar livre, associadas a baixas taxas de transferência. Ela pode utilizar as técnicas de modulação OOK, com taxas de transferência entre 11,67 kb/s e 100,0 kb/s, ou VPPM, com taxas de transferência da ordem entre 35,56 kb/s e 266,6 kb/s, respectivamente.

- PHY II: recomendada para aplicações em ambientes internos, que demandem taxas moderadas de transferência de dados. Ela pode utilizar as técnicas de modulação OOK, com taxas de transferência entre 6,0 Mb/s e 96,0 Mb/s, ou VPPM, com taxas de transferência da ordem entre 1,25 Mb/s e 5,0 Mb/s, respectivamente.
- PHY III: recomendada para aplicações que utilizem a técnica *Color-Shift Keying* (CSK), ou seja, múltiplas fontes de luz em cores distintas e receptores. Atende a taxas de transferência entre 12,0 e 96,0 Mb/s.

Observa-se, portanto, que a aplicação aqui proposta se relaciona à camada PHY I. A decisão sobre qual a técnica de modulação a se utilizar, leva à taxa de *clock* ótico da comunicação: para modulação OOK, *clock* a 200 kHz e para modulação VPPM, *clock* a 400 kHz. Finalmente, a codificação *Run-length limited* (RLL) recomendada para a modulação OOK é a Manchester, enquanto que para a VPPM, a 4B6B.

A norma define a técnica de modulação OOK como sendo uma técnica simples, que representa dados digitais como a presença (“ON”) ou a ausência (“OFF”) de um sinal. Ela salienta que “ON” e “OFF” são apenas dois níveis lógicos ou dois níveis de amplitude distintos para fins de comunicação, não requerendo necessariamente, que a fonte de luz esteja completamente desligada. Assim como a PPM, a OOK é uma das técnicas de modulação mais empregadas em comunicação por IV, sendo a mais utilizada em sistemas de comunicação por luz em “espaço livre” (*Free-space optical communication* - FSO). No entanto, frequentemente ela sofre com as interferências causadas por outras fontes de luz no ambiente (GHASSEMLOOY et al., 2013). No receptor chegam, tipicamente, o sinal modulado, que contém um componente significativo de corrente contínua (*Direct Current* – DC), superposto pelos sinais correspondentes às demais interferências presentes no ambiente em questão.

Tanto a norma como os estudos em VLC avaliados apontam prós e contras para todas as técnicas de modulação, especialmente ao ar livre, onde há mudanças constantes de contexto e inúmeras fontes de ruído. Na literatura não há consenso em relação à adoção da melhor técnica a ser adotada em

cada aplicação e contexto.

A proposta de aplicação de VLC desta pesquisa é voltada ao posicionamento de veículos onde o GPS esteja comprometido, o que pode dar-se tanto em ambientes urbanos fechados como em ambientes abertos, pelas razões já expostas. Diante disso, optou-se pela técnica de modulação OOK, tanto pela maior simplicidade de implementação como pela recomendação da norma para ambientes externos.

Apresentam-se a seguir, maiores detalhes sobre o protótipo efetivamente desenvolvido.

2.2.1 Protótipo em escala reduzida

Buscou-se desenvolver um modelo em escala reduzida, que retratasse o sistema VLC proposto nessa pesquisa e facilitasse testes experimentais (descritos mais adiante).

Dentre os materiais utilizados, pode-se citar como elemento transmissor, a luminária a LED LiFi Beacon (LED branco, 1,3 W), parte integrante do *kit* LiFi XS (Figura 32 – Luminária a LED LiFi Beacon). Essa luminária, dotada de um modulador de luz, de padrão próprio do seu fabricante, que possibilita a transmissão de um código único, permitiu que se realizassem inúmeros testes de ajuste com o circuito receptor desenvolvido.

Figura 32 – Luminária a LED LiFi Beacon

Fonte: (OLEDCOMM, 2007)

Cabe ressaltar que essa luminária também se apresenta modulada pela técnica OOK, o que pôde ser constatado avaliando-se a sua onda característica por meio de um osciloscópio (Figura 33).

Figura 33 – Onda amarela: associada ao sinal gerado pela luminária LiFi Beacon

Fonte: (Andrei Ferreira, 2016)

Apresenta-se, a seguir, o diagrama de blocos correspondente ao circuito receptor (Figura 34).

Figura 34 – Diagrama de blocos do circuito receptor (protótipo em escala reduzida)

Fonte: (Andrei Ferreira e Renata Marè, 2016)

Descrição do diagrama de blocos do circuito receptor:

Fotodiodo PIN

Este componente transforma a energia luminosa em energia elétrica, na forma de corrente. Dentre os fotodiodos avaliados, optou-se inicialmente pelo PIN BPW34 (VISHAY, 2015), com alta velocidade e sensível à radiação no espectro visível e próximo ao IV.

Amplificador operacional em transimpedância

O amplificador operacional em transimpedância converte a corrente gerada pelo fotodiodo em tensão com ganho, ou seja, tensão amplificada.

Filtro passa-banda

O filtro passa-banda composto por resistor, indutor e capacitor (RLC) permite uma filtragem dos sinais que possuem frequência distante à sua frequência de corte (que é de cerca de 200 kHz), atenuando-os.

Amplificador operacional não inversor

Este amplificador operacional amplifica a tensão após a passagem do sinal pelo filtro passa-banda, sem invertê-lo.

Processo de derivação

O processo de derivação se dá por meio de um circuito composto por resistor e indutor (RL), cuja tensão de saída apresenta descontinuidades na presença de bordas abruptas (subida e descida) no sinal de entrada (onda quadrada).

Processo de *triggering*

O processo de disparo (*triggering*) serve para habilitar ou desabilitar uma chave em função da tensão de entrada. No caso, ele define quando o sinal de saída deve estar em nível alto (3,3 ou 5 V) ou baixo (0 V) a partir da tensão de saída do processo de derivação, reconstruindo a onda quadrada, sem *off-set* (a 0 V) e limitada (a 3,3 V, no caso do Raspberry).

Observa-se na Figura 35 os efeitos esperados na recuperação do sinal com o emprego das técnicas de derivação e *triggering* (CAILEAN et al., 2015). A onda (a), azul, mostra a saída do sinal do fotodiodo com tensão modulada de 100 mV/div. A onda (b), vermelha, mostra o efeito no sinal após o processo de derivação, em que as transições da modulação são amplificadas (2 V/div). A onda (c), verde, mostra a recuperação da onda quadrada (recuperação de dados), em que há maior qualidade do sinal (5 V/div).

Figura 35 – Exemplos de sinais elétricos no sensor VLC: (A - azul) saída do fotodiodo; (B - vermelha) saída do sinal com derivação; (C - verde) saída do sinal com *triggering*

Fonte: Adaptado de (CAILEAN et al., 2015)

Observa-se na Figura 36, o esquema elétrico do circuito receptor.

Figura 36 - Esquema elétrico do circuito receptor (protótipo em escala reduzida)

Fonte: (Andrei Ferreira, 2016)

2.2.2 Equivalência entre protótipos

A fim de que se pudesse viabilizar a equivalência entre protótipos que permitiu uma série de análises em nível de laboratório (teste de desempenho), partiu-se do conceito de iluminância (expresso em lux = lx), que é a relação do fluxo luminoso emitido por uma fonte luminosa e a superfície iluminada, a certa distância da fonte (ABNT, 2012). A partir dos estudos luminotécnicos relativos à luminária pública, realizado pelo fabricante (ANEXO A – Estudo luminotécnico da Luminária Maestra 150 realizado pelo fabricante) e à luminária LiFi Beacon, realizado pelo IEE – USP (ANEXO B – Estudo Luminotécnico da Luminária OledComm LiFiBeacon realizado pelo IEE / USP), pôde-se obter os valores de iluminância máxima para a aplicação proposta (38 lx) e para o modelo em escala (8,02 lx) (Figura 37).

Sabe-se que a distância entre transmissor e receptor (Tx e Rx), na aplicação proposta será de cerca de 7 m para iluminância máxima, uma vez que a luminária estará a 10 m de altura (poste) e o fotodiodo (teto do ônibus), a cerca de 3 m. Sabe-se também que a iluminância é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte. Com base nessas condições, determinaram-se os valores de iluminâncias máxima e mínima para a aplicação real (77,55 lx e 28,53 lx respectivamente), bem como, a medida do trecho iluminado total (21 m) ou a janela de comunicação (Figura 38).

Figura 37 – Esquema de equivalência entre sistemas VLC: protótipo em escala reduzida (luminária LiFi Beacon) e em escala real (luminária pública Maestra)

Fonte: Autora

Figura 38 – Distâncias (Tx – Rx) e iluminâncias: caso real

Fonte: Autora

Partindo-se do princípio que o protótipo reduzido deverá proporcionar a iluminância máxima de 77,55 lx quando do alinhamento perfeito entre transmissor e receptor, pôde-se determinar a distância entre os mesmos, para que os testes apresentassem equivalência com o protótipo real (1,01 m) (Quadro 2).

Quadro 2 – Distâncias (Tx – Rx) e iluminâncias (protótipo real e reduzido)

Máxima Iluminância (maior alinhamento entre Tx e Rx)	
Protótipo real	
Distância entre Tx e Rx (m)	Iluminância (lx)
10,0	38
7,0	77,55
Protótipo reduzido	
Distância entre Tx e Rx (m)	Iluminância (lx)
3,15	8,02
1,01	77,55

Fonte: Autora

Utilizando-se o ângulo de irradiância da luminária LiFi Beacon, $37,84^\circ$ (ANEXO B – Estudo Luminotécnico da Luminária OledComm LiFiBeacon realizado pelo IEE / USP), realizou-se avaliação análoga para o cálculo do trecho total iluminado pelo modelo, 1,57 m (Figura 39), ou janela de comunicação.

Figura 39 - Distâncias (Tx – Rx) e iluminâncias: modelo reduzido

Fonte: Autora

Para que se configurasse adequadamente o cenário, avaliou-se previamente ao teste qual seria a velocidade do protótipo, equivalente ao caso real mais crítico, ou seja, um ônibus em faixa exclusiva a 60 km/h. Para tanto, fez-se necessária a determinação do **tempo de comunicação** (ou janela de comunicação em segundos), parâmetro utilizado para a equivalência. A 60 km/h (ou 16,67 m/s), no caso real, a janela de comunicação para os 21 m seria de **1,26 s**. Portanto, para uma janela de comunicação de 1,26 s em 1,57 m, seria necessária uma velocidade de 1,25 m/s ou **4,5 km/h** para os testes com o protótipo.

Descreve-se a seguir, o teste de desempenho do sistema VLC aqui proposto realizado no Laboratório de Interoperabilidade de Equipamentos de ITS do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

2.2.3 Teste de desempenho

A fim de avaliar-se o desempenho do sistema VLC aqui proposto com o veículo em movimento, partiu-se para a realização de um teste com o protótipo, no Laboratório de Interoperabilidade de Equipamentos de ITS do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), pertencente ao Centro de Tecnologia da Informação, Automação e Mobilidade (CIAM) (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2016). O CIAM provê soluções tecnológicas e estratégicas em Tecnologia da Informação e Comunicação, com ênfase em ITS.

O laboratório utilizado permite que se avaliem tecnologias de comunicação sem fio entre veículo e infraestrutura e entre veículos, inclusive para altas velocidades, por meio de um circuito oval em posição vertical, delimitado por uma correia que se desloca por meio de um motor a ela acoplado. Encaixa-se nesta correia um bólido desenhado pelos técnicos do IPT, ao qual é possível acoplar-se dispositivos inerentes aos testes a serem realizados. O motor, por sua vez, é comandado por um software dedicado, pelo qual é possível estipular-se a velocidade de deslocamento da correia. Uma vez programada a velocidade desejada e acionado o motor, a correia passa a girar, levando consigo o bólido e o que a ele estiver acoplado.

Observam-se na Figura 40 e na

Figura 41, destaques do circuito receptor acoplado ao bólido (verso e frente). Na Figura 42, observam-se os membros da equipe de teste configurando o cenário para a sua realização. Pode-se ver a correia, o bólido com o circuito receptor, os anteparos pretos que delimitam a janela de comunicação entre transmissor e receptor (1,57 m) e, ao lado, um tripé com a luminária Li-Fi Beacon. No computador verifica-se, por meio de um software desenvolvido para essa função (em linguagem C++), a comunicação *Wi-Fi* com o circuito receptor (Raspberry PI 2), a fim de se coletarem as leituras realizadas durante o teste do sistema VLC (a cada 100 ms).

Com a realização destes testes de comunicação (bólido entre 4,5 e 5,0 km/h, devido a limitações do sistema de ajuste de velocidade da correia), pôde-se observar que, devido a limitações do circuito receptor, não foi detectada comunicação por meio da luz com a distância entre transmissor e receptor

estimada originalmente (1,01 m). A partir dessa constatação, aproximou-se a luminária ao receptor gradativamente, até que se estabelecesse uma comunicação efetiva, o que ocorreu a 0,40 m. A justificativa para tal comportamento reside no fato de que quanto maior a distância entre transmissor e receptor, menor a tensão de saída do circuito (variação e 0 a 3,3 V), uma vez que a intensidade luminosa total incidente sobre o fotodiodo diminuía. Como o limite lógico de tensão das entradas e saídas de uso geral (*General Purpose Input-Output* - GPIO) do Raspberry PI 2 é de 2 V, entradas próximas a este valor podem gerar leituras indefinidas. A aproximação do transmissor ao receptor a uma distância inferior à teórica resolveu a questão.

Outra possibilidade seria a utilização de um módulo conversor analógico-digital externo ao Raspberry PI 2.

Figura 40 – Circuito receptor acoplado ao bólido (verso)

Fonte: Autora

Figura 41 – Circuito receptor acoplado ao bólido (frente)

Fonte: Autora

Figura 42 – Configuração do cenário para o teste do sistema VLC proposto

Fonte: Autora

Figura 43 – Bólide em movimento passando em frente à luminária Li-Fi- Beacon

Fonte: Autora

Estabelecida a comunicação, passou-se à coleta de dados (Figura 43) sob diferentes cenários (diferentes ruídos de fundo provocados por outras

fontes luminosas naturais e artificiais) (Figura 44). Cabe ressaltar que os testes com o protótipo foram realizados em um laboratório pré-existente, que não sofreu intervenções (tipo/quantidade/posicionamento de luminárias, anteparos, revestimentos/cores de paredes e teto, etc.) para esta pesquisa. Com o auxílio de um módulo luxímetro acoplado a um equipamento Testo 435 (TESTO, 2016) (

Figura 45), foi possível medir-se a intensidade luminosa junto ao fotodiodo para cada cenário: alinhou-se o fotodiodo com a luminária Li-Fi Beacon, colocando-se o sensor de luminosidade ao lado do fotodiodo, primeiramente com a luminária desligada e, a seguir, com a luminária ligada (Quadro 3 - Diferentes cenários de teste e intensidades luminosas no ambiente e no fotodiodo). Estes valores de intensidade luminosa, permitem a reprodutibilidade do experimento.

Figura 44 – Outras fontes luminosas: janelas ao fundo, lâmpadas fluorescentes e de mercúrio

Fonte: Autora

Figura 45 – Equipamento Testo 435 com módulo luxímetro (à esquerda)

Fonte: autora

Quadro 3 - Diferentes cenários de teste e intensidades luminosas no ambiente e no fotodiodo

Cenário	Intensidade luminosa junto ao fotodiodo (lx) Li-Fi Beacon desligada	Intensidade luminosa junto ao fotodiodo (lx) Li-Fi Beacon ligada
Persianas fechadas e luzes apagadas	12	452
Persianas fechadas e luzes fluorescentes acesas	61	545
Persianas fechadas, luzes fluorescentes e luz de mercúrio acesas	116	672
Persianas abertas, luzes fluorescentes e luz de mercúrio acesas	196	832

Fonte: Autora

2.3 Simulação Computacional

Adotou-se a ferramenta MatLab R2016b® e Simulink® para a simulação da transmissão de dados por meio da luz visível de LED, no contexto aqui descrito.

Utilizou-se como base teórica para a realização da simulação o livro *Optical Wireless Communications – System and Channel Modelling with MatLab* (GHASSEMLOOY et al., 2013), além de estudos que tratam de aplicações da VLC em ambientes externos (KUMAR et al., 2011; KUMAR, 2011; LOURENÇO et al., 2012; BHALERAO et al., 2013; PREMACHANDRA et al., 2014).

Inicialmente deu-se maior atenção à modelagem do canal de transmissão e sua caracterização. A propagação de sinais óticos ao ar livre (FSO) é muito sensível às condições atmosféricas (neblina, chuva, sol) (LEE et al., 2012). É nessa etapa que se tem as maiores perdas de potência e interferência na transmissão do sinal. No entanto, em seus estudos de modelagem, Ghassemlooy et al. (2013) levam em conta estas interferências apenas para canais de comunicação de longa distância, usualmente superiores a centenas de metros, com a utilização de emissores a laser cuidadosamente alinhados com o receptor. Os mesmos autores apontam que em links de visada direta e curta-distância, dispersão multicaminho raramente é um problema a se considerar, e estes canais muitas vezes são modelados como uma atenuação linear e atraso. Desta maneira, considerou-se o modelo *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) como a somatória dos ruídos aos quais o sistema VLC desta proposta está sujeito, ou seja, ruídos gerados por processos aleatórios cuja distribuição é considerada Gaussiana ou Normal.

A utilização direta de *scripts* Matlab para a geração de gráficos e análises leva a resultados que visualmente dificultam a visualização das informações e a entrada dos parâmetros de simulação (Figura 46).

Figura 46 - Exemplo de modelo utilizando o *script* com o gráfico gerado

Fonte: (KAWAMOTO, 2015)

Optou-se pela criação de uma interface gráfica mais amigável utilizando-se o *Graphical User Interface* (GUI) do próprio MATLAB. Tomou-se como base a interface mostrada em (MUHAMMAD et al., 2005), fazendo-se uso do manual fornecido pela própria MathWorks (ZARANEK, 2012) e por Witmann (2008).

Figura 47 - Interface criada com o GUI do MatLab

Fonte: (KAWAMOTO, 2015)

Nessa interface, os dados que caracterizam o ambiente e as condições estudadas são inseridos nos blocos da lateral esquerda e os gráficos resultantes são plotados à direita. Observam-se, na parte superior, os gráficos das diferentes perdas em função da distância emissor-receptor e do comprimento de onda utilizados. Os gráficos da parte inferior são referentes à potência total (potência transmitida menos perdas) em função dos mesmos parâmetros anteriores.

As simulações efetuadas buscaram a modelagem do canal ótico, a avaliação da taxa de erro de *bits* (BER), cálculo da relação sinal/ruído (SNR) observada na transmissão, o que permitiu determinar-se o tamanho do pacote

de dados que pode ser transmitido, e assim, avaliar-se a viabilidade da proposta apresentada.

2.4 Atividades complementares

Realizaram-se outras atividades complementares, necessárias à avaliação dos resultados obtidos com o protótipo e com a simulação.

Efetuaram-se medições de intensidade luminosa em túneis e terminais rodoviários da capital paulista, dois dos possíveis cenários de aplicação do sistema de comunicação aqui proposto. As leituras foram feitas com a utilização do equipamento Testo 435 (

Figura 45 – Equipamento Testo 435), o mesmo utilizado nos testes de laboratório.

No primeiro caso, escolheram-se três túneis por onde circulam ônibus: José Roberto Fanganiello Melhem, Daher Cutait (ou 9 de Julho) e Anhangabaú. Os dois últimos possuem pistas distintas no sentido centro e no sentido bairro, com comprimentos e iluminação também distintos. Exceto pelo túnel Anhangabaú, a iluminação encontra-se em estado precário (falta de manutenção), e não há padronização quanto à tecnologia empregada (LED, vapor metálico, mercúrio, etc.). Realizaram-se medições pela manhã e ao final da tarde/início noite, dentro do período de rodízio municipal em que, segundo a própria CET, há o maior número de veículos em trânsito. Isso foi feito para que se levasse em conta nas medições o eventual acréscimo de ruído de fundo devido aos faróis dos veículos. Apesar do apoio dos agentes de trânsito, nem sempre houve segurança suficiente para a tomada de medições (veículos em alta velocidade e indivíduos suspeitos), identificando-se tais casos com NR (Não Realizado) nas planilhas que se encontram no APÊNDICE D.

No segundo caso, escolheram-se três terminais rodoviários: Terminal Pinheiros, Terminal Lapa e Terminal Barra Funda (Figura 63). Os dois primeiros possuem coberturas mistas que contém elementos translúcidos. Durante o dia, eles fornecem uma contribuição à iluminação ambiente por meio da luz natural (Figura 63). Devido a isso, nestes locais realizaram-se medições no período da manhã e à noite, para que se verificassem as diferenças de

intensidade luminosa devido às várias fontes de luz presentes. Percebe-se que não há padronização em relação à tecnologia de iluminação empregada nestes locais, observando-se lâmpadas fluorescentes (em sua maioria) e de vapor metálico. As medições foram realizadas na parte central dos terminais, evitando-se as áreas perimetrais (entrada e saída dos terminais), onde ainda há a possibilidade de recepção do sinal de GPS (APÊNDICE E).

2.5 Considerações sobre este capítulo

Neste capítulo apresentou-se uma descrição sucinta da aplicação proposta, bem como, as condições de contorno consideradas. Descreveram-se o desenvolvimento do protótipo em escala reduzida e os parâmetros de equivalência com o protótipo em escala real. A seguir, apresentaram-se todas as etapas realizadas no teste de desempenho do protótipo em escala reduzida. Também se descreveram as ferramentas adotadas e os procedimentos realizados na etapa de simulação computacional. Finalmente, descreveram-se as atividades complementares à avaliação dos resultados obtidos com o protótipo e com a simulação, quais sejam, as medições realizadas em túneis e terminais rodoviários da capital paulista.

No capítulo a seguir, apresentar-se-á a análise dos resultados aqui obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se a seguir as análises dos resultados obtidos para o protótipo e para a simulação.

3.1 Protótipo em escala reduzida

As análises relativas ao teste de desempenho do protótipo abrangeram os seguintes aspectos: efetividade da comunicação, taxa de erros de transmissão (*Bit Error Rate* - BER) e tamanho do pacote de dados em função da velocidade do bólido.

3.1.1 Efetividade da comunicação

Comparando-se os valores de intensidade luminosa ambiente (gerada pelo transmissor e outras fontes luminosas) medidos no laboratório com os valores medidos nos túneis, pode-se inferir que seria possível estabelecer-se a comunicação entre luminária pública e receptor no teto do ônibus (empregando-se o mesmo circuito utilizado em laboratório), desde que houvesse uma distância máxima entre transmissor e receptor da ordem de 2,9 m (valor real correspondente aos 0,40 m em laboratório, a partir da equivalência entre protótipos), na parte central dos túneis (cabe ressaltar que no túnel Anhangabaú isso seria factível, uma vez que ele possui 5,0 m de altura (FOLHA DE S. PAULO, 2006) e, portanto, a distância entre transmissor e receptor seria da ordem de 2,0 m). Justifica-se tal conclusão, visto que a intensidade luminosa máxima próxima ao fotodiodo medida no laboratório atingiu 196 lx e os valores médios (média de dez leituras) nos túneis (medidas realizadas a 1,2 m de altura) foram inferiores a esse valor (exceto no túnel José Roberto Fanganiello Melhem). Isso leva a crer que os ruídos de fundo nos túneis seriam menores que os medidos no laboratório e, na prática, causariam menos degradação na comunicação, considerando-se que o receptor estaria mais próximo do transmissor: no teto do ônibus, a 3,0 m, e não a 1,2 m, altura utilizada nas medições. Ao contrário das áreas de entrada e saída dos túneis,

onde há a possibilidade de recepção de sinal de GPS pelos ônibus, pode-se inferir que na região central e sob as condições acima, os ônibus receberiam as coordenadas posicionais pelo sistema VLC aqui proposto (APÊNDICE D).

Fazendo-se um raciocínio análogo em relação às medições realizadas nos terminais rodoviários, pode-se inferir que não seria possível a comunicação entre transmissor e receptor nestes locais, sem que fossem realizados ajustes no sistema aqui proposto. Isso porque, as medições acusaram valores superiores ao medido em laboratório, especialmente durante o dia: valores médios de iluminância de 252 lx (Terminal Barra Funda), 410 lx (Terminal Lapa) e 698 lx (Terminal Pinheiros). Nos terminais Lapa e Pinheiros, com cobertura mista (componentes translúcidos), é nítida a influência da iluminação natural no ambiente. Já nas medições noturnas realizadas nestes locais, observaram-se valores de 16 lx (Terminal Lapa) e 330 lx (Terminal Pinheiros). Isso porque o Terminal Lapa estava muito mal iluminado, com diversas lâmpadas desligadas, enquanto que o Terminal Pinheiros estava muito bem iluminado (Figuras 63). Supondo-se que o Terminal Lapa esteja com a manutenção deficiente, não se pode afirmar que a comunicação poderia ser estabelecida se fosse provida uma iluminação mais adequada ao local, mas nas condições atuais, provavelmente seria possível transmitir-se as coordenadas posicionais aos ônibus no período noturno (APÊNDICE E).

3.1.2 Taxa de erros de transmissão (BER)

Em se tratando da taxa de erro de *bit* (BER), apresentam-se no Quadro 4 os seus valores para cada leitura efetuada no laboratório.

Cabe ressaltar que, a cada leitura, correspondiam 100.000 *bits* recebidos, quando da passagem do bólido pelo trecho correspondente à janela de comunicação e, portanto, a cada cenário, centenas de milhares de *bits*.

Observa-se que, para alguns cenários, realizaram-se menos leituras devido à imprecisão no disparo do software de captura dos dados (a partir do *notebook*), feito manualmente, quando da aproximação do bólido à janela de comunicação. No entanto, dada a similaridade de valores obtidos a cada cenário, o número de leituras não provocou distorções nos resultados finais.

Quadro 4 – Cenários, leituras e os respectivos valores de BER calculados

Persianas fechadas e luzes apagadas		Persianas fechadas e luzes fluorescentes acesas		Persianas fechadas, luzes fluorescentes e luz de mercúrio acesas		Persianas abertas, luzes fluorescentes e luz de mercúrio acesas	
Leitura	BER (%)	Leitura	BER (%)	Leitura	BER (%)	Leitura	BER (%)
1	0,1440	1	0,0710	1	0,5620	1	1,5850
2	0,1080	2	0,0670	2	0,5510	2	1,2470
3	0,1080	3	0,0960	3	0,5840	3	1,6250
4	0,1300	4	0,0820	4	0,5860	4	1,8770
5	0,1160	5	0,1000	5	0,5630	5	1,2160
6	0,1170	6	0,0810	6	0,5650	6	1,0490
7	0,1060	7	0,1030	7	0,6030	7	1,0110
8	0,1330	8	0,0930	8	0,5920	8	1,0530
-	-	-	-	9	0,5830	-	-
-	-	-	-	10	0,5370	-	-
Média	0,1203	Média	0,0866	Média	0,5726	Média	1,3329

Fonte: Autora

Em relação aos valores médios de BER, observa-se uma variação entre 0,0866% a 1,3329%. Encontram-se na literatura várias referências à uma BER máxima de 10^{-6} para comunicação FSO em tempo real (PREMACHANDRA et al., 2014; LOURENÇO et al., 2012; KUMAR, 2011; KITANO et al., 2003). No entanto, ressalta-se a necessidade de se verificarem as reais demandas do usuário do sistema de comunicação em questão e a sua percepção à qualidade do serviço proporcionado, para que se adote ou não um valor limite tido como padrão, que pode impactar em todo o sistema de comunicação, por vezes, desnecessariamente. Na proposta de aplicação desta pesquisa, as informações posicionais não são críticas no que concerne à segurança dos usuários e/ou à manutenção da operação do tipo de sistema de transporte público considerado (ônibus), portanto, pode-se tolerar uma taxa de BER maior que o padrão acima.

Sabe-se que a BER é influenciada por vários fatores, a começar das características do transmissor e do receptor que impactam na potência dos sinais transmitido e recebido. Quando há o alinhamento perfeito entre transmissor e receptor, a BER depende da distância entre eles (a intensidade da luz no receptor é inversamente proporcional ao quadrado da distância) e também da divergência do raio de luz transmitido e da quantidade de luz

coletada pelo receptor (FOV) (CORSINI et al., 2012). Ou seja, poderia avaliar-se o emprego de lentes no transmissor e/ou no receptor, de modo a alterar-se o campo de visão entre eles, visando aperfeiçoar a comunicação na aplicação aqui proposta (consequentemente melhorando os valores de BER).

Conforme exposto no Item 2.2.3, qualquer valor de tensão de saída inferior ao limite lógico do microcontrolador poderia impedir a detecção da modulação. Este fenômeno pode ter contribuído para os valores de BER observados em todos os cenários (superiores à recomendação de 10^{-6}).

É importante salientar-se que, outro dos elementos que pode ter levado a essas taxas de BER, foi a utilização do módulo Raspberry PI 2 que, como se constatou ao final, operou muito próximo ao seu limite de desempenho nesta tarefa, o que comprometeu algumas leituras. Maiores considerações sobre esta inadequação encontram-se no item 4.3.

3.1.3 Tamanho do pacote de dados em função da velocidade do bôlido

Com relação ao volume de dados a ser transmitido pelo sistema proposto, pode-se considerar a transmissão de um par de coordenadas georreferenciadas, por exemplo:

Latitude: -23.533773;

Longitude: -46.625290

De acordo com o padrão IEEE 754-2008 para representação de números binários com ponto flutuante (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2008), obter-se-ia como representação:

11000001101111000100010100101011

11000010001110101000000001001100

Portanto, seriam necessários 32 bits ou 4 bytes por coordenada, totalizando 8 bytes. Considerando-se que, para modulação OOK, a codificação Manchester, conforme a Norma IEEE 802.15.7, no modo PHY I, pode, na pior

condição (modulação Manchester, clock ótico de 200 kHz), atingir uma taxa de transmissão de 11,67 kb/s (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2011), para um ônibus a 60 km/h, conforme apontado anteriormente, teríamos uma janela de comunicação de 1,26 s, ou seja, poderiam ser transmitidos 14,7 kb ou 1,83 kB, volume bastante superior ao necessário. Pode-se supor que este sistema poderia agregar outras informações úteis no contexto de ITS, por exemplo condições de tráfego ou adversidades em geral (relacionadas ao clima, ao tráfego, etc.). Vale notar que embora o conteúdo do pacote de dados não se restrinja ao *payload*³ de 8 bytes, a margem existente corrobora a conclusão acima.

3.2 Simulação computacional

As simulações, realizadas com os softwares Matlab[®] (MATHWORKS, 2014a) e SimuLink[®] (MATHWORKS, 2014b), abrangeram os seguintes aspectos: modelagem do canal óptico de comunicação, avaliação da taxa de erros de transmissão, avaliação da relação sinal/ruído e avaliação do tamanho do pacote de dados transmitido em função da velocidade do ônibus sob a luminária e verificação da adequação da solução proposta.

3.2.1 Modelagem do Canal

Adotou-se como modelo de canal o de visada direta, ou *Line of Sight* (LOS), sem se levar em conta reflexões do sinal, já que, segundo Ghassemloooy, Popoola e Rajbhandari (2013, p.83), em curtas distâncias raramente a dispersão multicaminhos é um problema a ser considerado. Para a luminária, considerou-se o modelo de emissão de Lambert⁴.

³ A parte útil dos dados transmitidos, excluídos cabeçalhos e metadados.

⁴ No modelo de emissão de Lambert, a intensidade da luz emitida por uma fonte varia com o cosseno do ângulo da emissão com respeito à normal à superfície iluminada (NGUYEN et al., 2010).

Figura 48 - Modelo de emissão de Lambert

Fonte: Adaptado de (GHASSEMLOOY et al., 2013)

Considerada a geometria exibida na Figura 48, segundo os mesmos autores, a iluminância é distribuída segundo:

$$S(\phi) = P_t \frac{(m_1 + 1)}{2\pi} \cos^{m_1}(\phi) \quad (1)$$

onde P_t representa a fluxo luminoso e m_1 é o número de ordem de Lambert, que expressa a capacidade de concentração de iluminação da fonte luminosa. Este número relaciona-se com o ângulo de meia-potência da fonte, $\Phi_{1/2}$ por:

$$m_1 = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})} \quad (2)$$

No fotodetector, considera-se sua área real ativa A_r coletando a irradiação incidente segundo um ângulo ψ . Sua área efetiva é dada por:

$$A_{eff}(\psi) = A_r \cos \psi \quad \text{para } 0 \leq \psi \leq \pi / 2 \quad (4)$$

Finalmente, o ganho de um receptor, considerando-se uma fonte luminosa de Lambert, localizada a uma distância d e um ângulo ϕ do transmissor pode aproximar-se por:

$$H_{los}(0) = \frac{A_r(m_1 + 1)}{2\pi d^2} \cos^{m_1}(\phi) \cos(\psi) \quad \text{para } 0 \leq \psi \leq \pi / 2 \quad (5)$$

A potência recebida é dada por:

$$P_{r-los} = H_{los}(0)P_t \quad (6)$$

O gráfico exibido na Figura 49 mostra a distribuição da irradiância recebida ao longo de uma faixa exclusiva para ônibus, ao nível do piso,

considerados os seguintes parâmetros:

- largura da faixa: 3,5 m
- comprimento: 90,0 m (trecho correspondente a 3 luminárias consecutivas)
- semi-ângulo de meia-potência, $\Phi_{1/2} = 38,7^\circ$
- luminárias: 3
- distância entre luminárias: 30,0 m
- altura da luminária: 10,0 m
- fluxo luminoso: 13.841 lm

Figura 49 - Iluminância ao longo da via (lux)

Fonte: Autora

O gráfico corresponde à geometria apresentada na Figura 50.

Figura 50 - Montagem da luminária junto à via pública

Fonte: (ILUMATIC S/A, 2015)

3.2.2 Taxa de erros de transmissão (BER)

Para a avaliação da taxa de erros de transmissão, efetuou-se a simulação com o uso do software Simulink.

Inicialmente, criou-se um bloco para representar a intensidade de luz transmitida pela luminária Maestra 150, já modulada segundo a codificação Manchester. Apresenta-se na Figura 51 o modelo utilizado.

Figura 51 - Diagrama de blocos do simulador da luminária

Fonte: Autora

O bloco *Bernoulli Binary Generator* produz uma sequência aleatória de zeros e uns e é utilizado para simular os dados a serem transmitidos. O bloco *Clock* produz uma onda quadrada com uma frequência igual ao dobro da frequência de recepção dos *bits* a serem transmitidos. Desta forma, as saídas de ambos os blocos são introduzidas em uma porta NXOR que efetua a codificação Manchester. O bloco *Scope*, cuja saída encontra-se representada na Figura 52, permite a visualização dos três sinais (osciloscópio). O gráfico superior exibe o sinal aleatório, o intermediário apresenta o *clock* gerado, com frequência igual ao dobro da introdução de novos *bits* pelo gerador aleatório, para viabilizar a codificação Manchester. Na parte inferior, observa-se o sinal corretamente modulado.

Para a simulação de toda a transmissão, incluindo-se sua recepção e cálculo da taxa de erro, utilizou-se o bloco exibido na Figura 53.

Figura 52 - Sinais gerados pelo módulo "Luminária"

Fonte: Autora

Observa-se que o módulo "Luminária" se encontra inserido neste modelo. O bloco AWGN simula um canal de transmissão sujeito ao ruído

branco, tendo como parâmetro o valor da relação sinal/ruído. Para a recuperação do sinal e filtragem do ruído empregaram-se os módulos *Switch*, *Constante 0* e *Constante 1*.

O funcionamento é simples: quando o sinal de entrada apresenta valor superior a 0,5 o sinal de saída é levado ao valor 1. Caso contrário, é levado ao valor 0.

O módulo *Cálculo de Taxa de Erro* faz parte do Simulink e compara os sinais de entrada e saída, calculando a taxa de erro obtida.

O módulo *Display*, apresentado na parte inferior direita da figura, exibe três valores: o superior corresponde à taxa de erros medida; o intermediário, o número de erros encontrado; o inferior, o total de amostras analisadas.

Os valores exibidos na Figura 53 foram obtidos durante uma das diversas simulações efetuadas. Novamente, utilizou-se o módulo *Scope* para visualização dos sinais obtidos.

Figura 53 - Bloco principal da simulação

Fonte: Autora

Observa-se na Figura 54 os valores obtidos em uma outra simulação. Nela, os três gráficos superiores são análogos aos da Figura 52. O quarto gráfico representa o sinal recebido afetado pelo ruído branco. O quinto gráfico exibe o sinal recuperado, idealmente idêntico ao do terceiro gráfico, o que ocorre no exemplo exibido.

Figura 54 - Sinais do bloco de simulação

Fonte: Autora

3.2.3 Avaliação da relação sinal/ruído (SNR)

O principal objetivo da simulação realizada foi o de se avaliar a viabilidade da solução proposta. Para isto, buscou-se verificar que a taxa de erro obtida na transmissão e recepção da informação luminosa fosse igual ou inferior a 10^{-6} , valor frequentemente sugerido na literatura (KUMAR, 2011).

Efetuar-se diversas simulações com o bloco apresentado na Figura 53, variando-se o parâmetro sinal/ruído atribuído ao bloco AWGN. Para cada simulação, geraram-se 100.000 amostras de sinal e anotou-se o valor da taxa de erro obtida. Os resultados obtidos levaram à construção do gráfico exibido na Figura 55.

Figura 55 - Taxa de Erro (BER) X Relação sinal/ruído (SNR)

Fonte: Autora

Observa-se que o valor da relação sinal/ruído correspondente à taxa de erro igual a 10^{-6} é da ordem de 41,8 dB, o que permite a transmissão de blocos de dados adequados, conforme exposto no item seguinte.

3.2.4 Tamanho do pacote de dados em função da velocidade do ônibus

Segundo Ghassemloy et al (2013, p.80), o valor da relação sinal/ruído (SNR) em *links* óticos é dado pela Equação 7:

$$SNR = \frac{R^2 H^2(0) P^2}{R_b N_0} \quad (7)$$

onde:

- R: área do receptor ($7,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$)
- H(0): ganho do canal
- P: potência ótica transmitida

- R_b : taxa de transmissão de bits (*bit rate*), considerada 11.670 b/s
- N_0 : relação de densidade espectral de potência de ruído

O ganho do canal é dado pela Equação 8 (Ghassemlooy et al, 2013, p.82-83):

$$H(0) = \frac{(m+1)\cos(\varphi)^{m+1}}{2\pi D^2} \quad (8)$$

onde:

- m : número de ordem de Lambert (Eq. 2)
- D : distância da fonte luminosa ao receptor ótico
- φ : ângulo de incidência da luz sobre o receptor ótico

Finalmente, a relação de densidade espectral de potência de ruído é dada pela Equação 9 (Ghassemlooy et al, 2013, p.99):

$$N_0 = 2 \cdot q \cdot i_b \quad (9)$$

onde:

- q : carga de um elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ coulomb)
- i_b : corrente residual no receptor (202×10^{-6} A)

Desenvolveu-se um *script* Matlab para o cálculo do valor de SNR ao longo de um plano paralelo ao piso e situado 3,0 m acima deste (plano equivalente à altura do teto de um ônibus e, portanto, altura do receptor considerado). O valor de SNR varia à medida que o receptor se aproxima da fonte luminosa, atingindo seu valor máximo quando o ônibus se encontra perfeitamente alinhado com a luminária, decrescendo à medida que ocorre o afastamento.

Observa-se na Figura 56 a variação desta relação. Considerou-se neste gráfico apenas a comunicação de uma luminária, pois, a princípio, não é necessário efetuar-se a leitura de posição a cada luminária.

Figura 56 - Variação de SNR ao longo do plano à altura do teto do ônibus

Fonte: Autora

Para facilitar a visualização e os cálculos, apresenta-se outro gráfico correspondente à projeção das linhas de mesmo valor de SNR no plano situado à altura do teto do ônibus (Figura 57).

Conforme exposto em 3.2.3, a um valor de aproximadamente 41,8 dB corresponde uma transmissão com taxa de erro aproximadamente igual a 10^{-6} , valor apontado na literatura como máximo para uma transmissão confiável. A Figura 57 mostra que este valor ocorre quando o ônibus se encontra aproximadamente a 20,0 m da luminária, aumentando até um valor superior a 90 dB (quando o ônibus cruza a vertical da luminária ou, alinhamento máximo entre transmissor e receptor) e voltando a decrescer quando, 20,0 m após, a SNR atinge novamente o valor aproximado de 40 dB. Isto significa que o ônibus pode receber dados atendendo os requisitos apontados em uma faixa de cerca de 40,0 m. Considerando-se que a velocidade máxima de um ônibus, quando trafegando em faixas exclusivas, é de 60 km/h, o tempo para percorrer este trecho é de 2,4 s. Com uma taxa de transmissão de 11,67 kb/s, pior taxa de transmissão definida no modo PHY I da norma IEEE.802.15.7, ter-se-ia um total de 28.008 bits transmitidos, ou 3,5 kB.

Embora baixo, este volume é consideravelmente superior ao

necessário para transmitir as informações posicionais do veículo, restando ainda espaço para a transmissão de outras informações de interesse em ITS.

Figura 57 - Valores de SNR no plano situado à altura do ônibus

Fonte: Autora

Com base em todas essas constatações, verifica-se que os resultados obtidos corroboraram a viabilidade da proposta apresentada neste trabalho, admitindo-se que maiores avaliações e aprimoramentos seriam bem-vindos em pesquisas futuras.

3.3 Considerações sobre este capítulo

Neste capítulo, primeiramente analisaram-se os resultados obtidos com o protótipo sob os aspectos efetividade da comunicação, taxa de erros de transmissão (*Bit Error Rate* - BER) e tamanho do pacote de dados. A seguir, analisaram-se os resultados obtidos na simulação que englobaram os aspectos modelagem do canal óptico de comunicação, avaliação da taxa de erros de transmissão, avaliação da relação sinal/ruído e avaliação do tamanho do

pacote de dados transmitido em função da velocidade do ônibus sob a luminária. Finalmente, constatou-se a viabilidade de transmissão de pacotes de dados contendo informações posicionais aos ônibus e, portanto, a viabilidade da proposta apresentada neste trabalho.

No próximo capítulo, apresentar-se-ão as conclusões advindas deste trabalho.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo propor e avaliar um sistema de comunicação por luz visível (VLC) para a transmissão de posições de localização. A aplicabilidade desse sistema se destaca em locais onde não seja possível uma recepção contínua de sinais do GPS. Utilizou-se como cenário para validação da proposta as luminárias públicas a LED e os ônibus que trafegam em faixas exclusivas, que necessitam receber continuamente informações sobre a sua posição para prover subsídios essenciais aos gestores responsáveis pelo dimensionamento e gestão da frota.

Para tal, desenvolveu-se um protótipo em escala reduzida para fins de testes de desempenho em laboratório, e realizaram-se várias simulações computacionais.

4.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Apresenta-se a seguir a avaliação dos resultados obtidos, tanto nos testes com o protótipo quanto nas simulações realizadas.

4.1.1 Testes com o protótipo

Os testes com o protótipo permitiram que se avaliassem a efetividade da comunicação entre bólido em movimento e luminária, a taxa de erros de transmissão e o tamanho dos pacotes de dados em função da velocidade do bólido.

No que concerne à efetividade da comunicação, observou-se que, sob uma distância máxima entre transmissor e receptor de 0,40 m (equivalente a 2,90 m em escala real), seria possível estabelecer-se uma comunicação sob vários cenários distintos (diferentes ruídos de fundo). Conforme as condições observadas em três túneis da capital paulista, concluiu-se que seria possível a transmissão das coordenadas posicionais nestes locais, utilizando-se o sistema aqui proposto. Já em relação aos três terminais rodoviários avaliados, em apenas uma condição (medição noturna) e em um único terminal (Terminal

Lapa), observou-se uma condição mais favorável à comunicação.

Com relação à BER, obtiveram-se taxas superiores à recomendação de 10^{-6} observada na literatura para comunicação FSO em tempo real (PREMACHANDRA et al., 2014; LOURENÇO et al., 2012; KUMAR, 2011; KITANO et al., 2003): valores de 0,0866% a 1,3329%. No entanto, dada a não criticidade da aplicação proposta, poder-se-ia operar com estes valores, sem prejuízo da segurança dos usuários envolvidos e/ou da operação do transporte público em questão.

Os tamanhos dos pacotes de dados transmitidos mostraram-se consideravelmente maiores que aqueles necessários para transmitir coordenadas georreferenciadas para um ônibus a 60 km/h (1,83 kB x 8 bytes, respectivamente) podendo, teoricamente, incorporar e transmitir informações adicionais de interesse no contexto de ITS.

Portanto, o conjunto de resultados obtidos com o protótipo aponta para a viabilidade técnica dessa proposta.

4.1.2 Simulações computacionais

As etapas da simulação englobaram a modelagem do canal óptico de comunicação, as avaliações da taxa de erro de transmissão, da relação sinal/ruído e do tamanho dos pacotes de dados transmitidos em função da velocidade do ônibus.

A modelagem do canal ótico, com base no modelo de visada direta (*Line of Sight* - LOS), permitiu que se visualizassem os valores de iluminância ao longo da via, para o cenário proposto.

Utilizou-se a ferramenta Simulink para a construção dos diagramas de blocos que permitiram a avaliação da BER. Construíram-se os blocos correspondentes ao transmissor (luminária pública Maestra), ao receptor e ao sistema de comunicação.

Realizaram-se várias simulações variando-se a relação sinal/ruído (SNR), considerando-se um canal sujeito a ruído branco gaussiano. O cálculo da BER para cada situação foi realizado pelo módulo específico que integra o Simulink. A partir dos valores obtidos de BER e SNR, construiu-se o gráfico

que os relaciona, determinando-se o valor de SNR para a BER de 10^{-6} recomendado na literatura (PREMACHANDRA et al., 2014; LOURENÇO et al., 2012; KUMAR, 2011; KITANO et al., 2003) (cerca de 41,8 dB).

A fim de se avaliar o comportamento de SNR na altura do receptor considerado (sobre o teto do ônibus, a 3,00 m do solo), desenvolveu-se um *script* Matlab que permitiu visualizar-se a sua variação em um plano neste nível, no cenário estipulado.

Concluiu-se que, à velocidade de 60 km/h, o ônibus conseguiria receber dados de uma luminária por um trecho de cerca de 40 m de comprimento (20 m anteriores e 20 m posteriores à luminária), mesmo sob a pior taxa de transmissão apontada pela norma IEEE.802.15.7, 11,67 kb/s. Neste caso, o pacote de dados transmitido seria de cerca 1,83 kB, ainda amplamente superior ao *payload* de 8 bytes, conforme já explicado no item 3.1.3.

É importante salientar-se que um dos elementos que pode ter contribuído para essas taxas elevadas de erro de *bit*, tenha sido o uso do sistema operacional Linux no módulo Raspberry PI 2, que por sua característica de suportar multitarefas, pode prejudicar o desempenho de aplicações em tempo real.

Os resultados obtidos na simulação computacional também apontam para a viabilidade de transmissão de pacotes de dados contendo informações posicionais aos ônibus e, portanto, do sistema VLC aqui proposto.

Os resultados obtidos comprovam a hipótese assumida nessa pesquisa: a rede de iluminação pública urbana poderia ser também uma rede sem fio de comunicação por luz visível, capaz de transmitir coordenadas posicionais precisas aos ônibus em locais estratégicos, em locais não favoráveis à recepção de sinais do GPS, em complemento a essa tecnologia.

4.2 Contribuições

Considera-se que os resultados desta pesquisa contribuem para com as áreas envolvidas, como segue.

4.2.1 Patente

A originalidade desta pesquisa foi comprovada pela patente requerida, que nela se baseia, intitulada **Sistema de Correção Diferencial GPS/GNSS por Luz para o Posicionamento de Veículos e Processo para Correção Diferencial de Posicionamento de Veículos** (MARÈ et al., 2016), conforme discriminada no APÊNDICE A3.

Uma vez utilizada em nível comercial, ela poderá contribuir para com inúmeras aplicações em ITS que dependam do posicionamento preciso de veículos.

4.2.2 Pesquisas em VLC nos contextos de ITS e *Internet of Vehicles*

A revisão do estado da arte feita até a conclusão deste trabalho, não apontou pesquisas que analisassem um modelo de comunicação como o proposto, entre luminárias públicas e ônibus, enfatizando-se, neste contexto, a transmissão de dados de posicionamento essenciais aos sistemas de rastreamento e gestão integrada do transporte público.

Essa pesquisa pode contribuir para com outros estudos que venham a surgir nessa linha, ou mesmo, de forma mais ampla, na área de Internet das Coisas conhecida como Internet dos Veículos (*Internet of Vehicles* – IoV). IoV se refere aos sistemas de comunicação dinâmica entre veículos e redes públicas, baseadas nas interações entre veículos (V2V), veículos e infraestrutura (V2I, I2V), veículos e pessoas (*Vehicle-to-Human* - V2H) e veículos e sensores (*Vehicle-to-Sensor* - V2S) (YANG et al., 2014; ZHANG e XI, 2016; CONTRERAS et al., 2017; LU et al., 2014). A VLC pode ser vista como uma das tecnologias habilitadoras do contexto de IoV (RAY, 2016; LAKSHMIPRABA et al., 2016).

4.2.3 Sistemas de comunicação sem fio

Com relação aos sistemas de comunicação sem fio, cada vez mais demandados em todo o mundo, aponta-se aqui a VLC como uma alternativa

viável em vários contextos. Essa alternativa pode ser especialmente importante nos grandes centros urbanos, onde a comunicação por radiofrequência é utilizada maciçamente, levando cada vez mais a interferências.

4.2.4 Aplicações em ITS e IoV

Com relação à aplicação em ITS, o sistema proposto e avaliado nessa pesquisa terá, potencialmente, aplicação em todas as modalidades de ônibus utilizados (e, portanto, em todas as linhas), sejam os veículos que transitam livremente pelas faixas, sejam aqueles que transitam em faixas exclusivas, em corredores ou os ônibus do tipo *Bus Rapid Transit* (BRT), efetuando-se os devidos ajustes do sistema em cada cenário.

Imagina-se que o investimento necessário à adoção deste sistema seja otimizado, uma vez que não será necessária a sua implementação em todas as luminárias públicas, mas sim, em locais estratégicos, visando-se a suprir as obstruções do sinal do GPS. Em se tratando de terminais de ônibus (áreas onde as linhas têm seu ponto inicial ou final), supondo que todos sejam cobertos e, portanto, apresentem dificuldades na recepção dos sinais do GPS, só em São Paulo 28 terminais municipais e um intermunicipal poderiam ser beneficiados pelo sistema (SP-TRANS – SÃO PAULO TRANSPORTE, 2015). Há também os túneis e as demais áreas urbanas sem recepção de GPS, facilmente identificáveis pelas próprias concessionárias, que já utilizam receptores do GPS em seus veículos para a gestão das frotas.

Adicionalmente e conforme mencionado no item 4.2.2, o sistema aqui proposto pode contribuir para outras aplicações no contexto de IoV, não se limitando ao transporte público, mas à transmissão de coordenadas posicionais para fins de rastreamento de outros veículos (frotas em geral).

4.2.5 Cidades inteligentes

As contribuições no contexto de cidades inteligentes também podem ser relevantes, a partir do compartilhamento da infraestrutura de iluminação pública com funcionalidades em ITS e IoV, além de outras que vem sendo

propostas na literatura, conforme exposto anteriormente, por meio da incorporação de dispositivos diversos aos postes (sensores, câmeras, etc.).

Ainda no que concerne ao investimento necessário, pode-se inferir que seja possível recuperá-lo na forma de locação de banda de luz a outras empresas, interessadas na veiculação de informações por este canal de comunicação. Isso porque, constatou-se que há espaço para um volume de dados maior que o necessário exclusivamente para o envio de coordenadas posicionais.

4.2.6 Testes em laboratório

O ambiente de testes em laboratório pode ser considerado como uma contribuição, pois permitirá que novos aspectos relativos à comunicação por luz visível entre veículos e infraestrutura sejam avaliados em pesquisas futuras.

4.2.7 Simulações computacionais

Ao longo do desenvolvimento desta atividade, foram desenvolvidos programas em linguagem nativa do MatLab, que viabilizaram verificar os vários parâmetros de comunicação entre transmissor e receptor, no cenário pré-definido. Estes programas poderão ser utilizados por outros pesquisadores que tenham necessidades ou objetivos correlatos aos dessa pesquisa e que se utilizem das mesmas ferramentas aqui utilizadas para a simulação computacional.

4.3 Dificuldades encontradas

Inúmeras dificuldades foram encontradas ao longo do desenvolvimento do trabalho, por envolver conhecimentos de diversas áreas, além das questões técnicas e operacionais de várias naturezas para a realização dos experimentos. Em todos os casos buscou-se a superação das mesmas, por meio de literatura pertinente e da consulta a outros profissionais com conhecimento relevante em áreas chave a esta pesquisa (desenvolvimento de

hardware e firmware, software, ótica, redes sem fio, Sistemas Inteligentes de Transporte, entre outras).

A etapa de desenvolvimento e operação do protótipo demandou um tempo maior que o previsto na compreensão do comportamento do sistema VLC. Já no estágio final da pesquisa, constatou-se a inadequação do módulo Raspberry PI 2 para a aplicação proposta do ponto de vista da velocidade de processamento. No entanto, como esse experimento teve o caráter exploratório e não correspondeu a uma parte essencial do trabalho, não houve comprometimento para a pesquisa e respectivos resultados e conclusões. Por outro lado, os requisitos de desempenho mínimo observados durante os ensaios exploratórios poderão ser utilizados em estudos futuros.

4.4 Aprimoramentos e pesquisas futuras

Sugerem-se a seguir alguns temas para aprimoramentos relativos a essa pesquisa e para pesquisas futuras correlatas.

4.4.1 Circuitos digitais dedicados

Sugere-se que sejam projetados e desenvolvidos circuitos digitais dedicados à implementação do protótipo de comunicação VLC, o que traria resultados técnicos superiores aos aqui obtidos. Para tal, a busca e a utilização de microcontroladores mais adequados à aplicação proposta, tanto do ponto de vista de custo (escala) como de robustez, é essencial.

4.4.2 Conjuntos receptores

A pesquisa e o desenvolvimento de conjuntos receptores capazes de operar adequadamente, a despeito de intempéries, sujeira, lavagem dos ônibus e outros fatores inerentes à operação do transporte público, apresentam-se como temas relevantes de investigação.

4.4.3 Mensagens diversas

Neste trabalho verificou-se o atendimento ao requisito de transmissão de mensagens contendo apenas informação posicional dos ônibus. Um aprofundamento deste estudo buscando caracterizar-se o volume máximo de dados passíveis de transmissão durante a passagem do veículo sob a luminária, em diversas velocidades, permitiria que se caracterizasse, com maior precisão, a funcionalidade de aplicativos baseados nesta tecnologia. Neste sentido, já que os ônibus podem transitar em velocidades distintas, a proposta de hierarquias de mensagens a serem transmitidas, bem como, de formatos para seus conteúdos, é essencial para o desenvolvimento destes aplicativos.

4.4.4 Protótipo em escala real

Sugere-se o desenvolvimento e a avaliação de um protótipo em escala real, utilizando-se uma luminária pública (transmissor) e um ônibus em movimento (receptor), em uma região de recepção de GPS reconhecidamente comprometida (*canyon*), com ônibus em movimento. Este estudo poderia ser conduzido em um local ao ar livre, para que o sistema de comunicação pudesse ser avaliado sob a luz do sol e intempéries, poeira em suspensão, fumaça, e com dimerização do LED (nível mínimo de acendimento necessário para a efetividade da comunicação).

4.4.5 Sistema de comunicação *full duplex*

Com o intuito de ampliar-se a gama de troca de informações úteis ao contexto de ITS, além de agregar-se funcionalidade às luminárias públicas com a recepção de informações, poder-se-ia avaliar de um sistema de comunicação *full duplex* (*Infrastructure-to-Vehicle-to-Infrastructure* – Infraestrutura para Veículo para Infraestrutura – *I2V2I*). Este poderia ser desenvolvido dotando-se o teto dos ônibus de pequenos transmissores direcionais, ou seja, incorporando-se transmissores VLC aos ônibus, bem como, receptores óticos

nas luminárias. Dada a tendência de utilização de redes de iluminação pública "inteligentes", as luminárias poderiam estar conectadas ao CCO, o que permitiria uma atuação complementar aos sistemas de telefonia celular, no que concerne à transmissão de dados para ele, visto que há inúmeras áreas de sombra no ambiente urbano que dificultam a sua comunicação com os ônibus, causando um atraso na recepção de informações posicionais (dentre outras).

4.4.6 Sistema de comunicação V2V

Em relação à avaliação de um sistema de comunicação entre os ônibus (V2V), imagina-se que as condições de contorno adotadas neste estudo sejam bastante favoráveis, visto que os ônibus devem circular primordialmente nas faixas exclusivas mantendo, portanto, condições mais adequadas à visada direta (alinhamento dos veículos) entre transmissor (lanternas traseiras e/ou painéis de mensagens variáveis instalados no vidro traseiro dos veículos) e receptor embarcado (nas lanternas dianteiras e/ou nos painéis de mensagens variáveis instalados no vidro dianteiro dos veículos) (Figura 58).

Figura 58 – Painel a LED para mensagens variáveis (itinerário eletrônico)

Fonte: (MOBITEC BRASIL, 2015)

4.4.7 Simulações computacionais

Sugerem-se a simulação da comunicação por luz visível entre veículos (V2V) e entre veículos e infraestrutura (I2V2I) com as seguintes variações:

- Incorporando-se na simulação do canal outros elementos que provocam ruídos na VLC como material particulado, fumaça, chuva e

neblina, presentes inclusive em grandes centros urbanos.

- Aplicando-se filtros óticos distintos, capazes de lidar com outras fontes de luz, especialmente o sol.
- Utilizando-se LEDs como transmissores e receptores.

4.4.8 Receptores óticos baseados em imagem

Conforme apresentado no texto, há estudos em VLC no contexto de ITS que avaliam o desempenho de receptores óticos baseados em imagem (câmeras). Sugere-se que se prossiga na investigação deste tema, levando-se em conta as dimensões destes dispositivos (acompanhando-se a tendência à miniaturização das câmeras, à semelhança das utilizadas em *smartphones*), o seu desempenho técnico e custo, para eventual incorporação em escala na cadeia automotiva.

4.4.9 Segurança da informação

Dadas as possibilidades de aplicação de VLC no contexto de IoV e ITS, sugere-se que se realizem pesquisas relativas à segurança da informação e seus impactos no contexto proposto, verificando-se e propondo-se medidas eficazes na mitigação de possíveis ameaças.

4.4.10 Posicionamento em ambientes internos

O sistema aqui proposto poderia sofrer adaptações para propostas distintas de localização precisa de ativos, em locais onde não seja possível a utilização de GPS: em logística, veículos de movimentação de cargas como empilhadeiras, ou mesmo robôs móveis; em hospitais, equipamentos móveis diversos. Nas sugestões logísticas, o posicionamento preciso poderia ser utilizado para orientar deslocamentos programados dos veículos em questão (veículos autônomos).

4.5 Considerações finais

Desde os primeiros contatos da autora com o tema “Comunicação por Luz Visível”, em 2014, por meio do vídeo do Prof. Harald Haas (professor na Universidade de Edimburgo e autor do termo “LiFi”) em apresentação no evento TED Global de 2011 (HAAS, 2011), desenvolveu-se um fascínio e um forte interesse por sua investigação. À medida do desenvolvimento da revisão da literatura, intuiu-se a sua relevância nas comunicações do futuro.

Acompanhou-se a evolução da tecnologia por meio de várias fontes, além da revisão bibliográfica, como conversas com pesquisadores internacionais em eventos acadêmicos, profissionais das áreas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação de grandes empresas de telecomunicações e, mais recentemente, a criação do congresso “Global LiFi Congress” (com sua primeira edição em fevereiro de 2018), apoiado pelo IEEE (GLOBAL LIFI CONGRESS, 2017). Este evento terá em paralelo rodadas de negócio e 30 expositores, o que denota o crescimento do número de empresas ofertando soluções baseadas em VLC.

Uma das visões da autora em certo ponto do seu trabalho foi o provável desenvolvimento da utilização das câmeras de celulares como receptores de informações, o que de fato vem acontecendo, conforme apresentado neste trabalho.

Como resultado de pesquisas constantes, recentemente encontrou-se o documento “An Overview on High Speed Optical Wireless/Light Communications” (de julho de 2017), disponível no site do IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee, que dissecou os temas do título em seus 64 slides (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017a). Além das impressionantes informações do mercado de *Light Communications* (LC), que apontam para mais de US\$ 75,5 bilhões até 2023 em toda a cadeia de valor, com mais de 550 milhões de lâmpadas (LED) instaladas anualmente, as informações técnicas que mais se destacaram foram:

- O grupo 802.15.7m (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2014) está voltado, principalmente,

a desenvolver o padrão 802.15.7 existente (comunicações por luz visível), incluindo comunicações por câmera ótica (*Optical Camera Communications* - OCC) e comunicações por fotodiodo de baixa taxa de transmissão.

- O grupo 802.15.13 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017c) está voltado à aplicação de OWC para redes sem fio especializadas, de alta velocidade, para implantação em fábricas e outros cenários industriais.
- O grupo 802.15 IG VAT (*Interest Group - Vehicular Assistive Technology*) está voltado à análise da viabilidade de se utilizar OWC em aplicações V2X (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017b).
- O grupo 802.11 LC TIG (*Light Communications - Topic Interest Group*) (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017e), parte integrante do grupo de trabalho IEEE 802.11, está analisando a viabilidade de se incluir OWC como parte da 802.11 (comunicações sem fio), visando a atender casos de uso do mercado em grande escala, como um complemento à radiofrequência.

Paralelo a isso, planeja-se a publicação de uma nova versão da norma IEEE 802.15.7 para novembro de 2018 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017b).

Ou seja, esse conjunto de informações indica o interesse crescente por essa tecnologia, dado que se apresenta como uma das habilitadoras de inúmeras aplicações, em diversos contextos.

Portanto, constatou-se que a linha de pesquisa adotada em 2014 foi acertada, mostrando-se em fase de maturação para o mercado e com grande potencial de pesquisa e desenvolvimento, gerando novos negócios e inovação.

Acredita-se que este trabalho tenha dado contribuições relevantes, e espera-se que ele possa despertar o interesse e estimular o desejo de outros pesquisadores em avançar e aprofundar os caminhos percorridos neste trabalho, verdadeiros “Caminhos de Luz”!

REFERÊNCIAS

ACUITY BRANDS. **Indoor Positioning Systems**. Informações sobre produtos para localização interna por VLC. Disponível em: <<http://www.acuitybrands.com/solutions/internet-of-things/indoor-positioning-systems>>. Acesso em: 26 jun. 2015.

AICT. **Visible light communication**. In: ADVANCED INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS, 10. Cambridge, **Proceedings...** 2014, Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 264 p.

ALBUQUERQUE, F. **Brasil Terá 95,2 Milhões de Veículos em 2034, segundo estudo da Anfavea**. Brasília: EBC - Agência Brasil, 2014. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2014-11/brasil-tera-952-milhoes-de-veiculos-em-2034-segundo-estudo-da-anfavea>>. Acesso em: 07 nov. 2014.

AMSTERDAN GROUP. **Amsterdam Group**. Apresenta as atividades da aliança. Disponível em: <<http://www.amsterdamgroup.eu>>. Acesso em: 05 dez. 2014.

ANAND, M.; KUMAR, N. New, effective and efficient dimming and modulation technique for visible light communication. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING), 2014, IEEE 79th. 2014, Seoul. **Proceedings...** Seoul: 2014. 4 p.

ARAI, S. et al. Multiple led arrays acquisition for image-sensor-based I2V-VLC using block matching. In: CONSUMER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (CCNC), 2014, IEEE 11th. 2014, Las Vegas. **Proceedings...** Las Vegas: 2014. p. 605-610.

ARMSTRONG, J; SEKERCIOGLU, Y; NEILD, A. Visible light positioning: a roadmap for international standardization. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 12, p. 68-73, 2013.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14813-1**: Sistemas Inteligentes de Transporte — Arquitetura(s) de Modelo de Referência para o Setor de ITS. Parte 1: Domínios de Serviço, Grupos de Serviço e Serviços de ITS. São Paulo, 2011. 32 p.

———. **NBR 5101:2012** - Iluminação Pública — Procedimento. São Paulo, 2012. 35 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (NTU). **Revista NTU Urbano**. Brasília: NTU, 2015. Disponível em: <<http://www.ntu.org.br>>. Acesso em: 10 jul. 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. **Série Cadernos Técnicos** - Sistemas Inteligentes de Transportes. São Paulo: 2012. v. 8, 165 p.

AUSTROADS. **Austroads Annual Report 2013-14**. Sydney: Austroads, 2015. Disponível em: <<http://www.austroads.com.au/about-austroads/annual-reports>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

AZEVEDO, I. L.; MORGAN, M. G.; MORGAN, F. The Transition to Solid-State Lighting: White light emitting diodes offer efficient use of electrical energy and lower lighting costs as well as reduced atmospheric pollution. **PROCEEDINGS OF THE IEEE**, 2009, v. 97, n. 3, p. 481-510.

BAI, B. et al. Visible light positioning based on led traffic light and photodiode. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC FALL), 2011, IEEE. 2011. San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: 2011. 5 p.

BELLE, A. et al. Development of IEEE 802.15.7 based ITS services using low cost embedded systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE - ITS TELECOMMUNICATIONS (ITST), 13. 2013, Tampere. **Proceedings...** Tampere: 2013. p. 419-425.

BHALERAO, M. V.; SONAVANE, S. S.; KUMAR, V. A survey of wireless communication using visible light. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, v. 5, n. 2, p. 188-197, 2013.

BORAH, D. et al. A review of communication-oriented optical wireless systems. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, 28 p., 2012.

BURCHARDT, H. et al. VLC: beyond point-to-point communication. **Communications Magazine, IEEE**, v. 52, n. 7, p. 98-105, 2014.

CAILEAN, A.; DIMIAN, M. Toward environmental-adaptive visible light communications receivers for automotive applications: a review. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 9, p. 2803-2811, 2016.

CAILEAN, A. et al. Novel receiver sensor for visible light communications in automotive applications. **IEEE Sensors**, v. 15, n. 8, p. 4632-4639, 2015.

CAILEAN, A. et al. Implementation of a visible light communications system for vehicle applications. In: TELECOMMUNICATIONS FORUM (TELFOR), 2013, Belgrado. **Proceedings...** Belgrado: 2013. p. 349-352

———. Evaluation of the noise effects on visible light communications using Manchester and Miller coding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS, 12. 2014, Suceava. **Proceedings...** Suceava: 2014. p. 85-89

CISCO. **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019**. San Jose: Cisco, 2015. Disponível em: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.pdf>. Acesso em: 01 set. 2015.

CEN. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **Comité Européen De**

Normalisation. Brussels: CEN, 2014. Disponível em: <<https://www.cen.eu/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 15 dez. 2014.

CET. COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO. **Coletiva Sobre Faixas Exclusivas à Direita.** São Paulo: CET, 2013. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/255662/300kmexclusivas1.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2015.

———. **CET - Dá Licença Para o Ônibus.** São Paulo: CET, 2015. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/consultas/da-licenca-para-o-onibus/o-programa.aspx>>. Acesso em: 25 out. 2015.

———. **Operação Dá Licença Para o Ônibus: São Paulo Chega a 500 Km de Faixas Exclusivas Com a Inauguração de Novos Trechos Nesta Segunda-Feira, 29.** São Paulo: CET, 2016. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/noticias/2016/02/26/sao-paulo-chega-a-500-km-de-faixas-exclusivas-com-a-inauguracao-de-novos-trechos-nesta-segunda-feira,29.aspx>>. Acesso em: 08 out. 2016.

———. **Operação Dá Licença Para o Ônibus - CET E SPTrans Implantam 3,5 Km de Faixa Exclusiva em Itaquera Nesta Segunda-Feira (30/09).** São Paulo: CET, 2013. Disponível em: <[http://www.cetsp.com.br/noticias/2013/09/27/operacao-da-licenca-para-o-onibus-cet-e-sptrans-implantam-3,5-km-de-faixa-exclusiva-em-itaquera-nesta-segunda-feira-\(30-09\).aspx](http://www.cetsp.com.br/noticias/2013/09/27/operacao-da-licenca-para-o-onibus-cet-e-sptrans-implantam-3,5-km-de-faixa-exclusiva-em-itaquera-nesta-segunda-feira-(30-09).aspx)>. Acesso em: 10 jan. 2015.

CONTRERAS, J; ZEADALLY, S; GUERRERO-IBANEZ, J. A. Internet of vehicles: architecture, protocols, and security. **IEEE Internet of Things Journal**, 9 p., 2017.

CORSINI, R. et al. Free space optical communication in the visible bandwidth for V2V safety critical protocols. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING CONFERENCE (IWCMC), 2012, Limassol. **Proceedings...** Limassol: 2012. p. 1097-1102.

CREW, B. **Li-Fi Has Just Been Tested in the Real World, and it's 100 Times Faster Than Wi-Fi.** Manuka: Sciencealert, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencealert.com/li-fi-tested-in-the-real-world-for-the-first-time-is-100-times-faster-than-wi-fi>>. Acesso em: 10 dez. 2015

DAR, K. et al. Wireless communication technologies for ITS applications. **Communications Magazine, IEEE**, v. 48, n. 5, p. 156-162, 2010.

DENATRAN. DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota De Veículos - 2015.** Brasília: Denatran, 2016. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/estatistica/257-frota-2015>>. Acesso em: 30 set. 2016.

DO, T; YOO, M. An in-depth survey of visible light communication based positioning systems. **Sensors**, v. 16, n. 5, p. 678, 2016a.

DO, T; YOO, M. Visible light communication based vehicle positioning using a rolling shutter CMOS sensor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

UBIQUITOUS AND FUTURE NETWORKS, 8. 2016, Viena. **Proceedings...** Viena: 2016b. p. 48-50.

DREHER, F. 10 Revoluções Tecnológicas de Uma Cidade Inteligente. São Paulo: **Computerworld**, 2014. Disponível em: <<http://computerworld.com.br/tecnologia/2014/10/09/10-revolucoes-tecnologicas-de-uma-cidade-inteligente>>. Acesso em: 10 out 2014.

DUPUIS, R. D.; KRAMES, M. R. History, development, and applications of high-brightness visible light-emitting diodes. **Journal of Lightwave Technology**, v. 26, n. 9, p. 1154-1171, 2008.

DURSUN, I. et al. Perovskite nanocrystals as a color converter for visible light communication. **ACS Photonics**, v. 3, n. 7, p. 1150-1156, 2016.

EDISON INVESTMENT RESEARCH. **Led Spotlight**. London: Edison Investment Research, 2013. Disponível em: <<http://www.edisoninvestmentresearch.com/?ACT=19&ID=10000&dir=sectorreports&field=19>>. Acesso em: 02 fev. 2014.

ELGALA, H; MESLEH, R; HAAS, H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art. **Communications Magazine, IEEE**, v. 49, n. 9, p. 56-62, 2011.

ERGUL, O; DINC, E; AKAN, O. Communicate to illuminate: state-of-the-art and research challenges for visible light communications. **Physical Communication**, v. 17, p. 72-85, 2015.

ERICSSON. **Volvo e Ericsson Lançam Its4mobility América Latina**. Goiânia: Ericsson, 2015. Disponível em: <https://www1.ericsson.com/br/news/2015-12-01-goiania-po_254740126_c>. Acesso em: 08 out. 2016.

———. **Ericsson Unveils Connected Bus Stop and Other Public Transport Innovations At UITP Milan**. Stockholm, Ericsson, 2015. Disponível em: <<http://www.ericsson.com/news/1926277>>. Acesso em: 07 jul. 2015.

EUROPEAN TELECOMMUNICATION STANDARDS INSTITUTE. **European Telecommunications Standards Institute - ETSI**. Site Internet do Instituto. Sophia-Antipolis: ETSI, 2014. Disponível em: <<http://www.etsi.org/about>>. Acesso em: 2014.

FALCITELLI, M.; PAGANO, P. Visible light communication for cooperative ITS. In: ALAM, M.; FERREIRA, J.; FONSECA, J. **Intelligent transportation systems** - dependable vehicular communications for improved road safety. Springer International Publishing, 2016. p. 19-47.

FESTAG, A. Cooperative intelligent transport systems standards in Europe. **Communications Magazine, IEEE**, v. 52, n. 12, p. 166-172, 2014.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Anhangabaú Encheu até o Teto em 1999**. São Paulo: Folha de S. Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff1909200606.htm>>. Acesso em 21

mai. 2016.

———. **Faixas Exclusivas e Corredores de Ônibus em São Paulo**. São Paulo: Folha de S. Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/infograficos/2013/08/24144-faixas-exclusivas-e-corredores-de-onibus-em-sao-paulo.shtml>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

———. **Novos Pontos de Ônibus em São Paulo Terão a Cara da Região**. São Paulo: Folha de S. Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/1174781-novos-pontos-de-onibus-em-sao-paulo-terao-a-cara-da-regiao.shtml>>. Acesso em: 05 ago. 2014.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR PHOTONIC MICROSYSTEMS IPMS. **Research News**. Dresden: Fraunhofer Institute for Photonic Microsystems IPMS, 2012. Disponível em: <http://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/press-media/2012/PDFs/rn10_2012_OKTOBER.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2015.

GHASSEMLOOY, Z.; POPOOLA, W.; RAJBHANDARI, S. **Optical wireless communications** - system and channel modelling with Matlab. Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis, 2013. 557 p.

GHASSEMLOOY, Z; LUO, P; ZVANOVEC, S. Optical camera communications. In: UYSAL, M. et al. **Optical wireless communications** - an emerging technology. Springer International Publishing, 2016. p. 547-568.

GLOBAL LIFI CONGRESS. **Global Lifi Congress**. Paris: Lifi Congress, 2017. Disponível em: <<https://www.lificongress.com>>. Acesso em: 08 set. 2017.

GLOBAL MARKET INSIGHTS. (Light Fidelity) Li-Fi Market Size By Component (Microcontroller, Photodetector, Led), By Application (Indoor Networking, Aerospace, Automotive, Healthcare, Location Based Services, Underwater Communication, Defense & Security, Intrinsically Safe Environments), Industry Analysis Report, Regional Outlook (U.s., Uk, Germany), Application Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2016 – 2023. **Report ID: GMI462**. Ocean View: Global Market Insights, 2016. Disponível em: <<https://www.gminsights.com/industry-analysis/lifi-market>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

GROBE, L. et al. High-speed visible light communication systems. **Communications Magazine, IEEE**, v. 51, n. 12, p. 60-66, 2013.

HAAS, H. **Li-Fi**: high speed wireless communications via light bulbs. In: IEEE WEBINAR, 2013. Edinburgh, Proceedings... Edinburgh: The University of Edinburgh, 19 jun. 2013. IEEE Webinar, Edinburgh, 2013.

HAAS, H. Harald Haas: wireless data from every light bulb. In: TEDGlobal. 2011. Edinburgh. **Site Internet do Evento**. Edinburgh, TED Institute, 2011. Disponível em: <https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb?language=pt-br>. Acesso em: 20 jul. 2014.

HAAS, H. **Professor Harald Haas**. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2014. Disponível em: <<http://www.see.ed.ac.uk/drupal/hxh/about/>>. Acesso em:

05 jul. 2014.

HADDAD, E. A; VIEIRA, R. S. **Mobilidade, Acessibilidade e Produtividade:** Nota Sobre a Valoração Econômica do Tempo de Viagem na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.usp.br/nereus/wpcontent/uploads/TD_Nereus_08_2015.pdf>. Acesso em: 02 out. 2015.

HAMIDA, E. B; NOURA, H; ZNAIDI, W. Security of cooperative intelligent transport systems: standards, threats analysis and cryptographic countermeasures. **Electronics**, v. 4, n. 3, p. 380-423, 2015.

HARUYAMA, S. Visible light communication using sustainable LED lights. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION KALEIDOSCOPE ACADEMIC CONFERENCE: BUILDING SUSTAINABLE COMMUNITIES, 5. 2013, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: 2013. p. 31-36.

HISTORY OF LIGHTING. **History of Leds** - Light Emitting Diodes. Fatos históricos sobre a história da iluminação. Disponível em: <<http://www.historyoflighting.net/light-bulb-history/history-of-led/>>. Acesso em: 03 set. 2015.

HOFMANN-WELLENHOF, B; LICHTENEGGER, H; WASLE, E. **GNSS** – Global Navigation Satellite Systems - GPS, Glonass, Galileo and More. New York: Springer, 2008. 518 p.

IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL. Washington: IEEE Computer Society, 2014. Online. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6488907>>. Acesso em: 03 out. 2017.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS 1609 WORKING GROUP. **1609.0-2013** - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture. Piscataway: IEEE Standards Association, 2013. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1609.0-2013.html>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 754:** IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. 2008. 70 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11P:** IEEE Standard for Information Technology - Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments. 2010. 51 p.

———. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks** — Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. Piscataway: IEEE Standards Association, 2011. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.7-2011.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2014.

———. **1609.0-2013** - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular

Environments (WAVE) - Architecture. Piscataway: IEEE Standards Association, 2013. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1609.0-2013.html>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

———. **IEEE 802.15 WPAN 15.7** Amendment - Optical Camera Communications Study Group (SG 7A). Piscataway: IEEE Standards Association, 2014. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/SG7a.html>>. Acesso em: 02 dez. 2014.

———. **IEEE 802 LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE**. Informações sobre as atividades do comitê. Piscataway: IEEE Standards Association, 2017a. Disponível em: <<http://www.ieee802.org>>. Acesso em: 07 set. 2017.

———. **IEEE 802.15** Working Group for Wireless Specialty Networks (WSN). Piscataway: IEEE Standards Association, 2017b. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/>>. Acesso em: 15 set. 2017.

———. **IEEE 802.15 WPAN Task Group 13 (Tg13)** Multi-Gigabit/s Optical Wireless Communications. Piscataway: IEEE Standards Association, 2017c. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/TG13.html>>. Acesso em: 15 set. 2017.

———. **IEEE 802.15 WPAN Task Group 7 (Tg7)** Visible Light Communication. Piscataway: IEEE Standards Association, 2017d. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>>. Acesso em: 20 out. 2014.

———. **IEEE P802.11** - Light Communication (LC) Topic Interest Group (TIG). Piscataway: IEEE Standards Association, 2017e. Disponível em: <http://www.ieee802.org/11/Reports/lctig_update.htm>. Acesso em: 15 set. 2017.

ILUMATIC. **Ilumatic S/A**. São Paulo: Ilumatic. Site institucional do fabricante. Disponível em: <<http://www.ilumatic.com.br>>. Acesso em: 01 jun. 2014.

———. **Luminária LED Maestra**. São Paulo: Ilumatic, 2014. Disponível em: <<http://www.ilumatic.com.br/produtos.asp?codCategoria=40&codSubCategoria=103>>. Acesso em: 15 ago. 2015.

INFRARED DATA ASSOCIATION. **Infrared Data Association**. Site institucional da Associação. Walnut Creek: Infrared Data Association, 2011. Disponível em: <<http://www.irdajp.info/index.html>>. Acesso em: 18 dez. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **População do Brasil**. Projeção da população brasileira. Brasília: IBGE, 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 25 out. 2015.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Ciam** - Centro de Tecnologia da Informação, Automação e Mobilidade. Informações sobre o Centro. São Paulo: IPT, 2016. Disponível em: <http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CIAM>. Acesso em: 28 nov. 2016.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT. **UITP World Congress and Exhibition**. Site do evento. Milan: UITP, 2015. Disponível em: <<http://www.uitpmilan2015.org>>. Acesso em: 10 out. 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC 17417:2011** Information Technology -- Telecommunications and Information Exchange Between Systems -- Short Distance Visible Light Communication (Sdvlc). Geneve: ISO, 2011. Disponível em: <<http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

———. **ISO 21217:2014** - Intelligent Transport Systems -- Communications Access for Land Mobiles (CALM) -- Architecture. Geneve: ISO, 2014. Disponível em: <http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=61570>. Acesso em: 11 jan. 2015.

ITALIANI, R.; BOROGOVAC, T.; CARRUTHERS, J. B. **Prefeitura vai ampliar fiscalização de ônibus em São Paulo modelo que utilizará aparelhos de GPS permitirá controlar melhor todas as saídas; multas graves e gravíssimas têm queda de 40%**. São Paulo: O Estado de São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://sao-paulo.estadao.com.br/noticias/geral,prefeitura-vai-ampliar-fiscalizacao-de-onibus-em-sp,10000024859>>. Acesso em: 07 abr. 2016.

JAPAN ELECTRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGY INDUSTRIES ASSOCIATION (JEITA). **AV&IT Technology Standardization** - Visible Light Communications. Tokyo: JEITA, 2007. Disponível em: <http://www.jeita.or.jp/cgi-bin/standard_e/list.cgi?cateid=1&subcateid=50>. Acesso em: 04 nov. 2014.

JAYAVARDHANA, G. et al. Internet of Things (Iot): a Vision, Architectural Elements, and Future Directions: Gubbi20131645. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645 - 1660, 2013.

KAHN, J. **GE Integrates Ibeacons in New Led Lighting Fixtures Rolling Out in Walmart and Other Retailers**. The Woodlands: Wright's Media, 2014. Disponível em: <<http://9to5mac.com/2014/05/29/ge-integrates-ibeacons-in-new-led-lighting-fixtures-rolling-out-in-walmart-other-retailers/>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

KARUNATILAKA, D. et al. LED based indoor visible light communications: state of the art. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v.17, n. 3, p. 1649-1678, 2015.

KAWAMOTO, D. **Pesquisa de iniciação científica integrante à pesquisa de doutorado** Proposta e avaliação de um sistema complementar de posicionamento baseado em comunicação por luz visível aplicado a sistemas inteligentes de transporte. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2016. (Apostila).

KIM, B. W.; JUNG, S. Y. Vehicle positioning scheme using V2V and V2I visible light communications. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING), 83. 2016, Nanjing. **Proceedings...** Nanjing: 2016. 5 p.

KITANO, S.; HARUYAMA, S.; NAKAGAWA, M. LED road illumination communications system. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 58. 2003, Orlando. **Proceedings...** Orlando: 2003. p. 3346-3350.

KUMAR, N. **Visible light communication systems for road safety applications**. 2011. 228 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Aveiro, Portugal. Disponível em: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/8176/1/Navin-Thesis-Final_PT_21.pdf>. Acesso em 15 ago. 2014.

KUMAR, N.; LOURENCO, N. LED-based visible light communication system: a brief survey and investigation. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 5, n. 4, p. 296-307, 2010.

KUMAR, N. et al. Visible light communications in intelligent transportation systems. In: IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, 4. 2012, Alcala de Henares. **Proceedings...** Alcala de Henares: 2012. p. 748-753.

KUMAR, N. et al. Visible light communication for intelligent transportation in road safety applications. In: INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING CONFERENCE (IWCMC), 7. 2011, Istambul. **Proceedings...** Istambul: 2011. p. 1513-1518.

KÜNN, S. **DGPS Reference Station**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_GPS#/media/File:DGPS_Reference_Station.jpg>. Acesso em: 30 ago. 2015.

LAKSHMIPRABA, B; KUMAR, P. A; SIVAKUMAR, V. G. Wireless connectivity in connected vehicles for road traffic safety: review and ideas. **International Journal of Emerging Technologies - ICRIET**, v. 7, n. 2, 2 p., 2016.

LEDVANCE. Ledvance Knowledge: The Led Light Colors. **Informações sobre tecnologia LED**. **Garching: Ledvance**, 2016. Disponível em: <<https://www.ledvance.com/products/product-knowledge/led-basics/led-light-colors/index.jsp>>. Acesso em: 01 set. 2016.

LEE, S. J. et al. Simulation modeling of visible light communication channel for automotive applications. In: INTERNATIONAL IEEE CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (ITSC), 15. 2012, Anchorage. **Proceedings...** Anchorage: 2012. p. 463-468.

LI-FI CONSORTIUM. **Li-Fi Consortium**. Site insitucional do consórcio. Disponível em: <<http://www.lificonsortium.org/index.html>>. Acesso em: 04 mar. 2015.

LIU, C. B; SADEGHI, B; KNIGHTLY, E. W. Enabling vehicular visible light communication (V2LC) networks. In: ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON VEHICULAR INTER-NETWORKING. VANET'11, 8. 2011, Las Vegas.

Proceedings... Las Vegas: 2011. p. 41-50.

LIU, H. S.; PANG, G. Positioning beacon system using digital camera and LEDs. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 52, n. 2, p. 406-419, 2003.

LIU, J. et al. Hybrid visible light communications in intelligent transportation systems with position based services. In: IEEE GLOBECOM WORKSHOPS. 2012, Anaheim. **Proceedings...** Anaheim: 2012. p. 1254-1259.

LOURENÇO, N. et al. Visible light communication system for outdoor applications. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATION SYSTEMS, NETWORKS DIGITAL SIGNAL PROCESSING (CSNDSP), 8. 2012, Poznan. **Proceedings...** Poznan: 2012. 6 p.

LU, N et al. Connected vehicles: solutions and challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 4, p. 289-299, 2014.

MARÈ, R. M. et al. Intelligent transport systems and visible light communication applications: an overview. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (ITSC 2016), 19. Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: 2016. 9 p.

MARÈ, R. M.; CUGNASCA, C. E. Avaliação do potencial da comunicação de dados sem fio utilizando-se a luz visível de LEDs. In: III WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO DA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP (WPGEC-2014), 3. 2014, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 2014. 3 p.

——— Comunicação por luz visível aplicada aos sistemas inteligentes de transporte. In: WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO DA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP (WPGEC-2015), 4. 2015, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 2015. 3 p.

MARÈ, R. M.; CUGNASCA, C. E.; MARTE, C. L. Comunicação por luz visível aplicada aos sistemas inteligentes de transporte. In: WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO DA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP (WPGEC-2016), 5. 2016b, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 2016b. 3 p.

MARÈ, R. M.; MARTE, C. L.; CUGNASCA, C. E. Visible light communication applied to intelligent transport systems: an overview. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 7, p. 3199-3207, 2016d.

MARKETS AND MARKETS. **Vehicle to Vehicle Communication Market**. Hadapsar: Markets and Markets. 2015. Disponível em: <<http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/connected-cars-market-595.html>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

———. **Visible Light Communication Technology and FSO Technology**. Hadapsar: Markets and Markets, 2015. Disponível em: <<http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/visible-light-communication-market-946.html>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Informações sobre as atividades do laboratório. **MIT Senseable City Lab**. Cambridge: MIT, 2014. Disponível em: <<http://senseable.mit.edu>>. Acesso em: 10 out. 2014.

———. **Eyestop**. Cambridge: MIT, 2014a. Disponível em: <<http://senseable.mit.edu/eyestop/>>. Acesso em: 07 ago. 2014.

MATHWORKS. **Matlab**. Natick: MathWorks, 2014a. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matla>. Acesso em: 05 ago. 2014.

———. **Simulink**. Natick, MathWorks, 2014b. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=hp_products_simulink>. Acesso em: 05 ago. 2014.

MCKIMSEY & COMPANY. **Lighting the Way: Perspectives on the Global Lighting Market**. Munich: McKinsey & Company, 2012. Disponível em: <https://www.mckinsey.de/files/Lighting_the_way_Perspectives_on_global_lighting_market_2012.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2014.

MEDINA, C. et al. LED based visible light communication: technology, applications and challenges - a survey. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, v. 8, n. 4, p. 482-495, 2015.

MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **International Survey of Best Practices in Connected and Automated Vehicle Technologies**. Lansing: MDoT, 2013. Disponível em: <https://www.michigan.gov/documents/mdot/09-12-2013_International_Survey_of_Best_Practices_in_ITS_434162_7.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2015.

MICROCHIP TECHNOLOGY. **Microcontrollers**. Chandler: Microchip Technology, 2015. Disponível em: <<http://www.microchip.com/pagehandler/en/us/products/picmicrocontrollers>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **Instituto Nacional Da Propriedade Industrial - INPI**. Rio de Janeiro: INPI, 2015. Disponível em: <<http://www.inpi.gov.br>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT; INTELLIGENT TRANSPORT SOCIETY KOREA; KDI SCHOOL OF PUBLIC POLICY AND MANAGEMENT **2013 Modularization of Korea's Development Experience: Establishment of Intelligent Transport Systems (ITS)**. Seul: Intelligent Transport Society of Korea, 2013. Disponível em: <http://itsasia-pacific.com/pdf/Establishment_of_ITS_in_Korea_2013.pdf>. Acesso em 04 jun. 2014.

MOBITEC BRASIL. **Mobitec - Soluções**. Site Internet do fabricante. Caxias do Sul: Mobitec, 2014. Disponível em: <<http://www.mobitec.com.br>>. Acesso em:

25 mai. 2014.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS** - descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora UNESP, 2007. 480 p.

MOOVIT. **Moovit**. Site Internet do aplicativo. Disponível em: <<http://moovitapp.com/pt-br/>>. Acesso em: 08 set. 2015.

MUHAMMAD, S; KOHLDORFER, P; LEITGEB, E. Channel modeling for terrestrial free space optical links. In: TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS, INTERNATIONAL CONFERENCE, 7. 2005, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: 2005. p. 407-410.

NAGURA, T. et al. Improved decoding methods of visible light communication system for ITS using LED array and high-speed camera. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC 2010-SPRING), 71. 2010, Taipei. **Proceedings...** Taipei: 2010. 5 p.

NASA EDUCATIONAL RESOURCES. **How do Global Positioning Systems Work?** Washington: NASA, 2015. Disponível em: <http://www.nasa.gov/audience/foreducators/topnav/materials/listbytype/How_Do_Global_Positioning_Systems.html#.VZLzg2CORce>. Acesso em: 30 jun. 2015.

NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, NAVIGATION AND TIMING. **The Global Positioning System**. Washington: National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing, 2015. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em: 26 jun. 2015.

NGUYEN, H. Q. et al. A matlab-based simulation program for indoor visible light communication system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATION SYSTEMS NETWORKS AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING (CSNDSP), 7. 2010, Newcastle upon Tyne. **Proceedings...** Newcastle upon Tyne: 2010. p. 537-541.

NOBEL FOUNDATION. **The Nobel Prize in Physics 2014** - Press Release. Estocolmo: Nobel Foundation, 2014. Nobel Media. Disponível em: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html>. Acesso em: 07 out. 2014.

O ESTADO DE S. PAULO. **Ônibus de São Paulo serão monitorados por satélite**. São Paulo: O Estado de São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.nossasaopaulo.org.br/portal/node/601>>. Acesso em: 25 out. 2015.

OHMURA, A. et al. **Accuracy Improvement by Phase Only Correlation for Distance Estimation Scheme for Visible Light Communications Using an Led Array and a High-Speed Camera**. In: ITS CONGRESS, 20. 2013, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo, The National Academy of Sciences, Engineering and Medicine, 2013. Disponível em: <<http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~arai/PDFs/Proceedings/C-033.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2015.

OKADA, S. et al. On-vehicle receiver for distant visible light road-to-vehicle

communication. In: IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, 2009, Xi'an. **Proceedings...** Xi'an: 2009. p. 1033-1038.

OLED COMM. **Oledcomm Lize**. Site institucional do fabricante. Paris: OledComm, 2014. Disponível em: <<http://www.oledcomm.com>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

OSRAM. **LED**: Tecnologia para soluções flexíveis com eficiência de energia. São Paulo: OSRAM, 2014. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/noticias-e-conhecimento/pagina-de-led/conhecimento-profissional/principios-basicos-do-led/conhecimento-basico/index.jsp>. Acesso em: 04 out. 2014.

———. **The History of the LED**. São Paulo: OSRAM, 2014. Disponível em: <http://www.osram.com/osram_com/news-and-knowledge/led/home/professional-knowledge/led-basics/led-history/index.jsp>. Acesso em: 10 set. 2015.

———. **High Speed Pin Photodiode Sfh 2701**. São Paulo: OSRAM, 2015. Disponível em: <http://www.osram-os.com/Graphics/XPic9/00083297_0.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2016.

PANASONIC. **Innovative B2B Solutions Like 8k Displays and Next Generation Projection Lighting**. Las Vegas: Panasonic, 2015. Disponível em: <<http://news.panasonic.com/global/stories/2015/30580.html>>. Acesso em: 28 jul. 2015.

PANG, G. et al. LED traffic light as communication device. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 1999, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: 1999. p. 788-793.

PANG, G. K. H. et al. Dual use of LEDs: signaling and communications in ITS. In: WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS, 5. 1998, Seoul. **Proceedings...** Seoul: 1998. 8 p.

:———. Vehicle location and navigation systems based on LEDs. In: 5th WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS, 5. 1998b, Seoul. **Proceedings...** Seoul: 1998a. 8 p.

———. LED location beacon system based on processing of digital images. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 2, n. 3, p. 135-150, 2001.

PARKINSON, B. W.; GILBERT, S. W. Navstar: Global Positioning System ten years later. **Proceedings of the IEEE**, v. 71, n. 10, p. 1177-1186, 1983

PATEL R. K.; ROWE, E. **An Overview of Its Standards and Protocols**. Washington: Institute of Transportation Engineers, 2015. Disponível em: <http://www.ite.org/standards/ITS_stdp.asp>. Acesso em: 01 set. 2015.

PHILIPS. **Philips-Led Based Indoor Positioning Technology**. Barueri: Philips, 2015. Disponível em: <<http://www.lighting.philips.com/main/>>

systems/themes/led-based-indoor-positioning>. Acesso em: 02 out. 2015.

———. **Where Are the Discounts? Carrefour's Led Supermarket Lighting From Philips Will Guide You**. Barueri: Philips, 2015. Disponível em: <<http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2015/20150521-where-are-the-discounts-carrefours-led-supermarket-lighting-from-philips-will-guide-you.wpd#.VhE9kda1cfk>>. Acesso em: 02 out. 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Consulta Pública do Edital da PPP da Iluminação**. São Paulo: PMSP, 2015. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/participacao_social/consultas_publicas/index.php?p=182594>. Acesso em: 15 jul. 2015.

PREMACHANDRA, C. et al. Outdoor road-to-vehicle visible light communication using on-vehicle high-speed camera. **International Journal of Intelligent Transportation Systems Research**, v. 13, n. 1, p. 28–36, 2014.

PRINCETON UNIVERSITY. **Replicating Bell's 19th Century Photophone**. Disponível em: <<https://www.princeton.edu/ssp/joseph-henry-project/photophone/>>. Acesso em: 09 Jul 2015.

PURELIFI. **PureLifi**. Site Institucional da Empresa. Edimburgh: PureLifi, 2014. Disponível em: <<http://www.purelifi.com>>. Acesso em: 05 jul. 2014.

RAY, P. P. Communicating through visible light: internet of things perspective. **Current Science**, v. 111, n. 12, p. 1903-1905, 2016.

RODRIGUES, M.; CUGNASCA, C. E.; QUEIROZ FILHO, A. P. **Rastreamento de veículos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 124 p.

SALOMÃO, K. Venda de bicicletas cai, mas elas ficaram mais sofisticadas. **Exame**. São Paulo. Site Internet. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/venda-de-bicicletas-cai-mas-elas-ficaram-mais-sofisticadas/>>. Acesso em: 30 set. 2015.

SPTRANS - SÃO PAULO TRANSPORTE. **Terminais, Paradas E Corredores**. São Paulo: SPTrans, 2015. Disponível em: <<http://www.sptrans.com.br/terminais/>>. Acesso em: 25 out. 2015.

———. **Sistema de Transporte Coletivo de Passageiros do Município de São Paulo**. Tecnologia Embarcada. Requisitos e Funcionalidades Básicos dos Equipamentos Embarcados para Toda a Frota do Transporte Coletivo. São Paulo: SPTrans, 2015. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/requisitos-v-02_1396543381.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2015.

———. **Olho Vivo** - Sistema de Monitoramento do Transporte. São Paulo: SPTrans, 2015. Disponível em: <<http://olhovivo.sptrans.com.br>>. Acesso em: 08 set. 2015.

———. **SPTrans E-Ponto**. São Paulo: YouTube, 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=sd6ynqUHFfQ>>. Acesso em: 03 set. 2014.

———. **Sistemas Informatizados para a Gestão do Transporte Coletivo do Município de São Paulo**. São Paulo: SPTrans, 2015. Disponível em: <http://www.sptrans.com.br/pdf/biblioteca_tecnica/SISTEMAS_INFORMATIZADOS_PARA_A_GESTAO_DO_TRANSPORTE.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2015.

SHENG-HAI, A.; BYUNG-HYUG, L; DONG-RYEOL, S. A survey of intelligent transportation systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, COMMUNICATIONS SYSTEMS AND NETWORKS, 3. 2011, Bali. **Proceedings...** Bali: 2011. p. 332-337.

SHUN-HSIANG, Y. U. et al. Smart automotive lighting for vehicle safety. **Communications Magazine, IEEE**, v. 51, n. 12, p. 50-59, 2013.

SILVA, R. et al. Standards for cooperative intelligent transportation systems: a proof of concept. In: ADVANCED INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS AICT, 10. 2014, Paris. **Proceedings...** Paris: 2014. p. 35-40.

TESTO. **Testo 435** - Multifunction Measuring Instrument. Manual do instrumento. Disponível em: <<https://media.testo.com/media/fe/b9/3033a7ab04ea/testo-435-Instruction-manual.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2014

TRANSPARENCY MARKET RESEARCH. **Intelligent Transportation System (Its) Market** - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2013-2019. Albany: Transparency Market Research, 2014. Disponível em: <<http://www.transparencymarketresearch.com/intelligent-transportation-system-market.html>>. Acesso em: 09 out. 2014.

TRANSPORTATION RESEARCH - **PART C, EMERGING TECHNOLOGIES**. Amsterdam: Elsevier, 2017. Disponível em: <<https://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-c-emerging-technologies/>>. Acesso em: 03 out. 2017.

TRONG-HOP, D. O.; MYUNGSIK, Y. O. O. Potentialities and challenges of VLC based outdoor positioning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION NETWORKING (ICOIN), 2015, Cambodia. **Proceedings...** Cambodia: 2015. p. 474-477.

TSONEV, D; VIDEV, S; HAAS, H. Light Fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking. In: SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 2013, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: 2013. 10 p.

TSUBOI, T.; SEKIGUCHI, T. Optimization for wireless vehicular network system in urban area. In: SIKORA, A. et al. **Communication technologies for vehicles**. Offenburg: Springer International Publishing, 2014. p. 126-142.

TSUGAWA, S. The current trends and issues on ITS in Japan: safety, energy and environment. In: INTERNATIONAL MICROWAVE WORKSHOP SERIES ON INTELLIGENT RADIO FOR FUTURE PERSONAL TERMINALS (IMWS-IRFPT), 2011, Daejeon. **Proceedings...** Daejeon: 2011. p. 1-2.

UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Research and Innovative Technology Administration - RITA**. Washington: DOT, 2013. Disponível em: <<http://www.its.dot.gov>>. Acesso em: 15 set. 2014.

———. **Deployment Resources - ITS Standards Fact Sheets**. Washington: DOT, 2009. Disponível em: <<http://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/80>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

———. **ITS 2015-2019 Strategic Plan**. Washington: DOT, 2014. Disponível em: <<http://www.its.dot.gov/strategicplan/index.html>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. MARÈ, R. M. et al. **Sistema de correção diferencial GPS/GNSS por luz para o posicionamento de veículos e processo para correção diferencial de posicionamento de veículos**. BR 10 2016 026167-8, 08 nov. 2016.

UYSAL, M. et al. Visible light communication for vehicular networking: performance study of a V2V system using a measured headlamp beam pattern model. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 10, n. 4, p. 45-53, 2015.

VELMENNI. **Providing High Speed, Highly Secure Wireless Communication System Using Lifi Technology**. Site Internet da empresa. Disponível em: <<http://velmenni.com>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

VISHAY. **Silicon Pin Photodiode BPW 34**. Malvern: Vishay, 2016. Disponível em: < <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>>. Acesso em: 07 mai. 2016.

VISIBLE LIGHT COMMUNICATION CONSORTIUM. Site Internet do consórcio. **Visible Light Communication Consortium**. VLCC. Disponível em: <<http://www.vlcc.net>>. Acesso em: 30 out. 2014.

VUCIC, J.; LANGER, K. D. High-speed visible light communications: state-of-the-art. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE AND EXPOSITION AND THE NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE (OFC/NFOEC), 2012, Los Angeles. **Proceedings...** Los Angeles: 2012. 3 p.

WANG, Y. et al. Long-range high-speed visible light communication system over 100-m outdoor transmission utilizing receiver diversity technology. **Optical Engineering**, v. 55, n. 5, 7 p., 2016.

WEISS, C. V2X communication in Europe – from research projects towards standardization and field testing of vehicle communication technology. **Computer Networks**, v. 55, n. 14, p. 3103-3119, 2011.

WILLIAMS, B. **Intelligent Transport Systems Standards**. London: Artech House Inc., 2008. 816 p.

WITMANN, T. **Building a Matlab GUI**. Los Angeles: UCLA, 2015. Disponível em: <<http://www.math.ucla.edu/~wittman/reu2008/matlabGUI.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2015.

WON, E. T. et al. **Visible Light Communication: Tutorial**. Oxford: IEEE Computer Society, 2008. Disponível em: <http://www.ieee802.org/802_tutorials/2008-03/15-08-0114-02-0000-VLC_Tutorial_MCO_Samsung-VLCC/Oxford_2008-03-17.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2014.

YAMAZATO, T. et al. Image-sensor-based visible light communication for automotive applications. **Communications Magazine, IEEE**, v.52, n. 7, p. 88-97, 2014.

YANG F. et al. An overview of internet of vehicles. **China Communications**, v. 11, n. 10, p. 1-15, 2014.

YEON, H; SE-BIN, O. H. Efficient optical filtering for outdoor visible light communications in the presence of sunlight or artificial light. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SIGNAL PROCESSING AND COMMUNICATIONS SYSTEMS (ISPACS), 2013, Naha. **Proceedings...** Naha: 2013. p. 667-671.

ZARANEK, S. W. **Creating Graphical User Interfaces**. Natick: The Mathworks Inc., 2012. Disponível em: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/linkexchange/links/3275-creating-graphical-user-interfaces-guis-in-matlab?s_tid=srchtitle>. Acesso em: 01 out. 2015.

ZHANG, J. et al. Data-driven intelligent transportation systems: a survey. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 4, p. 1624-1639, 2011.

ZHANG, W; XI, X. The innovation and development of internet of vehicles. **China Communications**, v. 13, n. 5, p. 122-127, 2016.

ZHELUDEV, N. The life and times of the LED - a 100-year history. **Nat Photon**, v. 1, n. 4, p. 189-192, 2007.

APÊNDICE A - Resultados Acadêmicos

Apresentam-se, a seguir, os resultados acadêmicos diretamente relacionados a esta pesquisa.

A.1 Artigo Publicado em Periódico

Visible Light Communication Applied to Intelligent Transport Systems: an Overview (MARÈ et al., 2016d).

Abstract - *The growing use of mobile devices, besides contexts as the Internet of Things, are demanding all the efforts to provide wireless communications alternatives. Optical wireless communication is posing as a promising complementary technology to radio frequency, especially due to considerable deployments in solid-state lighting technology and its adoption in many domains. Light-emitting diodes can be used to promote visible light communication indoors and outdoors and in this case, there are many opportunities to be explored regarding intelligent transport systems, since they have been used in public lighting, traffic lights and vehicles. This article aims at presenting an overview of the applications in intelligent transport systems that are being proposed or developed around the world, allowing the communication between vehicles and infrastructure through visible light. This technology has the potential to provide a significant contribution to the communication demands in the intelligent transport systems scenario.*

A.2 Artigos Submetidos e em Desenvolvimento

MARÈ, R. M. et al. **Differential GNSS Correction System Based on Visible Light Communication Technology.**

Planeja-se submeter este artigo à revista IEEE Sensors Journal, ISSN: 1530-437X (fator de impacto 2,1512, classificação A1 – Engenharias IV), até 28/02/2018.

MARÈ, R. M. et al. **A Testbed for a Visible Light Communication System Applied to Intelligent Transport Systems in the Context of the Internet of Vehicles.**

Artigo submetido à publicação IEEE Internet of Things Journal (2014) (fator de impacto 7,596; Classificação B2 – Engenharias IV), aguardando parecer dos revisores.

A.3 Pedido de Patente

Sistema de Correção Diferencial GPS/GNSS por Luz para o Posicionamento de Veículos e Processo para Correção Diferencial de Posicionamento de Veículos (MARÈ et al., 2016c).

Resumo - A presente invenção refere-se a um sistema de correção diferencial GPS/GNSS (DGPS) de posicionamento de veículos em uma determinada via através da tecnologia de comunicação por luz visível ou não visível, compreendendo uma unidade de Processamento e Controle (UPC), um dispositivo de comunicação e um receptor GPS/GNSS. Adicionalmente, a presente invenção refere-se a um processo para realizar tal correção diferencial de posicionamento de veículos compreendendo as seguintes etapas: implementar o sistema na infraestrutura viária, implementar o sistema no veículo rastreado, e aplicar o algoritmo de correção para as coordenadas obtidas no veículo rastreado.

A.4 Congresso Internacional

Trabalho completo:

Intelligent Transport Systems and Visible Light Communication Applications: an Overview* (MARÈ et al., 2016a).

Abstract - *The context of the Internet of Things and the growing use of mobile*

devices have demanded wireless communication alternatives, complementary to radio frequency. As a promising alternative, optical wireless communication has emerged, due to significant deployments in solid-state lighting technology. Light-emitting diodes have been adopted in many domains, both indoors and outdoors. In this case, they can be seen in traffic lights, vehicles, and public lighting. Since this lighting component is the base of the visible light communication, there are many opportunities to be explored regarding intelligent transport systems, some of them, already proposed or developed worldwide. As presented in this article, visible light communication has the potential to provide a significant contribution to the communication demands in the intelligent transport systems scenario.

Abstract submetido ao Global Lifi Congress 2018

Proposal and Evaluation of a Visible Light Positioning System Applied to Intelligent Transport Systems (MARÈ e CUGNASCA, 2017).

Abstract– *Visible Light Communication is a promising and complementary technology to radiofrequency, both indoors and outdoors. There are opportunities to be explored outdoors regarding Intelligent Transport Systems, once LEDs have been used in public luminaires, traffic lights and vehicles. This paper presents the proposal of a Visible Light Positioning system based on public luminaires, which intends to address the GPS shortcomings, a relevant issue related to public transport management (bus modal).*

Abstract submetido ao Global Lifi Congress 2018

A Testbed for Visible Light Communication in the Context of the Internet of Vehicles (GOGLIANO SOBRINHO et al., 2017)

Abstract– *The use of GPS technology to locate bus vehicles, in real-time, inside big cities, has some drawbacks. Shadow areas, tunnels and bus terminals carry the loss of signal. Visible Light Communication can be a useful complement. It would be possible to use the existing public lighting infrastructure as a channel of position transmission. To make an assessment of this idea, we have used a testbed: a small test vehicle attached to a running belt*

mechanism. The experiments realized are described here.

A.5 Congresso Nacional

Trabalho completo:

Comunicação por Luz Visível Aplicada aos Sistemas Inteligentes de Transporte (MARÈ et al., 2016b).

Abstract - *The growing use of mobile devices, besides contexts as the Internet of Things, is demanding all the efforts to provide wireless communications alternatives. Optical wireless communication is posing as a promising complementary technology to radio frequency, especially due to considerable deployments in solid-state lighting technology and its adoption in many domains. Light-emitting diodes can be used to promote visible light communication indoors and outdoors and in this case, there are many opportunities to be explored regarding intelligent transport systems, since they have been used in public lighting, traffic lights and vehicles. This article aims at presenting an overview of the applications in intelligent transport systems that are being proposed or developed around the world, allowing the communication between vehicles and infrastructure through visible light. This technology has the potential to provide a significant contribution to the communication demands in the intelligent transport system scenario.*

A.6 Resumos

Comunicação por Luz Visível Aplicada aos Sistemas Inteligentes de Transporte (MARÈ e CUGNASCA, 2015).

Abstract - *The growing use of mobile devices, besides contexts as the Internet of Things, are demanding all the efforts to provide wireless communication alternatives. Optical wireless communication is posing as a promising complementary technology to radio frequency, especially due to considerable*

deployments in solid-state lighting technology and its adoption in many domains. Light-emitting diodes can be used to promote visible light communication indoors and outdoors and in this case, there are many opportunities to be explored regarding intelligent transport systems, since they have been used in public lighting, traffic lights and vehicles. This article presents an overview of a research that proposes a Visible Light Communication system applied to intelligent transport systems, allowing the communication between the public lighting and the public transport. It is expected to prove the viability of this architecture through a prototype and simulation tools.

Avaliação do potencial da comunicação de dados sem fio utilizando-se a luz visível de LEDs (MARÈ e CUGNASCA, 2014).

Resumo - É crescente a demanda por canais de comunicação, impulsionada por fatores como a disseminação dos dispositivos móveis e a Internet das Coisas. Tecnologias de comunicação de dados por radiofrequência sofrem com a saturação do espectro e a parca infraestrutura disponível. Alternativas como a transmissão de dados pela luz visível (*Visible Light Communication*), apontam como complementos promissores aos demais meios de comunicação sem fio, especialmente nas grandes cidades, devido à adoção de LEDs em diversos elementos de sua infraestrutura.

A.7 Prêmio

Prêmio “Destaque de Trabalho de Doutorado” conferido no V Workshop de Pós-Graduação da Área de Concentração Engenharia de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da EPUSP (WPGE-2016), realizado na Escola Politécnica da USP em 24 de novembro de 2016.

A.8 Bolsas da Pesquisadora

Bolsa de Doutorado concedida pelo CNPq, Cota Institucional (Demanda Social), de 2014 a 2017.

Bolsa de Doutorado Sanduíche concedida pelo Projeto Brazil-Europe Erasmus Mundus, de 2016 a 2017.

O programa de doutorado possibilitou à pesquisadora atuar como monitora em aulas de laboratório das disciplinas de Laboratório de Processadores I e II, em 2015 e 2016, atividades estas pertencentes ao Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE). Nas duas ocasiões foram concedidas bolsas auxiliares.

APÊNDICE B – Quadro comparativo entre artigos e patentes referentes a sistemas de posicionamento VLC em ambientes externos e a presente proposta

Quadro 5 - Artigos e Patentes relativos a VLC

Fonte de Consulta (2011 – 2016)	Transmissor				Receptor			Determinação da posição						
	Luminária na via	Semáforo	Lanterna veículo	NE	Fotodiodo	Sensor de Imagem	NE	VLC, GPS e DGPS	VLC e Colinearidade	VLC e Coplanaridade	VLC ou GPS / Intensidade de Sinal	VLC, Ângulo Bearing e Trigonometria	VLC, GPS e GPSRS	VLC ou GPS / Erro Máximo
Artigos														
Bai <i>et al</i> (2011)		X			X				X					
Do e Yoo (2015)				X		X			X					
Do e Yoo, (2016)	X					X			X					
Kim e Jung (2016)	X		X			X			X					
Patentes														
US 7.973.819 B2 (2011)	X				X							X		
US 8188879 (2012)	X				X								X	
US 9255985 B2 (2016)				X			X				X			
US 9228840 B2 (2016)				X			X							X
SISTEMA DE CORREÇÃO DIFERENCIAL GPSIGNSS POR LUZ PARA O POSICIONAMENTO DE VEÍCULOS E PROCESSO PARA CORREÇÃO DIFERENCIAL DE POSICIONAMENTO DE VEÍCULOS nº BR 10 2016 026167-8	X							X						

Fonte: Autora

APÊNDICE C – Resumo e considerações das patentes discriminadas no APÊNDICE B

O documento US 7973819 B2⁵ (2011) descreve um aparato para determinar a posição atual de um veículo, utilizando um sistema de comunicação por luz visível. O aparato utiliza um raio de luz visível para comunicação e dados de vídeo representando uma imagem fotografada por uma câmera. Apesar do sistema de luminárias proposto no documento transmitir a posição ao veículo, o mesmo é feito com o auxílio de imagens fotografadas previamente, sendo eventualmente auxiliada por técnicas de estereoscopia. O grande diferencial da proposta desta pesquisa está no fato da comunicação ser bidirecional e possuir um receptor GPS instalado junto aos LEDs que geram o fecho de luz, calculando, em relação às coordenadas conhecidas da luminária, as correções diferenciais DGPS a cada instante para, em seguida, transmitir o vetor erro ao veículo. Este por sua vez aplicará este vetor erro ao cálculo da posição. Além disso, devido à comunicação ser bidirecional, a luminária reconhece a passagem do veículo e poderá comunicar este fato à Central de Controle e Operação (CCO) via infraestrutura de telefonia celular, por exemplo, 3G ou equivalente.

O documento US 8188879⁶ (2012) descreve um sistema de comunicação e luz de LED, incluindo ao menos um transceptor ótico que inclui um suporte de luz (poste) e um processador. Cada suporte de luz possui uma pluralidade de diodos emissores de luz e ao menos um fotodetector a ele anexado. O processador está em comunicação com os diodos emissores de luz e ao menos um fotodetector, onde o processador é construído de modo a acender ao menos um diodo emissor de luz, gerando um sinal de luz, que por sua vez inclui ao menos um pacote de dados embarcado. Ao menos um pacote de dados do sistema embarcado fornece as informações de localização do sistema de posicionamento global (GPS). Entretanto, o sistema de posicionamento apresentado neste documento difere do proposto nesta

⁵ <https://www.google.com/patents/US7973819>

⁶ [https://www.google.com/patents/US8188879?dq=US+8188879+\(2012\)&hl=ptBR&sa=X&ved=0ahUKEwievqzds9nVAhXCFJAKHW-eDsYQ6AEIJjAA](https://www.google.com/patents/US8188879?dq=US+8188879+(2012)&hl=ptBR&sa=X&ved=0ahUKEwievqzds9nVAhXCFJAKHW-eDsYQ6AEIJjAA)

pesquisa por ser baseado nas coordenadas GPS associadas a um aparato, contendo múltiplas fontes luminosas e fotodetectores. Este aparato se comunica com outras fontes luminosas (fixas ou móveis), enviando as referidas coordenadas. Entretanto, tal sistema não considera correções por DGPS. Ele considera que todos os postes serão providos de dispositivos de comunicação por luz, o que não ocorre no proposto nesta pesquisa, que considera a incorporação de sistemas de comunicação em pontos (postes) estratégicos, ou seja, onde não haja recepção do sinal de satélite. Considera ainda que todos os postes deverão ter uma considerável capacidade de armazenamento e processamento de dados, visto que realizarão o monitoramento de pontos móveis (veículos, pessoas) e poderão retransmitir suas informações para o poste adjacente (rede *mesh*). Estes fatores, comparados com a relativa simplicidade técnica da presente proposta, podem ser extremamente impactantes do ponto de vista de viabilidade econômica e implementação em escala. Além disso, é um sistema que se propõe a fazer outras operações, como o monitoramento por câmeras e a telegestão da iluminação pública, alterando a sua intensidade luminosa de acordo com a aproximação ou afastamento de veículos e pessoas, o que denota propósitos totalmente distintos da presente proposta.

O documento US 9255985⁷ (2016) relata um aparato e um método de identificação de informações de posicionamento, utilizando-se comunicação por luz visível e um GPS. O aparato inclui: um processador de sinal de GPS para recebimento do mesmo e identificação das informações de posicionamento; um seletor de GPS/luz visível para identificar intensidades de sinais providos pelo processador de sinal de GPS e pelo processador de sinal de luz visível; uma unidade de transmissão de ao menos uma informação de posicionamento provida pelos referidos processadores de sinal. O sistema proposto em tal documento e por luz visível é substitutivo, isto é, só é ativado quando o sinal do sistema GPS não é detectado com intensidade suficiente para o posicionamento. Por outro lado, na proposta desta pesquisa, o sistema por GPS permanece ativo, assim como, o por luz visível (sistemas

⁷ [https://www.google.com/patents/US9255985?dq=US+9255985+B2+\(2016\)&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwiKjMqFtNnVAhVJH5AKHZO7A9UQ6AEIJjAA](https://www.google.com/patents/US9255985?dq=US+9255985+B2+(2016)&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwiKjMqFtNnVAhVJH5AKHZO7A9UQ6AEIJjAA)

complementares). Vale ressaltar ainda, que tal documento não utiliza a técnica de correção diferencial DGPS para trazer maior precisão ao posicionamento por luz. Utiliza-se das “últimas coordenadas” recebidas de um sistema GPS, da comunicação bidirecional entre vários pontos de luz e o dispositivo móvel, de suas posições conhecidas (a partir de um servidor de posicionamento por luz visível) e de gatilhos de tempo diversos para determinar a direção em que o dispositivo móvel se desloca, a sua velocidade e a sua altitude. Ao final, essas informações são convertidas em coordenadas de posicionamento do dispositivo móvel (latitude, longitude e altitude).

O documento US 9228840⁸ (2016) refere-se a um método e aparato para a medição do posicionamento de um terminal móvel. Uma primeira posição é calculada utilizando-se um sinal de GPS. O modo de comunicação por luz visível do terminal móvel é ativado quando a primeira posição excede uma faixa predeterminada de erro. A informação de posicionamento do dispositivo de comunicação por luz visível é recebida. Uma terceira posição é calculada utilizando-se a segunda posição, que corresponde à posição prévia à primeira posição e à informação de posicionamento do dispositivo de comunicação por luz visível. Percebe-se que em tal documento, o sistema por luz visível só é ativado quando a primeira posição excede uma faixa predeterminada de erro (sistema substitutivo). Quando ativado, o sistema por luz visível busca (*broadcast*) um ou mais dispositivos adjacentes, cujas posições, enviadas ao dispositivo original, serão a base de cálculo da sua própria posição. Já na proposta desta pesquisa, o sistema por GPS permanece ativo, assim como, o por luz visível (sistemas complementares). Isso significa que os sistemas, tanto na via quanto no veículo móvel, permanecem ativos todo o tempo, pois necessitam detectar um a presença do outro sistema. Ainda na presente proposta, não há a necessidade de localização de dispositivos adjacentes para que se faça um cálculo da posição do veículo. E finalmente, vale ressaltar que o documento aqui mencionado não utiliza a técnica de correção diferencial DGPS, mas sim, a técnica do A-GPS. Esta técnica, utilizada em locais onde não há recepção direta de sinais de satélite, permite

⁸ [https://www.google.com/patents/US9228840?dq=US+9228840+B2+\(2016\)&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwj2jZeZtNnVAhWCjZAKHTaZDW0Q6AEIJjAA](https://www.google.com/patents/US9228840?dq=US+9228840+B2+(2016)&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwj2jZeZtNnVAhWCjZAKHTaZDW0Q6AEIJjAA)

que o dispositivo móvel original receba informações auxiliares de localização de satélites, fornecidas pela rede de telefonia celular (GPRS, 3G), para que então ele calcule a sua própria posição. Trata-se de um serviço prestado pelas operadoras de celular e, portanto, tarifado, o que pode impactar nos custos de implantação dessa solução.

APÊNDICE D – Medições de intensidade luminosa realizadas em túneis da capital paulista: Túnel José Roberto Fanganiello Melhem, Daher Cutait (9 de Julho) e Anhangabaú

Quadro 6 - Intensidades luminosas no Túnel José Roberto Fanganiello Melhem

Túnel	Período e local das medições					
Comprimento 360 m	Manhã (entre 8:30 e 10:00h)			Tarde (entre 17:30 e 19:00h)		
José Roberto F. Melhem	Próximo à entrada	Área Central	Outros	Próximo à entrada	Área central	Outros
	832	284	25	82	65	25
	809	285	26	81	53	24
	841	284	26	81	49	24
	863	289	26	80	47	25
	849	287	27	77	42	25
	876	288	28	81	45	25
	893	292	28	82	46	26
	873	291	28	81	44	26
	861	292	28	82	49	26
	881	283	28	80	47	25
Média	857,8	287,5	27	80,7	48,7	25,1

Fonte: Autora

Observações:

- Valores em lx
- Este túnel apresenta aberturas à luz natural, o que deve ter influenciado as tomadas da manhã.
- Ele possui iluminação a LED precária (sem manutenção).
- Os locais de medição da manhã e da tarde foram os mesmos, mas não os pontos exatos, o que pode ter sido a causa das diferenças (aparelho Testo mais ou menos alinhado às luminárias).

Figura 59 – Influência da luz natural

Fonte: Autora

Medições de intensidade luminosa realizadas em túneis da capital paulista: Túnel Daher Cutait (9 de Julho)

Quadro 7 - Intensidades luminosas no Túnel Daher Cutait (9 de Julho)

Túnel	Período e local das medições					
	Manhã (entre 8:30 e 10:00h)			Tarde (entre 17:30 e 19:00h)		
Daher Cutait	Próximo à entrada	Área Central	Outros	Próximo à entrada	Área central	Outros
	649	43	NR	1027	108	NR
	645	43	NR	1031	109	NR
	641	43	NR	1035	108	NR
	650	44	NR	1038	110	NR
	648	45	NR	1036	108	NR
	661	44	NR	1039	109	NR
	670	44	NR	1028	110	NR
	656	44	NR	1038	108	NR
	658	44	NR	1033	109	NR
	661	46	NR	1035	110	NR
Média	653,9	44	NR	1034	108,9	NR

Fonte: Autora

Observações:

- Valores em lx
- Manhã, sentido centro: comprimento 1060 m; tarde, sentido bairro: comprimento 1045m.
- Ambos possuem iluminação precária (sem manutenção), não LED.

Figura 60 – Túnel Daher Cutait sentidos centro e bairro: diferenças na iluminação interna

Fonte: Autora

Medições de intensidade luminosa realizadas em túneis da capital paulista: Túnel Anhangabaú Sentido Zona Norte

Quadro 8 - Intensidades luminosas no Túnel Anhangabaú (Sentido Zona Norte)

Túnel	Período e local das medições					
	Manhã (entre 8:30 e 10:00h)			Tarde (entre 17:30 e 19:00h)		
Anhangabaú	Próximo à entrada	Área Central	Outros	Próximo à entrada	Área central	Outros
	183	158	NR	NR	181	NR
	184	157	NR	NR	182	NR
	182	158	NR	NR	182	NR
	184	159	NR	NR	177	NR
	184	161	NR	NR	174	NR
	184	159	NR	NR	175	NR
	186	159	NR	NR	174	NR
	187	159	NR	NR	183	NR
	186	158	NR	NR	184	NR
	187	159	NR	NR	183	NR
Média	184,7	158,7	NR	NR	179,50	NR

Fonte: Autora

Observações:

- Valores em lx
- Manhã e tarde no sentido Zona Norte: comprimento 544 m.
- Ambos possuem iluminação a LED, em bom estado.

Figura 61 – Túnel sentido Zona Norte

Anhangabaú

Fonte: Autora

Medições de intensidade luminosa realizadas em túneis da capital paulista: Túnel Anhangabaú Sentido Zona Sul

Quadro 9 - Intensidades luminosas no Túnel Anhangabaú (Sentido Zona Sul)

Túnel	Período e local das medições					
	Manhã (entre 8:30 e 10:00h)			Tarde (entre 17:30 e 19:00h)		
Anhangabaú	Próximo à entrada	Área Central	Outros	Próximo à entrada	Área central	Outros
	NR	82	NR	NR	58	NR
	NR	81	NR	NR	55	NR
	NR	81	NR	NR	55	NR
	NR	80	NR	NR	54	NR
	NR	77	NR	NR	55	NR
	NR	81	NR	NR	55	NR
	NR	82	NR	NR	55	NR
	NR	81	NR	NR	52	NR
	NR	82	NR	NR	53	NR
	NR	80	NR	NR	53	NR
Média	NR	80,7	NR	NR	54,5	NR

Fonte: Autora

Observações:

- Valores em lx
- Manhã e tarde no sentido Zona Sul: comprimento 582 m.
- Ambos possuem iluminação a LED, em bom estado.

Figura 62 - Túnel Anhangabaú sentido Zona Sul

Fonte
autora

APÊNDICE E – Medições de intensidade luminosa realizadas em terminais de ônibus da capital paulista: Lapa, Barra Funda e Pinheiros.

Quadro 10 - Intensidades luminosas nos terminais (média de 10 leituras realizadas na área central dos mesmos - lx)

Terminal	Período das medições	
(tipo de cobertura)	Manhã	Noite
Lapa	410	16
(mista com translúcido)		
Barra Funda	252	---
(simples de concreto)		
Pinheiros	698	330
(mista com translúcido)		

Fonte: Autora

Figura 63. Terminais rodoviários

Fonte: Autora

APÊNDICE F - Protótipo em Escala Real - Proposta para Pesquisa Futura

Sugere-se como elemento transmissor a luminária a LED Maestra II (ILUMATIC S/A, 2014), que possui uma potência de 150W, LED branco e é dimerizável (Figura 64).

Figura 64 - Luminária a LED Maestra II 150W dimerizável

Fonte: (ILUMATIC S/A, 2014)

Descreve-se na Figura 65 o esquema elétrico do circuito transmissor.

Figura 65 – Esquema elétrico do circuito transmissor (protótipo em escala real)

Fonte: (Andrei Ferreira, 2016)

No Quadro 11 encontra-se a relação dos componentes propostos.

Quadro 11 - Componentes propostos para o circuito elétrico do transmissor

Componente	Especificação	Quantidade
Transistor	MOSFET IRF740	1
Resistor	1 k Ω	1

Fonte: Autora

Um microcontrolador dotado de um software proprietário (desenvolvido em linguagem C++) será responsável pela modulação (alteração do estado dos LEDs da luminária Maestra, com a transmissão de códigos binários), valendo-se do seu *driver*, bem como, pela demodulação destes sinais após a sua recepção.

Os testes realizados utilizando-se um microcomputador Raspberry PI 2 mostraram que este equipamento não atende os requisitos de desempenho necessários à esta aplicação. Cogita-se a realização de um estudo futuro utilizando-se um circuito digital dedicado, utilizando-se um microcontrolador da família PIC (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2015).

Apresenta-se a seguir o diagrama de blocos correspondente ao circuito receptor proposto (Figura 66).

Figura 66 - Diagrama de blocos do circuito receptor

Fonte: (Andrei Ferreira e Renata Marè, 2016)

Descrição do diagrama de blocos do circuito receptor:

Filtro ótico passa-banda

Sugere-se a utilização de um filtro ótico passa-banda 450 nm (azul) no protótipo, visando-se a minimizar as interferências causadas pelas luzes infravermelha e ultravioleta presentes no espectro solar, cujo pico de irradiação se encontra na faixa visível (Figura 67).

Figura 67 – Espectro da luz solar

Fonte: (Adaptado de (KUMAR, 2011))

Embora este filtro também impeça a passagem de parte da luz visível gerada pelo transmissor, os seus benefícios frente aos ruídos de fundo são superiores, inclusive devido à cor azul, correspondente ao comprimento de onda principal na luz gerada pelos LEDs brancos da luminária Maestra. Na Figura 68, apresenta-se a distribuição espectral relativa correspondente a cada cor de LED. Pode-se observar que, para LED branco, destacam-se os picos para comprimentos de onda 450 nm e 560 nm.

Figura 68 – Distribuição espectral relativa por cor de LED

Fonte: (Adaptado de (LEDVANCE, 2016))

Fotodiodo PIN

Como elemento receptor, sugere-se o fotodiodo SFH2701 (OSRAM, 2008), de alta sensibilidade à luz visível e alta velocidade. Ele é recomendado para aplicações entre 400 e 1050 nm, com pico de sensibilidade aos 800 nm, próximo ao espectro de infravermelho, característica que, ao ar livre, pode ser contornada com a utilização de um filtro azul.

Amplificador operacional em transimpedância

O amplificador operacional em transimpedância converte a corrente gerada pelo fotodiodo em tensão com ganho, ou seja, tensão amplificada.

Filtro passa-banda

O filtro passa-banda (passa-alta), composto por resistor e capacitor (RC), permite uma filtragem dos sinais que possuem frequência abaixo à sua frequência de corte, atenuando-os.

Amplificador operacional comparador

O amplificador operacional comparador compara a diferença de

potencial entre os terminais de alimentação (entrada), gerando um sinal de saída que é função deste resultado.

Propõe-se ainda a utilização de um limitador de tensão, a fim de respeitar-se um eventual limite máximo de operação do microcontrolador (Figura 69).

Figura 69 - Esquema elétrico do circuito receptor

Fonte: (Andrei Ferreira, 2016)

No Quadro 12 encontra-se a relação dos componentes propostos.

Quadro 12 - Componentes propostos para o circuito elétrico do receptor

Componente	Especificação	Quantidade
Fotodiodo	SFH2701	1
Amplificador operacional	OPA355NA	2
Bateria	9 V	1
Pilha	AA 1,5 V	1
Regulador de tensão	7805C 5 V	1
Capacitor eletrolítico	10 μ F	1
Capacitor	1 nF	1
Capacitor	33 pF	1
Potenciômetro	500 k Ω	1
Resistor	5 k Ω	1
Resistor	1 k Ω	1
Resistor	100 k Ω	2

Fonte: Autora

Observa-se na Figura 70 o circuito efetivamente desenvolvido e aplicado em testes preliminares.

Figura 70 – Foto do circuito receptor desenvolvido para o protótipo em escala real

Fonte: (Andrei Ferreira, 2016)

ANEXO A – Estudo luminotécnico da Luminária Maestra 150 realizado pelo fabricante

Trecho Típico - "23 de maio"

Características:

Via= 12m, com 5 faixas;
Luminária LED Maestra 150W
Altura de instalação= 10m
Projeção de braço= 1m
Ângulo da Luminária= 5°
Entre postes= 30m
Distribuição: dois lados da rua, frente a frente;

Resultados:

E médio= 23lx Uniformidade= 0.62

Solicitante: Renata Maré
Cliente:
Contato:
Tel.:
Projeto N°:

Data: 30.10.2015
Editor(a): Aislan de Moraes

Trecho Típico - "23 de maio"

30.10.2015

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
São Paulo-SPEditor(a) Aislan de Moraes
Telefone 55 11 2149-0243
Fax 55 11 2149-0244
e-Mail aislan@ilumatic.com.br**Índice**

Trecho Típico - "23 de maio"	
Página de rosto do projecto	1
Índice	2
Ilumatic - Maestra 150W(lentes invertidas)	
Maestra 150W(lentes invertidas)	
CDL (polar)	3
Rua 2	
Dados de planeamento	4
Lista de luminárias	5
Representação 3D	6
Representação de cores falsas	7
Campos de avaliação	
Campo de avaliação Pista de rodagem 2	
Linhas isográficas (E)	8
Níveis de cinzento (E)	9
Gráfico de valores (E)	10

Trecho Típico - "23 de maio"

30.10.2015

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
São Paulo-SPEditor(a) Aislan de Moraes
Telefone 55 11 2149-0243
Fax 55 11 2149-0244
e-Mail aislan@ilumatic.com.br**Ilumatic - Maestra 150W(lentes invertidas) / CDL (polar)**

Luminária: Ilumatic - Maestra 150W(lentes invertidas)

Lâmpadas: 1 x Placa Maestra 03541 Número 02 com 8 lentes 27/10/2014

Trecho Típico - "23 de maio"

30.10.2015

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
São Paulo-SPEditor(a) Aislan de Moraes
Telefone 55 11 2149-0243
Fax 55 11 2149-0244
e-Mail aislan@ilumatic.com.br

Rua 2 / Dados de planeamento

Perfil da rua

Passeio 1	(Largura: 2.000 m)
Pista de rodagem 2	(Largura: 12.000 m, Quantidade das faixas de rodagem: 5, Pavimento: R3, q0: 0.070)
Faixa central 1	(Largura: 1.000 m, Altura: 0.000 m)
Pista de rodagem 1	(Largura: 12.000 m, Quantidade das faixas de rodagem: 5, Pavimento: R3, q0: 0.070)
Passeio 2	(Largura: 2.000 m)

Factor de manutenção: 0.90

Distribuições de luminárias

Luminária:	Ilumatic - Maestra 150W(lentes invertidas)	Valor máximo da potência luminosa
Corrente luminosa (Luminária):	13841 lm	a 70°: 376
Corrente luminosa (Lâmpadas):	13841 lm	cd/klm
Potência luminosa:	153.5 W	a 80°: 28 cd/klm
Distribuição:	dos dois lados frente a frente	a 90°: 1.39
Distância entre postes:	30.000 m	cd/klm
Altura de montagem (1):	10.000 m	Em todas as direcções que, em uma luminária correctamente instalada, formam o ângulo dado com as verticais inferiores.
Altura do ponto de luz:	10.000 m	A distribuição cumpre a classe de potência luminosa G3.
Pendor (2):	0.700 m	A distribuição cumpre a classe de índice de ofuscamento D.6.
Inclinação do braço extensor (3):	5.0 °	
Comprimento do braço extensor (4):	1.000 m	

Trecho Típico - "23 de maio"

30.10.2015

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
São Paulo-SPEditor(a) Aislan de Moraes
Telefone 55 11 2149-0243
Fax 55 11 2149-0244
e-Mail aislan@ilumatic.com.br

Rua 2 / Lista de luminárias

Ilumatic - Maestra 150W(lentes invertidas)
 N° do artigo: -
 Corrente luminosa (Luminária): 13841 lm
 Corrente luminosa (Lâmpadas): 13841 lm
 Potência luminosa: 153.5 W
 Classificação de luminárias conforme CIE: 100
 Código de Fluxo (CIE): 40 78 98 100 100
 Lâmpada (s): 1 x Placa Maestra 03541 Número
 02 com 8 lentes 27/10/2014 (Factor de correcção
 1.000).

É favor escolher uma
 imagem de luminária em
 nosso catálogo de
 luminárias.

Trecho Típico - "23 de maio"

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
São Paulo-SP

30.10.2015

Editor(a) Aislan de Moraes
Telefone 55 11 2149-0243
Fax 55 11 2149-0244
e-Mail aislan@ilumatic.com.br**Rua 2 / Representação 3D**

Trecho Típico - "23 de maio"

30.10.2015

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
São Paulo-SP

Editor(a) Aislan de Moraes
Telefone 55 11 2149-0243
Fax 55 11 2149-0244
e-Mail aislan@ilumatic.com.br

Rua 2 / Representação de cores falsas

lx

Trecho Típico - "23 de maio"

30.10.2015

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
São Paulo-SP

Editor(a) Aislan de Moraes
Telefone 55 11 2149-0243
Fax 55 11 2149-0244
e-Mail aislan@ilumatic.com.br

Rua 2 / Campo de avaliação Pista de rodagem 2 / Linhas isográficas (E)

Valores em Lux, Escala 1 : 258

Grelha: 10 x 15 Pontos

 E_m [lx]
23

 E_{min} [lx]
14

 E_{max} [lx]
38

 E_{min} / E_m
0.629

 E_{min} / E_{max}
0.374

Trecho Típico - "23 de maio"

ilumatic®

30.10.2015

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

 Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
 São Paulo-SP

 Editor(a) Aislan de Moraes
 Telefone 55 11 2149-0243
 Fax 55 11 2149-0244
 e-Mail aislan@ilumatic.com.br

Rua 2 / Campo de avaliação Pista de rodagem 2 / Níveis de cinzento (E)

Escala 1 : 258

Grelha: 10 x 15 Pontos

 E_m [lx]
23

 E_{min} [lx]
14

 E_{max} [lx]
38

 E_{min} / E_m
0.629

 E_{min} / E_{max}
0.374

Trecho Típico - "23 de maio"

30.10.2015

Ilumatic S/A - Iluminação e Eletrometalúrgica

Rua Telmo Coelho Filho, 120 - Vila Albano - CEP 05543-020
São Paulo-SPEditor(a) Aislan de Moraes
Telefone 55 11 2149-0243
Fax 55 11 2149-0244
e-Mail aislan@ilumatic.com.br**Rua 2 / Campo de avaliação Pista de rodagem 2 / Gráfico de valores (E)**

Valores em Lux, Escala 1 : 258

Nem todos os valores calculados podem ser representados.

Grelha: 10 x 15 Pontos

 E_m [lx]
23 E_{min} [lx]
14 E_{max} [lx]
38 E_{min} / E_m
0.629 E_{min} / E_{max}
0.374

ANEXO B – Estudo Luminotécnico da Luminária OledComm LiFiBeacon realizado pelo IEE / USP

Measurement Report - Spectral Analysis

Measurement Conditions

Analysis range: 296,6 - 1105 nm
 Integration time: 1002 ms
 Averages: 1
 Density filter: none
 Signal Level: 38 % 11867 Counts

Results

Integrals

Illuminance 8,019 lx
 Irradiance 25,96 mW/m²

Color Coordinates

x: 0,31123 u: 0,19996 u': 0,19996
 y: 0,32069 v: 0,30906 v': 0,46359

Peak WL: 448,60 nm
 Centroid WL: 540,69 nm
 Dominant WL: 483,98 nm
 Purity: 0,085
 width50%: 19,96 nm
 CCT: 6660 K
 CRI: 74,1

Comment: luminária led geolifi 220v

Filename: V:\BKP\Relatórios_2016\Luminária Led GEOLiFi - Andrey\GONIO\Spectrum.ISD

Date: 02/06/2016 18:01:57

Measurement report - Goniometer Phi/Theta Sequence

General Informations

Sequencename: Luminaria led geolifi 220v 90 @ 0,5 36 Cplans com cortina(ens
Goniometer:
Reference Phi:
Reference Theta: 90..0° @ 0,5°
Theta ranges: 90..0° @ 0,5°
Phi count: 36
Distance probe: 3145 mm

Measurement conditions

Analysis range:
Averages:
Density filter:

Radiation characteristic

Results

Active profile:
Measurement variable: Calculated Luminous Intensity
Width 50 (from center): 34,12°
Width 50 (from edges): 34,12°
Angular centroid: 1,86°

Comment: luminária led geolifi 220v

Filename: V:\BKP\Relatórios_2016\Luminária Led GEOLiFi - Andrey\GONIO\Luminaria led geolifi 220v 90 @ 0,5 :
Date: 02/06/2016 18:17:27