
Índice

RESUMO	A
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	- 1 -
1.1 - INTRODUÇÃO.....	- 1 -
1.2 - ENQUADRAMENTO	- 4 -
1.3 - OBJETIVOS	- 12 -
1.4 - ESTRUTURA DA TESE.....	- 19 -
CAPÍTULO 2 – SISTEMA ITS	- 21 -
2.1 - INTRODUÇÃO.....	- 21 -
2.2 - BREVE VISÃO GERAL DO ITS.....	- 22 -
2.2.1 - <i>Comunicação Veicular</i>	- 24 -
2.2.2 - <i>Serviços importantes no ambiente veicular</i>	- 24 -
2.3 - ARQUITETURA ITS E INFRAESTRUTURAS DE COMUNICAÇÃO	- 28 -
2.3.1 - <i>Arquitetura ITS</i>	- 28 -
2.3.2 - <i>Arquitetura de comunicação ITS</i>	- 30 -
2.4 - RÁDIO E VLC COMPARAÇÃO DE SISTEMAS.....	- 31 -
2.5 - USO DE VLC EM ITS	- 32 -
2.5.1 - <i>VLC em semáforos LEDs nas ITS</i>	- 34 -
2.5.2 - <i>Arquitetura do sistema VLC</i>	- 35 -
2.5.3 - <i>Transmissor VLC</i>	- 37 -
2.5.4 - <i>Recetor VLC</i>	- 38 -
2.5.5 - <i>Canal VLC</i>	- 39 -
2.6 - REFERÊNCIAS	- 40 -
CAPÍTULO 3 – VLC – MODELO EMISSOR E CARACTERIZAÇÃO DO CANAL	- 43 -
3.1 - INTRODUÇÃO.....	- 43 -
3.2 - PERSPETIVA DA VISIBILIDADE HUMANA	- 44 -
3.3 - SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO USANDO LUZ VISÍVEL.....	- 44 -
3.4 - HISTÓRIA DO VLC.....	- 45 -
3.5 - NOVAS TENDÊNCIAS NOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO	- 49 -
3.6 - EXEMPLOS APLICAÇÕES VLC.....	- 51 -
3.7 - DESCRIÇÃO DO EMISSOR.....	- 54 -
3.8 - DÍODOS EMISSORES DE LUZ (LED) PARA VLC.....	- 55 -
3.9 - REFERÊNCIAS	- 60 -
CAPÍTULO 4 – AMBIENTE LABORATORIAL.....	- 63 -

4.1	- CARACTERIZAÇÃO OPTOELETRÓNICA	- 63 -
4.2	- DESMULTIPLEXAGEM DO SINAL DE FOTO-CORRENTE.....	- 65 -
4.3	- ESTUDO DOS CANAIS R & G COM E SEM POLARIZAÇÃO ÓTICA.....	- 67 -
4.4	- ESTUDO DO CANAL VERMELHO (R).....	- 67 -
4.5	- ESTUDO DO CANAL VERDE (G)	- 70 -
4.6	- REFERÊNCIAS	- 74 -
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....		- 77 -
5.1	- CONCLUSÕES	- 77 -
5.2	- TRABALHO FUTURO.....	- 78 -
5.2.1	<i>Implementação do VLC.....</i>	<i>- 78 -</i>
5.2.2	<i>Desafios tecnológicos</i>	<i>- 79 -</i>

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema geral de uma rede de telecomunicações.....	- 1 -
Figura 2 - Utilizadores de internet por cada 100 habitantes	- 2 -
Figura 3 – Serviços disponíveis na comunicação 3G.....	- 6 -
Figura 4 – Comparação de débito binário de várias tecnologias	- 8 -
Figura 5 – Diferença de arquiteturas.....	- 9 -
Figura 6 – Evolução técnica do LED	- 11 -
Figura 7 – O LED na perspetiva ecológica.....	- 11 -
Figura 8 – Aplicação Indoor.....	- 13 -
Figura 9 – Sistema de som musical baseado em cores RGB.....	- 14 -
Figura 10 – Sistema ID baseado em luz visível	- 15 -
Figura 11 – Infraestrutura fixa do sistema ID.....	- 15 -
Figura 12 – Estrutura do equipamento móvel.....	- 16 -
Figura 13 – Comunicação carrinho compras – Ponto de venda.....	- 17 -
Figura 14 – Aplicação Outdoor	- 18 -
Figura 15 – Exemplo de utilização da comunicação VLC associada a semáforos.....	- 18 -
Figura 16 – Modelo de Referência para ITS.....	- 29 -
Figura 17 – Arquitetura de Comunicação ITS	- 31 -
Figura 18 – Cenário de aplicação.....	- 33 -
Figura 19 – Cenário de integração de semáforos com arquiteturas ITS	- 35 -
Figura 20 – Espectro de frequências.....	- 36 -
Figura 21 – Representação do diagrama de blocos do transreceptor	- 36 -
Figura 22 – Cenário de link com LoS (linha de vista) e link difuso	- 39 -
Figura 23 – O “ <i>photophone</i> ”	- 46 -
Figura 24 – Evolução do desempenho e custo para LEDs vermelhos disponíveis comercialmente ...	- 48 -
Figura 25 – Luminância de várias fontes de luz	- 50 -
Figura 26 – Exemplos de aplicação VLC para exterior	- 52 -
Figura 27 – Exemplos de aplicação VLC para interior.....	- 53 -
Figura 28 – Diagrama de blocos de um emissor VLC para um semáforo.....	- 54 -
Figura 29 – Diagrama da secção transversa da estrutura NC5.....	- 64 -
Figura 30 – Diagrama da montagem para caracterizar o dispositivo	- 66 -
Figura 31 – Foto-corrente do canal vermelho com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.	- 68 -
Figura 32 – Foto-corrente do canal vermelho com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho	- 68 -
Figura 33 – Foto-corrente do canal vermelho com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e	

sem fundo.	- 69 -
Figura 34 – Foto-corrente do canal vermelho com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.	- 70 -
Figura 35 – Foto-corrente do canal verde com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.	- 71 -
Figura 36 – Foto-corrente do canal verde com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.	- 71 -
Figura 37 – Foto-corrente do canal verde com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.	- 72 -
Figura 38 – Foto-corrente do canal verde com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.	- 73 -

Lista de Tabelas

TABELA 1 – SERVIÇOS ASSOCIADOS AO ITS.....	- 27 -
TABELA 2 – EFICIÊNCIA, TEMPO DE VIDA DE FONTES DE LUZ BRANCA CONVENCIONAL E SEMICONDUTOR	- 50 -
TABELA 3–CARACTERÍSTICAS ÓTICAS DOS HB-LEDS	- 57 -
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS HB-LEDS.....	- 58 -

Lista de acrónimos e termos:

Acrónimo / termo	Designação
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems</i>
APD	<i>Avalanche PhotoDiode</i>
a-Si:H	Silício Amorfo Hidrogenado
a-SiC:H	Siliceto de Carbono Amorfo Hidrogenado
AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
DEMUX	<i>Demultiplexer</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FOV	<i>Field of View</i>
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
GPS	<i>Global Positioning Systems</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HB-LEDs	<i>High Bright LEDs</i>
HDTV	<i>High-Definition Television</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
I2V	<i>Infrastructure-to-Vehicle</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IM/DD	<i>Intensity modulation/direct detection</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IP-TV	<i>Internet Protocol Television</i>

IPv4	<i>Internet Protocol version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
IR	<i>Infra Red</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISP	<i>Information Service Provider</i>
ITO	<i>Indium Tin Oxide</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LDT	<i>Luminance Difference Threshold</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LoS	<i>Line-of-Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MANET	<i>Mobile Ad-hoc Networks</i>
MUX	<i>Multiplexer</i>
NRZ	<i>Non-Return to Zero</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
OBU	<i>On-Board Units</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OOK	<i>On-Off keying</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PECVD	<i>Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition</i>
PIN	<i>Positive-Intrinsic-Negative</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
POF	<i>Plastic Optical Fiber ou Polymeric Optical Fiber</i>
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>

RF	<i>Radio Frequency</i>
RGB	<i>Red, Green, and Blue</i>
RSU	<i>Road Side Units</i>
RVC	<i>Roadside-to-Vehicle Communication</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SRVC	<i>Sparse RVC</i>
TDM	<i>Time-Division Multiplexing</i>
UMB	<i>Ultra Mobile Broadband</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
URVC	<i>Ubiquitous RVC</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	<i>Ultra Violeta</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
VANET	<i>Vehicular Ad-hoc Network</i>
VC	<i>Vehicular Communications</i>
VIDAS	<i>Visible light communication for advanced Driver Assistant Systems</i>
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
VOIP	<i>Voice Over Internet Protocol</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>
WWDM	<i>Wide Wavelength Division Multiplexing</i>

Resumo

Os sistemas de telecomunicações evoluíram muito desde a antiguidade e atualmente, praticamente em qualquer local, existe a possibilidade de comunicar usando diferentes tecnologias, fazendo que cada vez mais pessoas queiram ter acesso à informação de uma maneira rápida e cómoda. Esta necessidade fez que as redes de telecomunicações se expandissem para poder fornecer vários serviços, entre os quais se destacam os serviços de voz, dados em Alta Velocidade e serviços de vídeo e voz (videoconferência);

As redes de telecomunicações tornaram-se mais complexas originando o aparecimento de muitas tecnologias de acesso sem fios, baseado em RF (Rádio Frequência): GSM/Wap, 3G / UMTS, LTE, Wireless LAN 802.11, Wimax e Ultra Wide Band. Este tipo de acesso sem fios promove mobilidade e maior comodidade aos seus utilizadores, não sendo de estranhar que os sistemas RF proliferam entre as tecnologias mais usadas a nível comercial, tornando esta tecnologia cada vez mais acessível aos utilizadores e ganhando popularidade face a outros sistemas. Com um cada vez maior número de utilizadores a usar este tipo de tecnologia, surgiu o problema do espectro radiofónico estar cada vez mais preenchido, não havendo disponibilidade para mais operadores ou fornecedores de serviço.

Para colmatar a escassez de espectro, está a ser desenvolvido um sistema de comunicação usando luz visível, o qual foi batizado por *Visible Light Communication* (VLC).

O VLC é um sistema de comunicação usando luz visível, cuja transmissão é feita no comprimento de onda dos 400nm até aos 700nm. Para além de comunicação, este sistema poderá ser usado em conjunto com sistemas de iluminação a LEDs, sem problemas para a saúde pública.

Outra questão que preocupa o quotidiano é o aumento da quantidade de viaturas nas vias rodoviárias e essas viaturas são cada vez mais velozes, aumentando a probabilidade de acidentes e por sua vez aumenta a taxa de sinistralidade rodoviária. Os atuais sistemas de controlo de tráfego estão a tornar-se obsoletos e ineficazes para combater essa sinistralidade, sendo necessário desenvolver novos mecanismos, inteligentes e autónomos, de controlo de tráfego. Com base no exposto, está a ser desenvolvido um sistema de transporte inteligente, conhecido como *Intelligent Transportation Systems* (ITS). Este sistema é inteligente com cálculo automatizado, usando as tecnologias da informação e comunicação para transportes terrestres e infraestruturas de modo a melhorar a segurança, confiabilidade, eficiência e qualidade das vias rodoviárias.

Como este sistema necessita de infraestruturas de comunicação e tendo como problemática a falta de espectro, esta tese propõe-se a estudar a viabilidade da utilização do sistema de comunicação VLC nas infraestruturas ITS quando aplicada a semáforos a LEDs. Foi analisada a estrutura do sistema ITS e quais os fatores condicionantes do uso da comunicação VLC, nomeadamente alcance, taxa de transmissão e facilidade de implementação nas infraestruturas existentes. Foi descrito um modelo genérico do emissor e recetor de um sistema VLC, explicando-se qual a aplicabilidade no seio automóvel.

Conclui-se que o uso de VLC em semáforos a LEDs é viável uma vez que a tecnologia LED está a avançar a um ritmo elevado e como não depende de ondas de rádio, é mais seguro para a saúde. Quando associada esta tecnologia ao sistema de iluminação rodoviária, será possível criar um sistema de rede ubíqua. No entanto, será necessário proceder a mais estudos, nomeadamente a nível da ótica, no sentido de maximizar o rendimento dos LEDs, de modo a que se consiga um maior alcance e taxas de transmissão mais elevadas. Igualmente, verifica-se a necessidade de se proceder à criação de protótipos de modo a testar os diversos componentes emissor-recetor em virtude de não ser possível simular todo o sistema, usando somente as informações disponibilizadas pelos fabricantes dos componentes eletrónicos.

Palavras-chave: *Visible Light Communication*, LED, sistemas de transporte inteligentes, comunicações veiculares, Car2Car Communication Consortium, Ubiquitous Road to Vehicle Communication

Capítulo 1 - Introdução

1.1- Introdução

Os sistemas de telecomunicações evoluíram muito desde que foi inventado o primeiro mecanismo de comunicação. Embora seja difícil indicar com precisão quando nasceu o primeiro sistema de telecomunicações, a invenção do telefone é com certeza o marco mais importante e mais conhecido no mundo das telecomunicações. Na altura pretendia-se transmitir sinais sonoros (essencialmente voz) de um lado para o outro, usando como meio de transmissão um cabo de cobre numa ligação ponto-a-ponto. Com o crescimento desta estrutura, houve necessidade de ampliar toda a estrutura para todo o Mundo. No entanto, a criação de um sistema ponto-a-ponto fixo não era viável, pelo que o então simples cabo de cobre era agora uma rede de comutação extensa. Com o passar do tempo, a rede de comunicações cresceu, crescendo igualmente a quantidade de serviços passíveis de ser fornecidos aos clientes. Não era só voz que se fornecia como serviço; passou a ser possível transmitir folhas escritas de um local para outro (fax), dando origem à introdução de transmissão de dados. Essa transmissão de dados continuou-se a desenvolver, passando a ser fornecido serviço de *Internet*, como atualmente conhecemos. A rede de comunicações expandiu-se de tal maneira que a simples ligação ponto-a-ponto passou a ser uma rede complexa (**Figura 1**):

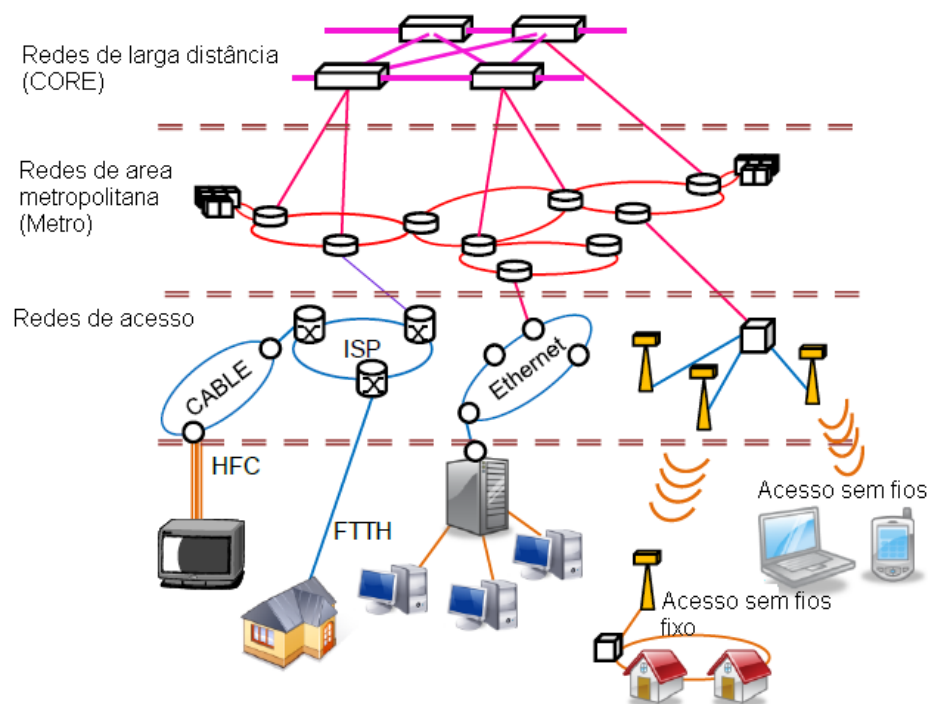


Figura 1 – Esquema geral de uma rede de telecomunicações

Da mesma maneira como no passado, este serviço continuou-se a desenvolver, havendo cada vez mais assinantes de serviços de dados.

A procura e a necessidade das tecnologias da informação tem tido uma evolução exponencial ao longo dos tempos, e cada vez mais os utilizadores são mais exigentes. No decorrer dos tempos os utilizadores habituaram-se a obter informação sempre atualizada ao segundo e cada vez mais existe a necessidade de comunicação.

As tecnologias de telecomunicações melhoram as possibilidades de contacto entre os vários agentes económicos, independentemente da sua localização, uma vez que facilitam o acesso à informação, proporcionando, ainda, novas oportunidades a nível da atividade económica e do desenvolvimento cultural e social. Este desenvolvimento leva, por seu lado, a que haja um aumento na procura de novos serviços e aplicações de forma a dar respostas à necessidade de comunicar em tempo real (**Figura 2**). Este aumento na procura tornou-se num fator importante para o desenvolvimento das novas tecnologias de acesso à informação, estimulando a instalação e desenvolvimento de novas infraestruturas, para que sejam atingidas as necessidades dos utentes.

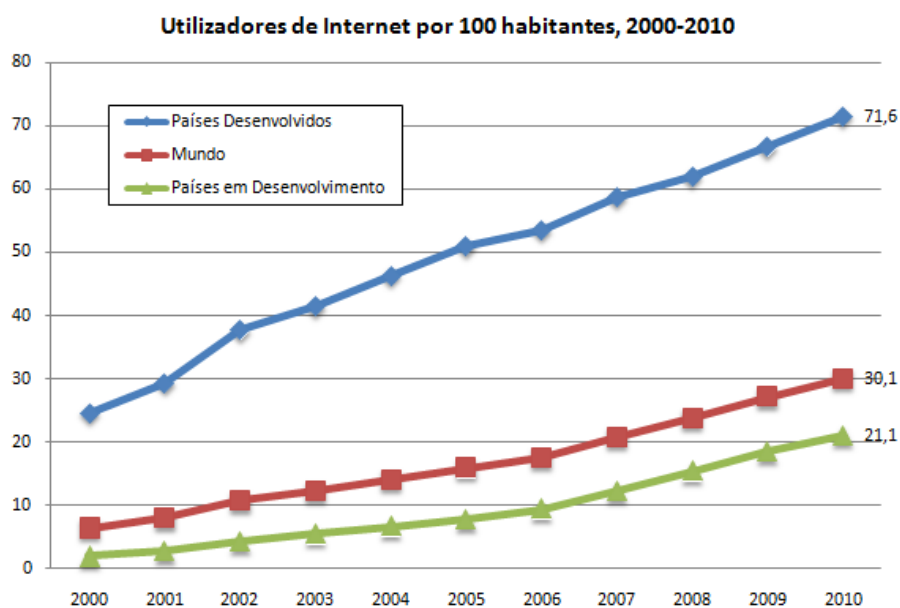


Figura 2 - Utilizadores de internet por cada 100 habitantes

(Fonte: Adaptado ITU)

Com o aumento massivo de diversos equipamentos baseados em Rádio Frequência (RF), as transmissões sem fios tornaram-se bastantes populares entre os utentes, desenvolvendo uma nova necessidade: a transmissão de alto débito sem fios. Existem diversas tecnologias que permitem essa

transmissão de alto débito, como é o caso do sistema GSM, GPRS, 3G/LTE, *Wimax* e LTE (entre outras), no entanto é necessário a aquisição de equipamentos específicos para essas tecnologias, sendo necessário criar infraestruturas, nomeadamente a instalação de antenas de transmissão. Igualmente, para que se possa realizar uma transmissão de alto débito, é necessária uma grande quantidade de espectro rádio eletromagnético. Essa demanda por espectro provocou uma sobre lotação de alocação de recursos RF, impedindo a introdução de novas tecnologias nesse mesmo espectro, aliada ao facto de que certas porções desse mesmo espectro encontrar-se licenciado, não sendo possível o seu uso, a não ser que seja o dono/proprietário.

Sendo assim, para que o utilizador final possa fazer uso das redes sem fios, é necessário que os equipamentos envolvidos na transmissão tenham que operar dentro da gama da banda não licenciada, e uma vez que existe cada vez mais utilizadores com este tipo de transmissão, é perfeitamente normal constatar que o espectro utilizado passou a ser cada vez mais sobrecarregado, levando com isso à redução dos mencionados débitos de transmissão.

Para solucionar esta temática das redes sem fios pessoais (conhecidas como redes WPAN, *Wireless Personal Area Network*), houve necessidade de produção de um novo sistema de comunicação sem fios que não utilize espectro RF mas que ao mesmo tempo permita a comunicação à distância sem fios, mantendo ou aproximando-se aos débitos de transmissão atualmente em uso.

A solução encontrada passa pela utilização de emissores e recetores que operam na região da luz visível. Este tipo de comunicação denomina-se por “*Visible Light Communication*” (VLC).

Com este tipo de tecnologia, é possível efetuar uma transmissão de dados usando somente luz visível que é pulsada de acordo com os dados a transmitir. Este tipo de transmissão ainda se encontra pouco desenvolvida mas já existem diversas experiências e protótipos utilizando a comunicação VLC.

Além das comunicações, a segurança de um modo geral, é também uma preocupação do ser humano que precisa de se sentir seguro em todos os casos. Uma das situações em que a preocupação pela segurança é o maior desafio de todos, está no sistema rodoviário.

São utilizadas diversas formas de comunicação de segurança num ambiente rodoviário, recorrendo maioritariamente a sistemas visuais (placas de sinalização, sistemas de iluminação auxiliar, painéis luminosos eletrónicos e semáforos).

O semáforo elétrico é sem dúvida um dos elementos fundamentais numa cidade com elevada quantidade de viaturas rodoviárias e são eles que gerem toda uma rede de circulação, evitando assim engarrafamentos ou acidentes. No entanto, os semáforos são equipamentos com uma “inteligência limitada”, sendo necessário a ação humana para configuração desses semáforos de modo a otimizar a circulação dos utentes das vias rodoviárias.

1.2– Enquadramento

Existem diversos tipos de redes e tecnologias sem fios distribuídas por diferentes tipos de famílias de redes baseadas numa escala geográfica de abrangência, sendo essas as redes:

- WPAN, *Wireless Personal Area Network*: Área “pessoal”, i.e., de curto alcance (normalmente até 10 metros), servindo principalmente a ligação de periféricos com tecnologias sem fios que atingem velocidades de 2 Mbit/s e.g., *Bluetooth*), a várias centenas de megabits por segundo (e.g., UWB9).
- WLAN, *Wireless Local Area Network*: Servem mais aplicações que as WPAN, cobrindo áreas maiores, normalmente de 30 a 500 metros, atingem centenas de megabits por segundo e podem agregar várias WPAN.
- WMAN, *Wireless Metropolitan Area Network*: Normalmente agregam várias redes WLAN atingindo dimensões na ordem de várias dezenas de quilómetros, cobrindo cidades inteiras. As tecnologias sem fios emergentes permitem que estas redes atinjam (sem o auxílio de redes LAN) dezenas de megabits por segundo.
- WWAN, *Wireless Wide Area Network*: É a rede que cobre a maior área geográfica, interligando as restantes redes de categoria menor atingindo centenas, ou mesmo milhares de quilómetros. As tecnologias celulares, como GSM/3G, são exemplos de tecnologias WWAN.

As tecnologias de redes sem fios podem ser classificadas em cinco grandes categorias de rede, sendo:

- **Sistemas celulares móveis:** A necessidade de mobilidade dos utilizadores do telefone fixo levou à criação dos sistemas celulares móveis. Este tipo de sistema permite o tráfego de voz sem qualquer restrição de deslocação do utilizador que transporta o equipamento terminal, enquanto este estiver dentro de uma das células da rede móvel. Para permitir uma larga área

de cobertura e para suportar um elevado número de utilizadores, a rede é organizada por células. Uma vez que a potência de sinal decresce com a distância, células suficientemente distantes podem reaproveitar as frequências eletromagnéticas disponíveis sem que haja interferência relevante. Os sistemas celulares móveis encontram-se em constante expansão melhorando o débito. Atualmente não suportam apenas tráfego de voz, mas também conteúdos multimédia e tráfego de dados. Exemplos desses sistemas são as tecnologias GSM e UMTS;

- **Acesso Fixo sem Fios:** À semelhança dos sistemas celulares móveis, o acesso fixo sem fios suporta tráfego de voz, vídeo e dados. No entanto, diferencia-se, tal como o nome sugere, pelo facto de o terminal se encontrar fixo, permitindo assim um maior débito e um custo menor. Enquadram-se nestes sistemas tecnologias como o *WiMAX* Fixo e as ligações de satélite;
- **Área Local sem Fios:** As redes sem fios em áreas locais surgiram para servir a comunicação entre computadores em pequenas organizações ou redes domésticas. A sua principal finalidade é o tráfego de dados, se bem que suportam outros tipos de tráfego como voz, com algumas limitações por não terem sido especificadas para esse uso. Atualmente encontram-se em desenvolvimento protocolos de comunicação com um maior débito e começam a surgir os primeiros dispositivos com suporte para qualidade de serviço (*QoS, Quality of Service*), o que permitirá um suporte mais eficiente nos tipos de tráfego alternativos. Neste tipo de redes o equipamento é adquirido pelos utilizadores e são usadas bandas de frequência que não necessitam de licença.
- **Redes de área pessoal:** Este é o tipo de rede mais recente e visa permitir uma fácil comunicação entre pequenos dispositivos com computadores, *PDA*, telemóveis, ratos, etc. Sendo o intuito servir uma área pessoal, o alcance é significativamente inferior ao das redes sem fios. Este tipo de redes tem tido um grande crescimento e a sua tendência é suportar cada vez um maior débito para suportar o tráfego de dados e de voz.
- **Acesso Móvel sem fios:** Recentemente surgiu o desenvolvimento de várias tecnologias que se poderão classificar como acesso móvel sem fios. Essas tecnologias fazem a ponte entre as WLAN e as tecnologias celulares, pois permitem um débito de dados considerável numa área abrangente em mobilidade, se desejado. Exemplo dessas tecnologias é o *WiMAX* Móvel.

Os sistemas celulares móveis e os sistemas de acesso fixo sem fios proporcionam o acesso dos utilizadores a uma infraestrutura de rede fixa. Normalmente o equipamento de rede é propriedade de uma operadora, que cobra uma taxa de utilização pelos serviços oferecidos. Os utilizadores precisam adquirir apenas os sistemas de comunicação sem fios terminais. Estes sistemas geralmente operam em banda de frequências que requerem licença de operação.

Terceira Geração (3G)

No final da década de 90 o ITU (*International Telecommunication Union*) definiu a norma global IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications-2000*), sendo as tecnologias de comunicação que se enquadram nesta norma apelidadas de tecnologias 3G.

Até ao início da década, redes sem fios das tecnologias puramente 3G exigiram um grande investimento. Contudo, os esforços foram recompensados com infraestruturas que ofereceram um débito de transmissão de dados de 64 kbit/s a 2 Mbit/s sobre uma grande área geográfica com ligação ubíqua e contínua ao longo de diferentes células.

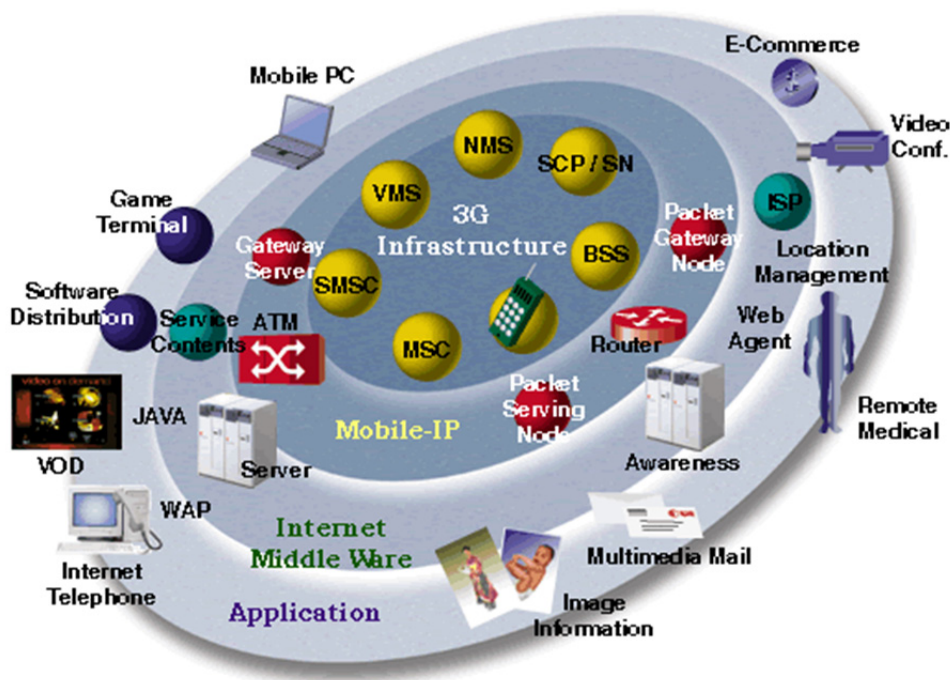


Figura 3 – Serviços disponíveis na comunicação 3G

(FONTE: <http://dhillondara.blogspot.pt/2010/08/3g-technology.html>)

Esta geração introduz diversas melhorias e novos serviços na rede de comunicações celulares móveis. A qualidade de voz foi significativamente melhorada, disponibilizou-se *Internet* a alta velocidade, serviços multimédia, diminuiu-se a utilização de energia necessária para a comunicação

poupando-se bateria e aumentou-se a cobertura geográfica das células (**Figura 3**).

Para ser reconhecida como 3G, uma tecnologia tem de possuir as seguintes características:

- Taxa mínima de transferência de 114 kbit/s para o interior de infraestruturas e 2 Mbit/s para exteriores;
- Possibilidade de transferir dados quer simetricamente quer assimetricamente;
- Suportar a transferência por comutação de pacotes;
- Suporte para serviços de IP;
- Alta qualidade de serviço de voz;
- Alta eficiência espectral.

Exemplos de tecnologias 3G são o UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), também apelidado de 3GSM para enfatizar a combinação de 3G com GSM, e o CDMA2000, evolução do *CdmaOne*.

Uma norma recente reconhecida pelo IMT-2000 foi a variante móvel da norma IEEE 802.16, designada por *IMT-OFDMA TDD WMAN*.

UMTS

Em 2000 a 3GPP concluiu a *release 99*, a primeira versão do UMTS, baseada em WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) com um potencial de atingir 14 Mbit/s. Esta tecnologia Europeia é a líder 3G mundial. A *release 99* permite que se aceda à internet com um débito de apenas 384 kbit/s de *downlink* (**Figura 4**). As frequências utilizadas em Portugal para o UMTS são as 1900 MHz e 2100 MHz, no entanto, a faixa de frequências dos 900 MHz foi libertada da obrigatoriedade de utilização de GSM para posteriormente poder acolher a tecnologia UMTS.

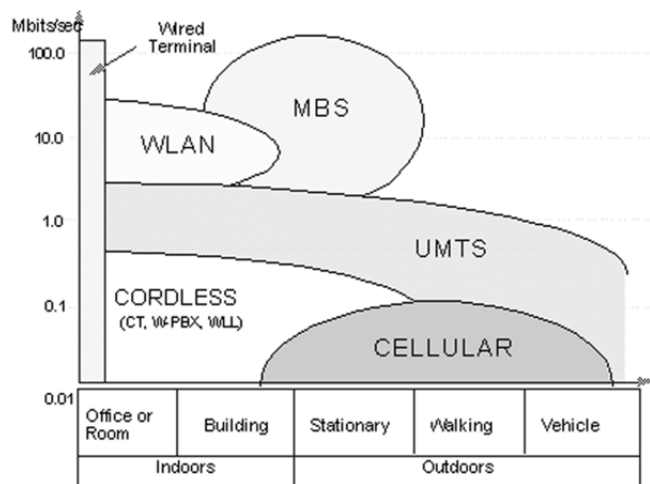


Figura 4 – Comparação de débito binário de várias tecnologias

(FONTE: <http://cordis.europa.eu/infowin/acts/ienm/bulletin/11-1996/umts.gif>)

HSPA

High Speed Packet Access (HSPA) é uma família de tecnologias que estendem e melhoram a eficiência da norma UMTS. Em vigor encontra-se o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) e o HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), sendo esperada a disponibilização do HSPA+, ou *HSPA Evolved*, para o início de 2009.

HSDPA, HSUPA e HSPA+: “3.5G”

Desde 2006, as redes UMTS têm vindo a ser atualizadas para suportar a tecnologia HSDPA. O HSDPA é predominantemente uma atualização do *software* da *release 99* da norma UMTS para a *release 5*. A atualização aumenta a eficiência e reduz a latência da ligação utilizando uma série de tecnologias em paralelo, como *Adaptive Modulation Coding*, *Fast Packet Scheduling* e *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ).

Transversal ao HSDPA e HSUPA é o alcance típico máximo de 4 km por célula numa zona rural. Uma zona urbana significa uma queda acentuada no alcance. Contudo, é de salientar que as tecnologias HSPA têm o débito bastante consistente ao longo de toda a célula, caindo apenas quando o utilizador se encontra na extremidade da célula.

O HSDPA é capaz de atingir os 14.4 Mbit/s, mas a maioria dos operadores apenas disponibiliza débitos até 3.6 Mbit. Um número menor de operadores, mas em forte crescimento, já disponibiliza ligações a 7.2 Mbit/s. Em Portugal todos os operadores disponibilizam 7.2 Mbit/s.

O HSUPA, disponibilizado em 2004 pela *release 6* do 3GPP, utiliza as mesmas técnicas que o

HSDPA em termos de adaptação à ligação na modulação e no método HARQ para melhorar o *uplink* e criar transmissão de dados assíncrona até 5.7 Mbit/s de *uplink*. Contudo, há diferenças na forma do agendamento do acesso ao meio por múltiplos utilizadores.

O HSPA+ é o próximo passo da evolução tecnológica das comunicações móveis baseadas em GSM/UMTS. Esta norma focar-se-á na disponibilização de serviços de dados com débitos até os 42 Mbit/s de *downlink* e 11 Mbit/s de *uplink*. Informalmente é apelidada de tecnologia 3.5G.

Quarta geração (4G)

Ao contrário do 3G, que é baseado em duas infraestruturas paralelas de comutação de circuitos e comutação de pacotes, a Quarta Geração (4G) é baseada exclusivamente em comutação de pacotes (**Figura 5**). As exigências para esse tipo de tecnologia são elevadas, pois exigem, por exemplo, baixa latência na transferência de dados.

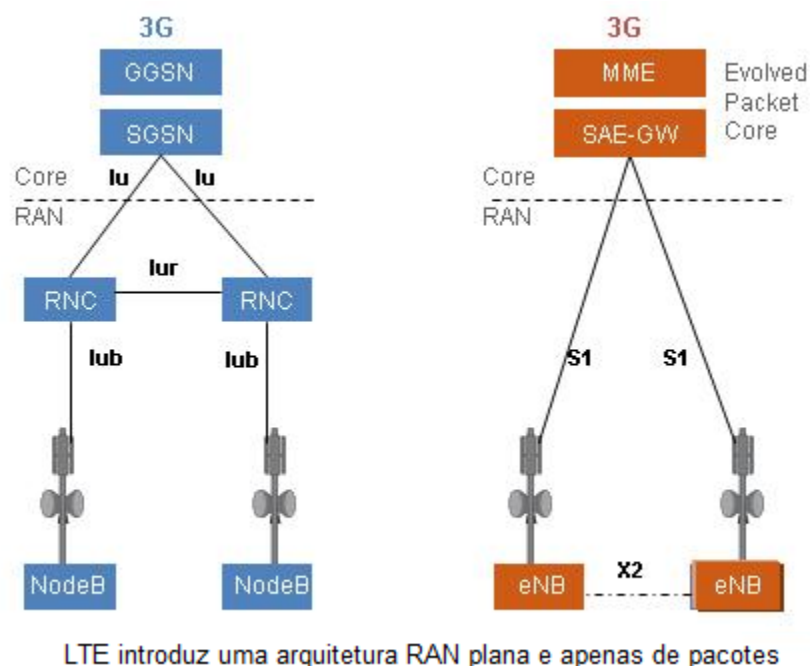


Figura 5 – Diferença de arquiteturas

(FONTE: <http://www.rcrwireless.com/mobile-backhaul/lte-network-architecture-diagram.html>)

Aquando da implementação do 4G, o IPv4 está praticamente esgotado pelo que esta nova tecnologia suportará, portanto, o IPv6.

Embora algumas tecnologias demonstrem poder vir a tornar-se de quarta geração, nenhuma entidade poderá reclamar essa designação. Ainda não há pelo *ITU* qualquer definição formal de 4G

ou sobre o que implica. Na verdade, o próximo passo nas comunicações móveis é denominado, pelo *ITU*, de *IMT-Advanced*. Porém, prevêem-se determinados requisitos como basear-se num sistema completamente IP com capacidade de transmissão de dados entre os 100 Mbit/s em acesso móvel e 1 Gbit/s em acesso fixo nómada, mantendo elevados padrões de qualidade, tanto em ambientes exteriores como de interiores de edifícios.

3GPP LTE

O projeto 3GPP *Long Term Evolution* (3GPP LTE) leva o UMTS ao 4G das comunicações móveis celulares, atingindo débitos de 100 Mbit/s de *downlink* e 50 Mbit/s de *uplink*. A norma em causa, *release 8* do 3GPP, deverá usar uma nova tecnologia de interface sem fios baseada em OFDM.

UMB

Ultra Mobile Broadband (UMB) é a designação do projeto do 3GPP2 para as comunicações de Quarta Geração baseadas no desenvolvimento do CDMA2000, sendo visto como o sucessor do 1xEV-DO. Contudo, prevê-se que o LTE venha a ser o único caminho para o 4G amplamente implementável.

A principal semelhança entre todas estas tecnologias prende-se com o facto de todas usarem essencialmente espectro RF e de usar potências relativamente altas, quando comparadas com o uso de um sistema baseado em luz e mais concretamente, em LED.

LED

O LED tem como principal característica poder ser usado em iluminação de baixo consumo, nomeadamente em iluminação de escritório, casas particulares e ruas, podendo ser usado como sistema de iluminação de aviso em placards eletrónicos diversos, sinais de trânsito e com a mais recente tecnologia de ecrã LEDs, fornece uma alternativa aos sistemas *display* tradicionais (**Figura 6**). Acima de tudo, os LEDs são mais baratos que qualquer outro tipo de fonte de iluminação e possuem um tempo de vida bastante elevado.

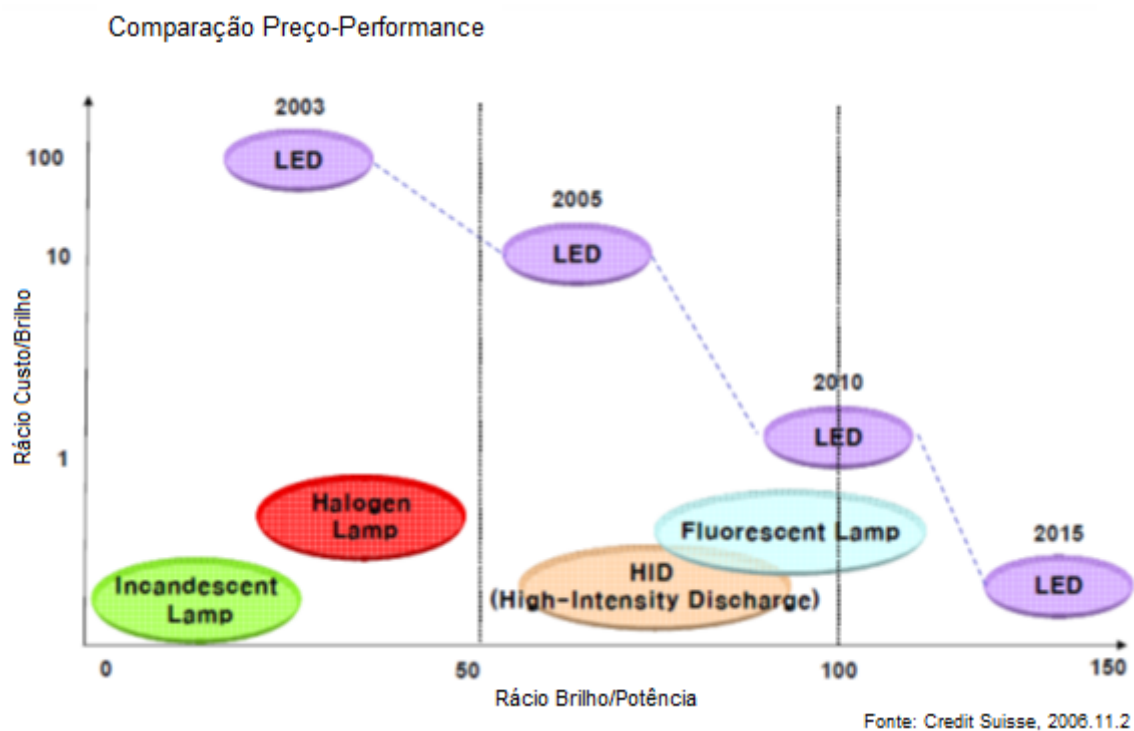
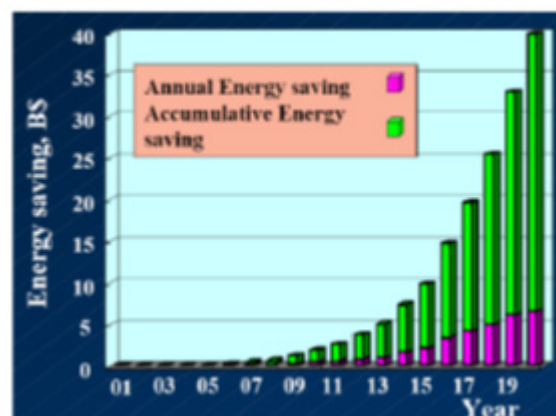


Figura 6 – Evolução técnica do LED

(FONTE: Credit Suisse, 2006.11.2)

Uma das principais vantagens do LED prende-se com o facto de que é amigo do ambiente e é um equipamento com um consumo energético bastante baixo, permitindo deste modo ser uma escolha mais acertada quando se fala de economia energética (**Figura 7**).

- Proteção ambiental
 - Protocolo de Kyoto: Regulação de emissões de CO₂
 - RoHS: Lâmpadas sem Hg
 - WEEE: Responsabilidade do produtor
- Economia de energia
 - Eletricidade na Korea
 - 278 TWh(2002), 7.2% dos EUA
 - 20% para iluminação: 55.6 TWh
 - 50% poupança pelos LEDs: 27.8TWh
 - Efeito da economia energética:
 - 3 Estação Nucleares (1GW/dia)
 - 2 B\$/ano



RoHS: Restriction of the use of Certain Hazardous Substance
WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment

Figura 7 – O LED na perspetiva ecológica

Fonte: KOPTI (The Korea Photonics Technology Institute)

Com base no atrás exposto, o LED é um dispositivo que é bastante versátil, permitindo a sua utilização em diversas aplicações.

1.3- Objetivos

O sistema de comunicação usando luz visível (*Visible Light Communication* – VLC) é uma nova tecnologia de comunicações que tem por base o uso de luz visível para transmissão de dados. Essa transmissão é feita usando um comprimento de onda que varia dos 400nm (750THz) até aos 700nm (428THz).

A utilização da luz visível tem a principal vantagem de poder providenciar iluminação ao mesmo tempo transmissão de dados sem que seja detetado pelo olho humano, uma vez que os impulsos gerados na transmissão são completamente imperceptíveis (**Figura 8**).

Para além disso, o sistema de comunicações VLC é mais seguro que um sistema RF normal uma vez que a transmissão é somente feita na zona da iluminação, não havendo a possibilidade de terceiros acederem aos dados sem que o dono/proprietário da comunicação se aperceba. Igualmente, em termos de saúde, a luz emitida pelo sistema VLC é completamente inofensivo para o corpo humano, ao contrário de um sistema baseado em RF que devido às potências emitidas poderão provocar problemas de saúde grave. Baseado nesta premissa, o VLC poderá ser usado com o mecanismo de comunicação em locais até agora proibidos, nos quais não era possível ter um mecanismo de comunicação usando RF porque esse mesmo mecanismo interfere em equipamentos altamente sensíveis a perturbações magnéticas, como é o caso de hospitais, aviões, etc.

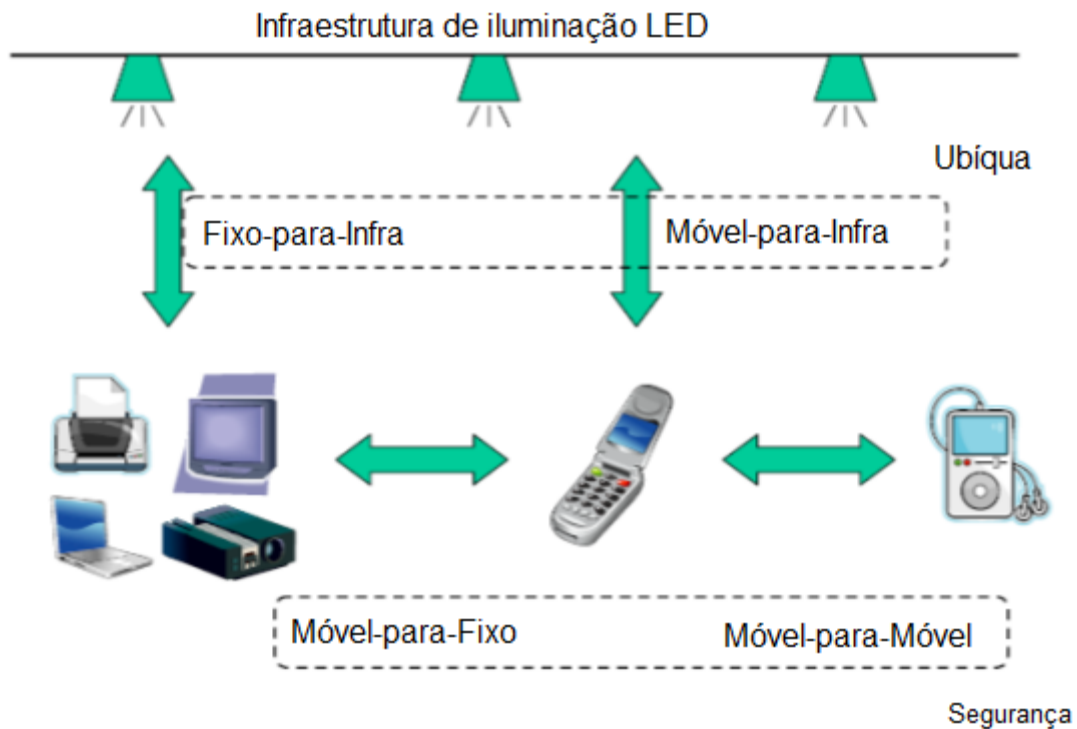


Figura 8 – Aplicação Indoor

Diversas empresas de telecomunicações, empresas de iluminação e fabricante de LEDs, assim como Universidades juntaram-se para desenvolver e apurar a tecnologia VLC, de modo a que possa ser uma realidade num futuro próximo e diversas experiências estão a ser levadas a cabo por essas empresas e Universidades, um pouco por todo o mundo.

Entre essas experiências, contam-se sistemas de comunicação de som, sob forma analógica e digital, sistemas de identificação (ID) por luz visível e transmissão de dados de alta velocidade.



Figura 9 – Sistema de som musical baseado em cores RGB

(FONTE: Visible Light Communications Consortium)

Na **Figura 9**, os sons musicais são transmitidos individualmente por intermédio das luzes visíveis (RGB). Neste caso, a cor vermelha transmite o instrumento bateria, o verde transmite o instrumento baixo e o azul transmite o instrumento piano.

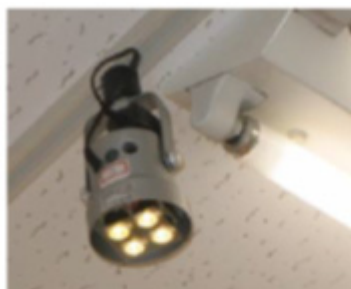
Na **Figura 10**, a informação do produto é obtida pelo recetor de luz visível que está no carrinho de compras.

Neste sistema, a informação de um dado produto, por exemplo, preço, promoção, validade, etc., é obtida diretamente no carrinho de compras o qual mantém uma comunicação de dados com um servidor central (responsável pelo armazenamento dos dados) através do sistema de iluminação do próprio supermercado (**Figura 11 e Figura 12**).



Figura 10 – Sistema ID baseado em luz visível

(FONTE: NEC and Matsushita Electric Works)



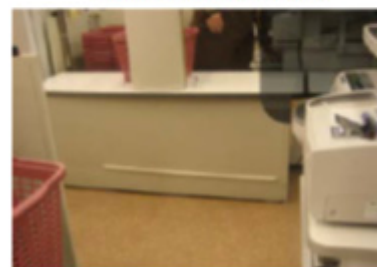
Tipo de lâmpada de teto



Tipo de lâmpada de chão



Tipo de lâmpada de chão num frigorífico



Tipo de lâmpada de chão na caixa registadora

Figura 11 – Infraestrutura fixa do sistema ID

(FONTE: Visible Light Communications Consortium)



Figura 12 – Estrutura do equipamento móvel

(FONTE: Visible Light Communications Consortium)

Este sistema poderá permitir o pagamento automatizado de todas as compras realizadas, evitando assim filas desnecessárias uma vez que o carrinho de compras foi atualizando automaticamente todas os artigos que foram sido comprados durante a estadia do cliente dentro do supermercado, e por cada novo artigo inserido, automaticamente era gerado uma lista de compras no servidor principal. No fim das compras, o carrinho de compras, com o seu ID associado, permite efetuar a listagem final dos produtos e assim obter a conta mais rapidamente (**Figura 13**), não sendo necessário aguardar pela repassagem dos produtos no leitor de código de barras.

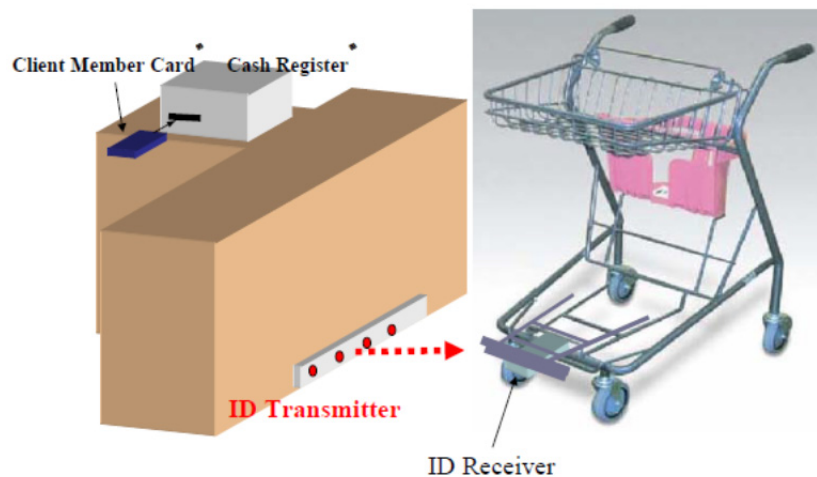


Figura 13 – Comunicação carrinho compras – Ponto de venda

(FONTE: Visible Light Communications Consortium)

Com base no atrás referido, e tentando resolver a problemática dos acidentes de viação e até mesmo ajudar na diminuição da sinistralidade rodoviária por intermédio da correta orientação do trânsito acumulado em certos pontos-chave das estradas de Portugal, era conveniente a implementação de um sistema de informação em tempo real, que permitisse a todos os condutores saberem em tempo real quais as condicionantes de uma certa estrada, por intermédio de um acidente ou mesmo um corte programado para efeitos de obras de uma certa via.

Assim, a utilização das diversas tecnologias baseadas em RF são uma escolha a ponderar quando se trata de fazer essa comunicação, no entanto, a infraestrutura necessária para a transmissão teria de ser criada desde o princípio.

Uma vez que é possível fazer uma transmissão de dados usando luz visível e considerando que já existe uma infraestrutura de semáforos instalados nas principais cidades de Portugal surgiu a ideia de aplicar o sistema de comunicação VLC a esses mesmos semáforos (**Figura 14**).

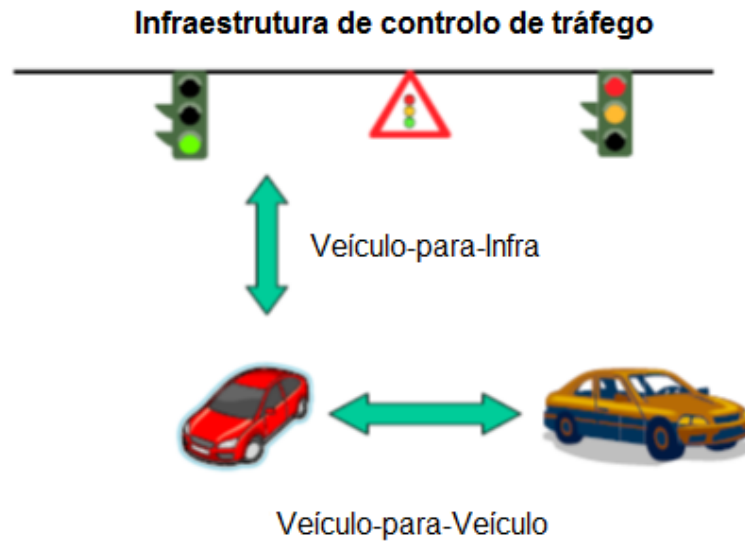


Figura 14 – Aplicação Outdoor

A ideia que está por detrás deste sistema consiste em usar os semáforos já existentes, nos quais era aplicada a comunicação VLC nas diferentes cores Verde, Amarelo e Vermelho, de modo a que cada cor correspondesse a um canal de dados, nos quais seria dada informação aos condutores, por exemplo, de que a rua onde o condutor iria virar há um acidente que está a bloquear essa rua e que seria necessário utilizar outra alternativa. O condutor obteria essa informação a partir de um recetor que estaria instalado no interior da viatura, recetor esse que poderia receber somente a informação do semáforo (Figura 15).



Figura 15 – Exemplo de utilização da comunicação VLC associada a semáforos

(FONTE: The Nippon Signal CO., LTD)

1.4– Estrutura da tese

A presente dissertação encontra-se estruturada em quatro capítulos.

O Capítulo 1 contém uma introdução à tese desenvolvida.

O Capítulo 2 contém informação acerca dos sistemas de controlo e gestão de tráfego rodoviário.

O Capítulo 3 contém informação acerca do sistema de comunicação VLC com pormenor.

O Capítulo 4 apresenta o ambiente laboratorial para os testes.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões da tese.

Capítulo 2 – Sistema ITS

2.1 – Introdução

A aplicação das tecnologias da informação e da comunicação (TIC) para transporte terrestre é chamado de "*Intelligent Transportation Systems*" (ITS). O ITS fornece a capacidade de armazenar, organizar, analisar, utilizar e partilhar informações sobre os sistemas de transporte. No mundo moderno, esta capacidade é crucial para a eficaz e económica construção e operação dos sistemas de transportes e a sua utilização eficiente. O ITS está a ser incorporado pelos fabricantes em equipamentos "inteligentes" que podem ser instalados como parte do transporte em infraestruturas para reunir e divulgar informações para os viajantes, controlar sinais de trânsito e sinais de mensagem variável, por via eletrónica, cobrar portagens, e ajudar a gerir o sistema. De facto, as tecnologias da informação e da comunicação são amplamente utilizadas em ITS para a segurança nas estradas, tanto na estrada como no próprio veículo.

O aumento da mortalidade na estrada está a tornar-se grave mesmo com a introdução de sistemas inteligentes e dispositivos de comunicação dentro das viaturas e nas próprias estradas. Os acidentes rodoviários são a principal causa de morte no mundo especialmente entre os jovens. O relatório da Organização Mundial de Saúde (OMS) [1] prevê ainda um aumento das mortes rodoviárias no futuro, mesmo com o uso de diversos dispositivos de segurança.

Para minimizar os acidentes de viação e mortes, diversos modos de comunicação veicular tais como, veículo para infraestruturas (V2I), veículo para veículo (V2V) e infraestruturas para veículo (I2V) estão a ser desenvolvidos. O surgimento do padrão IEEE 802.11p [2] para intercomunicações de curto e médio alcance com o veículo e a atribuição de uma frequência de banda dedicada a sua comunicação na Europa abriram o caminho para futuras implementações de comunicação com base para aplicações de segurança ITS. O padrão 802.11P, para ambiente veicular [3] ou *WiMax*, atualmente contribuem para a segurança rodoviária. O *Car2Car Communication Consortium*[4] é dedicado ao objetivo de aumentar ainda mais segurança do tráfego rodoviário e a eficiência por meio da cooperação entre o ITS [5] e comunicações intra-veiculares, e vice-versa. O ITS são novos sistemas de transporte com a finalidade de minimizar problemas com o transporte rodoviário, visando um eficiente fluxo de tráfego e redução da carga ambiental. Uma grande parte das atividades de investigação do ITS é vista, recentemente, como solução para resolver vários problemas de trânsito.

Muitos projetos ITS tais como *SAFESPOT* [6], *PREVent* [7], e *CALM*[8] estão a ser desenvolvidos para reduzir a mortalidade nas estradas. *VIDAS (Visible light communication for advanced Driver Assistant Systems)* é outro projeto que promete ser utilizado em infraestruturas existentes resultando em sistemas de comunicação de baixo custo. O VLC é normalmente baseado em LEDs o qual têm muitas vantagens, tais como altamente eficiente em termos energéticos, longa vida, inofensivos para humanos e amigável ao meio ambiente (tecnologia verde).

Sistemas VLC baseados em LED [9] podem ser implantados no ambiente veicular em infraestruturas existentes tais como luzes sinal de trânsito a LEDs. O sistema VLC emite em *broadcast* informações de segurança do tráfego rodoviário minimizando os possíveis acidentes e aumentar a fluidez do tráfego na estrada. Além disso, iluminação de estrada baseada em LEDs pode oferecer comunicações ubíquas entre veículo e estrada (*Ubiquitous Road to Vehicle Communication, URVC*) [10] durante a viagem.

Este capítulo apresenta como um sistema da VLC podem ser eficientemente implantado no ITS e desempenhar um papel fundamental nas aplicações de segurança rodoviária. Além disso, este capítulo apresenta os benefícios de usar sistemas VLC como redes de acesso e como o sistema pode ser integrado na arquitetura.

2.2 – Breve visão geral do ITS

Com o crescimento da população nas grandes áreas urbanas e o aumento acelerado do número de carros, o tráfego está a tornar-se genericamente caótico. O problema de congestionamentos não só afeta o dia-a-dia dos cidadãos, mas também tem um grande impacto sobre as empresas e atividades económicas. Estas questões, levar a gerar menos receitas, afetando o crescimento sustentável das cidades em todo o mundo.

Considerando problemas atuais de gestão de tráfego, planeamento e controle, especialmente porque temem-se as consequências a médio e longo prazo, tanto os profissionais como as comunidades científicas lutam para resolver o problema do congestionamento em grandes redes urbanas. Pesquisas têm sido realizadas basicamente para o desenho e desenvolvimento de especificações para o futuro das soluções de transporte com autonomia, colocando o utilizador no centro de todas as preocupações e em grande parte orientada a serviços. Tais esforços acabaram por culminar no surgimento do conceito de ITS. Agora, o utilizador é um aspeto central dos sistemas de transportes, obrigando as arquiteturas a tornarem-se mais flexíveis, podendo ser acedidas por

diferentes meios, de forma a satisfazer diferentes requisitos e uma vasta gama de objetivos.

Duas das principais características dos transportes inteligentes de hoje são as seguintes:

Cálculo automatizado é um importante requisito nos ITS. Os futuros sistemas de transporte devem tomar decisões automaticamente, analisando as informações de entrada e agir em conformidade, desencadeando ações coordenadas para melhorar o desempenho do sistema. Procura por flexibilidade e liberdade de escolha é outro aspeto importante da parte do utilizador. A atual falta de flexibilidade em sistemas de transporte limita o seu potencial aos utilizadores, principalmente no que diz respeito aos serviços personalizados, o que é um dos principais alvos de críticas por muitos utilizadores. As ITS devem ser abertas à flexibilidade, diferentes opções e escolhas do condutor, bem como serviços personalizados. Como os sistemas de transporte são muito dependentes da topologia de rede e outras características, as infraestruturas inteligentes tornam-se fundamentais. Novas tecnologias da informação e da comunicação, incluindo móveis, sem fio e redes *ad-hoc* são uma melhoria nas infraestruturas de um grande negócio, permitindo-lhes tornarem-se uma parte ativa e interativa do sistema.

A arquitetura distribuída assíncrona, tendo em conta algoritmos de controlo, coordenação e gestão autónoma dos elementos é, sem dúvida, uma das mais importantes áreas pesquisadas na ITS. Há alguns requisitos que devem ser satisfeitos, desde funcionalidade orientadas ao utilizador às funcionalidades orientadas ao serviço, transformando o transporte inteligente numa complexa, heterogénea e complexa sociedade artificial. As atuais pesquisas já consideram que a arquitetura ITS deve explorar algoritmos distribuídos usando informações exógena de diversas fontes, fazendo um maior uso do paralelismo e capacidades assíncronas das entidades.

A ITS abrange uma ampla gama de comunicações com e sem fio baseada em informações, controle e tecnologias da eletrónica. Quando integrado nas infraestruturas de sistemas de transportes, e nos próprios veículos, essas tecnologias ajudam a monitorizar e gerir fluxos de tráfego, reduzir o congestionamento, fornecer rotas alternativas para os viajantes, melhorar a produtividade, e salvar vidas, tempo e dinheiro. Baseada na tecnologia sem fio de curto alcance, os veículos são capazes de trocar informações com unidades na berma da estrada (*Road Side Units, RSUs*) espontaneamente. No entanto, com os avanços dos sistemas sem fio de longo alcance, os veículos são capazes de comunicar entre si. As secções a seguir dão um breve detalhe da comunicação veicular e dos serviços oferecidos.

2.2.1 – Comunicação Veicular

Tantos os académicos como os fabricantes de automóveis estão progressivamente a prestar mais atenção à comunicação veicular (Vehicular Communications, VC), que permite que os veículos se liguem uns aos outros e que se liguem às infraestruturas rodoviárias para formar uma rede *ad-hoc* (*Vehicular Ad-hoc Network*, VANET). VANETs [11, 12] são tipos especiais de redes *ad-hoc* móveis (*Mobile Ad-hoc Networks*, MANETs) [13], onde os veículos equipados com tecnologia de rede sem fios espontaneamente formam uma rede enquanto viajam ao longo da estrada. Os nós de um VANET geralmente são divididos em duas categorias: Unidades Integradas (*On-Board Units*, OBU), que são dispositivos de rádio instalado nos veículos, e RSUs, que constituem a infraestrutura de rede. RSUs são colocados ao longo da estrada. O VC vai permitir o desenvolvimento de sistemas para dar suporte a vários serviços, como, por exemplo, segurança rodoviária, informação de trânsito, entretenimento e portagens automáticas. Assim, a comunicação veicular combinada com a ITS torna-se extremamente importante. Elas oferecem inúmeros serviços no ambiente veicular.

2.2.2 – Serviços importantes no ambiente veicular

Um dos mais importantes fatores de sucesso de uma tecnologia é os diferentes tipos de aplicações e qualidade dos serviços oferecidos. Com a expansão dos cenários de aplicações de segurança, desde navegação segura e sistemas para evitar colisões até distribuição de conteúdo, resgate em operações de emergência (desastres naturais, ataques terroristas, etc.) e privação sensorial urbana, um novo conjunto de serviços irá surgir na rede veicular, como por exemplo, transmissão de informação em veículos prioritários em alarme e assim por diante. As novas aplicações veiculares também colocaram novos pedidos de serviços à infraestrutura de Internet, tal como endereçamento geográfico (endereçamento IPv6 baseado na posição geográfica do utilizador) ao contrário do atual e tradicional endereçamento IP, serviço de diretório de suporte, descoberta de serviço, monitorização de recursos móvel e gestão de mobilidade [14].

Há muitas aplicações de alta prioridade na segurança rodoviária e serviços num sistema VLC, em ambientes veiculares. Todos eles auxiliam os condutores a tornar decisões seguras no trânsito e que cumpram as regras de trânsito. A violação de um sinal de trânsito e o aviso de velocidade em curvas permitem que as infraestruturas transmitam informação para os veículos, relativo ao estado de um semáforo e curvatura da estrada num dado ponto, respetivamente.

As aplicações veiculares abrangem diferentes cenários de rede como discutido anteriormente

e exigem uma vasta gama de serviços de rede. Por outro lado, a disseminação da informação nestas situações podem ocorrer através de múltiplos saltos ou ser limitada a um único salto. Estes serviços de redes, quer isolados ou combinados, oferecem todos os serviços necessários para aplicações veiculares. Principais serviços de rede para o apoio de diversas aplicações são mostrados na tabela seguinte.

I2V ou sistemas *Roadside-to-Vehicle Communication* (RVC) assumem que todas as comunicações têm lugar nas infraestruturas da estrada (incluindo RSUs) e veículos. Dependendo da aplicação, dois tipos de infraestruturas diferentes podem ser distinguidos, *sparse RVC* (SRVC) e *ubiquitous RVC* (URVC). Sistemas SRVC são capazes de fornecer serviços de comunicação em *hotspots*. Um cruzamento bastante movimentado, uma estação de gás publicitando a sua existência (e os preços), e disponibilidade de estacionamento num aeroporto, são exemplos de aplicações que requerem um sistema SRVC. Um sistema SRVC pode ser implantado gradualmente, por isso não é necessário investimentos substanciais antes de começar a colher os benefícios disponíveis.

Um sistema URVC é o Santo Graal da comunicação veicular: proporcionar todas as estradas com comunicação de alta velocidade que permite acesso às aplicações que não estão disponíveis nos outros sistemas. Infelizmente, um sistema URVC pode exigir investimentos consideráveis para fornecer plena (mesmo significativas) cobertura das vias existentes (especialmente em países grandes e em desenvolvimento como a Índia, China, etc.).

Serviços de Rede	Descrição e importantes aplicações/serviços
I2V <i>One-Hop Broadcasting</i>	Exigido em avisos de violações de sinal de trânsito violação e aplicações de aviso de velocidade em curva. Combinado com o V2I <i>One-Hop Anycasting</i> , pode prestar o serviço de assistência de viragem à esquerda, onde troca de informação bidirecional entre os veículos e as infraestruturas é necessária.

<p>V2I <i>One-Hop</i> <i>Anycasting</i></p>	<p>No momento da recepção da informação, o nó da infraestrutura processa essa informação através da rede <i>backbone</i>. Este serviço de rede, juntamente com o I2V <i>One-hop Broadcasting</i>, pode ser combinado com o reencaminhamento <i>multihop</i> inter-veicular. A combinação maximiza a utilização da infraestrutura de rede <i>backbone</i> e veículos como retransmissores e aumenta a hipótese dessa informação chegar a cada nó.</p>
<p>Envio <i>Multihop</i> Inter-Veicular</p>	<p>Neste caso, cada veículo funciona como um reencaminhador e encaminha os pacotes de dados seguindo um conjunto de regras para evitar congestionamento de informação de <i>Broadcast</i>, p. ex., há um <i>time-to-live</i> em cada pacote e o pacote só é enviado apenas por cada veículo. Este serviço de rede aumenta a possibilidade da informação ser disseminada rapidamente e de forma confiável entre um grande número de veículos. Portanto, é adequado para oferecer serviços gerados a partir de eventos, tais como prevenção de colisão frontal, aviso de colisão eminente, e travagem eletrónica de emergência.</p>

<p><i>Broadcast</i> com limite de vizinhança</p>	<p>Este serviço também funciona no cenário V2V, mas com um único salto. Cada veículo transmite todas as informações a todos os seus veículos vizinhos. No entanto, a disseminação da informação é limitada a um salto, e os veículos vizinhos não transmitem as informações que recebem. Assim, este serviço de rede fornece apenas os veículos com informações nas proximidades, limitando a extensão dos serviços de radiodifusão. Ele evita degradação do desempenho da rede devido ao alto volume. Assim, ele fornece serviço para as aplicações que precisam de informações periódicas do local. Por exemplo, a aplicação de mudança de faixa requer este serviço de rede porque os veículos precisam de saber constantemente a posição dos veículos vizinhos quando querem mudar de faixa, mas a informação de outros veículos distantes é irrelevante.</p>
<p><i>Unicast</i> Veículo de/para infraestrutura</p>	<p>O serviço <i>unicast</i> veículo-de/para-infraestrutura realiza-se nos cenários de rede V2I e I2V, com cada cenário de <i>uplink</i> e <i>downlink</i> fornecendo acesso à <i>Internet</i> no veículo, respetivamente. Este serviço funciona em um único salto e vários saltos de/para uma infraestrutura <i>gateway</i>. Usando protocolos de roteamento, os veículos primeiro encontram a rota para um nó de infraestrutura <i>gateway</i> e depois começa a transmitir para esse <i>gateway</i>, o qual poderá ser usado por outras viaturas como reencaminhadores. Este serviço requer protocolos de roteamento para descobrir as rotas, e outros serviços para procurar caminhos para veículos e nós de infraestrutura através de transmissões <i>single-hop</i> e/ou <i>multihop</i>.</p>

Tabela 1 – Serviços associados ao ITS

No entanto, para estes serviços e aplicações, as redes veiculares requerem interação em praticamente todos os níveis. De facto, as ITS dependem de infraestruturas de comunicação avançadas e distribuídas. Interoperabilidade e integração tornam-se cruciais neste cenário.

2.3 – Arquitetura ITS e infraestruturas de comunicação

ITS terá um grande efeito positivo sobre o futuro na mobilidade de pessoas e bens. O seu uso numa série de tecnologias e muitos mais são suscetíveis de ser utilizados à medida que progredimos. A integração das tecnologias da informação e da comunicação com infraestruturas rodoviárias e veículos leva a sistemas cooperativos que ajudam a melhorar a segurança rodoviária, eficiência do tráfego, o tempo de transporte, consumo de combustível, e o prazer de condução. Ligando sistemas cooperativos a serviços de *back-end*, ITS permitirá a integração de informações sobre o trânsito rodoviário atualizadas nos processos de negócios de sistemas de ITS centralizados. O modelo de referência da rede ITS tem de ser ligado a sistemas de interconexão específicos entre os sistemas de transporte ou subsistema, p. ex., conexão entre informações do subsistema do ISP (*Information Service Provider*) e o subsistema do veículo (*Vehicle Subsystem*, VS). Uma breve descrição da sua arquitetura e desenvolvimento em curso é apresentado na secção a seguir.

2.3.1 - Arquitetura ITS

O *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) tem contribuído de forma significativa para o desenvolvimento da arquitetura ITS ISO TC 204. É considerado um grande avanço na área da ITS. O seu desenvolvimento é fortemente impulsionada por grandes projetos de investigação e desenvolvimento em sistemas cooperativos (*CVISeSAFESPOT*, *COOPERS*) complementada por mais projetos orientados (*GEONET*, *SEVECOM*) [14, 15]. Para consolidar estes esforços no sentido de uma solução europeia, o projeto *COMeSafety* [16] define uma arquitetura de comunicação ITS Europeia comum como base para o futuro desenvolvimento e padronização. Este enquadramento da arquitetura está atualmente a ser aperfeiçoado e complementado pelo projeto de pesquisa e desenvolvimento *PREDRIVE C2X* [17], trabalhando em direção a um teste em campo para sistemas cooperativos.

Em resumo, o quadro da arquitetura *COMeSafety* especifica referências do protocolo de arquitetura dos sistemas ITS. A ITS representa um componente genérico entre veículos e infraestruturas de comunicação nas estradas. A arquitetura de protocolo de referência basicamente obedece à norma ISO/modelo de referência OSI, estendida verticalmente por uma gestão e camada de segurança (**Figura 16**).

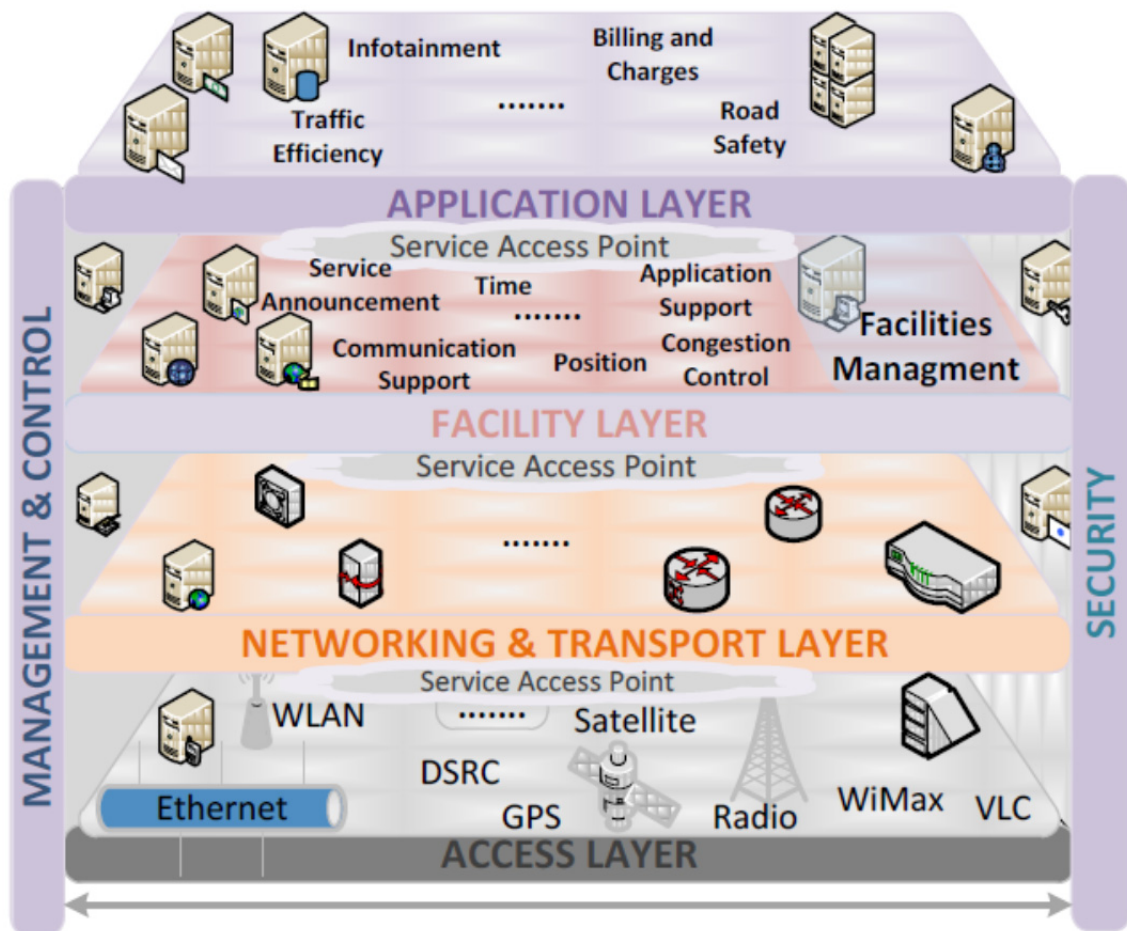


Figura 16 – Modelo de Referência para ITS

(FONTE: RITA – Research and Innovative Technology Administration)

As normas ITS [5, 18] prometem oferecer diferentes tecnologias de acesso. Esta família de normas especifica uma arquitetura comum, protocolos de rede e comunicação e definições de interface para comunicações com e sem fio usando diferentes tecnologias de acesso incluindo 2G, 3G, via satélite, infravermelho, micro-ondas 5GHz, 60GHz, e banda larga sem fio móvel. Estas e outras tecnologias de acesso que podem ser incorporados, são projetadas para fornecer comunicações *broadcast*, *unicast* e *multicast* entre estações móveis, entre estações móveis e fixas e entre estações fixas no sector ITS. As camadas de transporte e rede oferecem conectividade com a Internet e consiste em muitos protocolos básicos de transporte e o protocolo de Internet especificamente o IPv6. Para suporte de comunicação, suporte a aplicativos, anúncio de serviços e assim por diante, camada infraestrutura é incluído no modelo enquanto aplicações relacionadas com segurança, transferência eficaz de tráfego e aplicações com mais-valias são tratadas na camada de aplicação. Uma camada de segurança monitora e oferece autenticação para ampliar os serviços e aplicações. A camada de controlo e gestão torna-se necessária para o modelo de referência para o

adequado controle e funcionamento dos diversos órgãos.

A arquitetura *National ITS* pode ser visto como um quadro que reúne o transporte e mundo das telecomunicações. Esta *framework* permite a criação e entrega efetiva do amplo espectro de seus serviços.

Há também muitos desafios na interligação dos diferentes componentes de qualquer solução ITS *end-to-end*, englobando vários problemas de transporte e de comunicação. Tem sido fundamental, portanto, promover um conceito de arquitetura que reduz a complexidade de interligar vários sistemas de transportes com vários tipos de ligação de comunicação. Uma breve descrição é dada abaixo.

2.3.2 Arquitetura de comunicação ITS

Uma arquitetura de comunicação genérica para ITS é apresentada na Fig. 17. A arquitetura de comunicação ITS engloba sistemas de comunicação concebidos para ITS e é constituída por quatro componentes de subsistemas separados fisicamente:

- A componente de subsistema do veículo (Estação veicular),
- A componente de subsistema móvel (Estação pessoal).
- A componente do subsistema estrada (Estação estrada),
- O componente do subsistema central (Estação central).

A arquitetura de comunicação ITS contém os seus componentes de subsistemas ITS e normalmente um veículo *gateway* ligados a uma estação ITS com sistemas legados. O veículo requer um veículo *gateway* ligado à estação veicular e à rede proprietária do fabricante do veículo. Estes elementos estão interligados por uma rede de comunicação. A comunicação entre o veículo componente do subsistema e o componente móvel do subsistema é realizada com comunicação sem fios de curto alcance ou por rede com fios. Da mesma forma, sistemas de comunicação do veículo interagem com o RSUs que consistem em muitas infraestruturas de comunicações e redes de acesso. *Routers* de ponto de Acesso, sinais de mensagem variável e *gateways* são responsáveis por conectividade de dados entre unidades móveis (veículos) e Internet (**Figura 17**). No entanto, estes sistemas de rádio não são eficazes em termos de custo. É muito difícil de usar ponto de acesso sem fio ao longo de toda a estrada em pequenos intervalos.

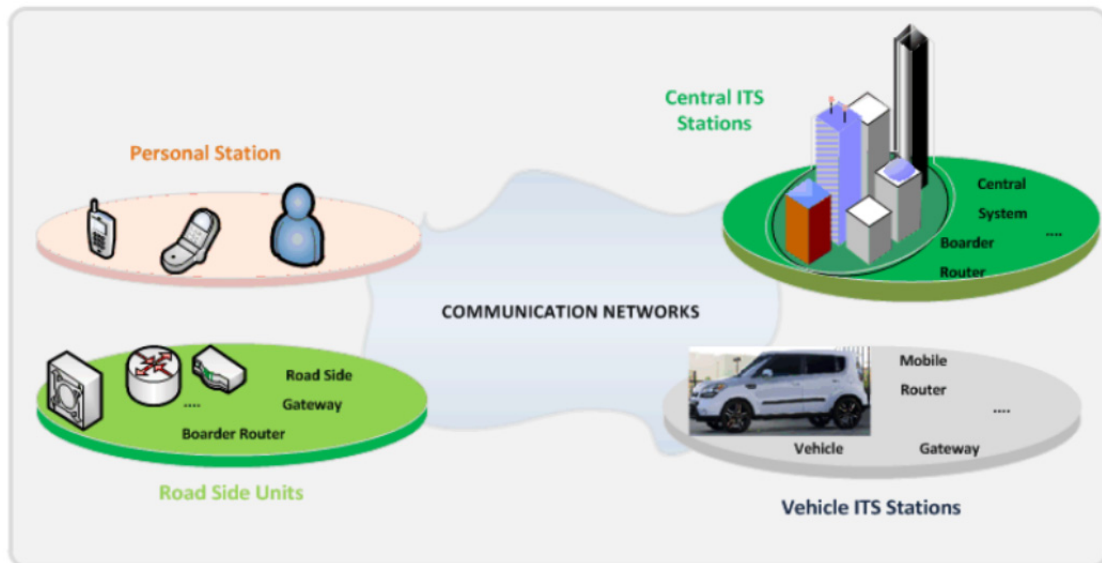


Figura 17 – Arquitetura de Comunicação ITS

2.4- Rádio e VLC Comparação de Sistemas

A Lei da Rádio restringe o livre uso da onda de rádio nas comunicações sem fio. Por outro lado, o VLC não requer nenhuma licença no momento. Além disso, devido à licença de largura de banda limitada, o espectro de rádio está a tornar-se cada vez mais congestionado. Em resumo, as comunicações de rádio sem fios têm os seguintes problemas embora sejam amplamente utilizados em telemóveis e redes locais sem fios (*LANs*).

- A transmissão elétrica não pode ser aumentada por causa dos efeitos nocivos para a saúde humana que tem sido reconhecida pela OMS recentemente [19].
- Devido a restrições na onda de rádio, as faixas de frequências licenciadas estão congestionadas.

Estes problemas das ondas de rádio são efetivamente atenuados pelo VLC.

Um sistema VLC baseado em LED irá consumir menos energia do que o sistema de rádio, permitindo a expansão das redes de comunicação sem os requisitos de energia e potencialmente reduzindo as emissões de carbono a longo prazo. Esta tecnologia leva um crescimento verde uma vez que ela usa tecnologia *eco-friendly*, tecnologia verde que é um benefício adicional para as ITS. Em comparação com a comunicação rádio sem fio, sistemas VLC têm as seguintes vantagens

principais:

- Não há requisitos para a concessão de licenças ou tarifas especiais para sua utilização.
- Não há perigos de radiação de RF, a luz visível é muito segura para os seres humanos. A luz visível existe desde os primórdios da espécie humana.
- Tem uma grande largura de banda, o que permite altas taxas de dados.
- Tem baixo consumo de energia - a maioria da energia é gasta na sinalização de tráfego.
- As luzes estão instaladas em toda a parte. Logo, a transmissão sem fios poderá ser facilmente estabelecida através de dispositivos VLC que estão ligados às infraestruturas de iluminação.

2.5– Uso de VLC em ITS

Os sistemas VLC podem desempenhar um papel chave nas ITS desde difusão de informações importantes de trânsito a infraestruturas de comunicação V2V e veículo-para-infraestruturas. Os autores do estudo [20] realizaram um estudo básico no sistema de informação de tráfego usando luzes LED em semáforos. Eles analisaram o desempenho básico e definiram uma área de serviço para requerimento de largura de banda usando intensidade básica de modulação. Um sistema de comunicação *Road-to-Vehicle* usando semáforos baseados em LEDs foi discutido em [21, 22]. Os autores do presente estudo propuseram um sistema de comunicações sem fios ótico em paralelo baseado num semáforo a LEDs como transmissor e uma câmara de alta velocidade como recetor. Os participantes do encontro discutiram modular cada LED individualmente e receber pela sua respetiva câmara. Um protocolo de comunicação para um sistema de intercomunicação do veículo foi proposto em [23]. O sistema proposto usa rede dinâmica baseada em *code division multiple access* (CDMA) através da mudança do código de espalhamento usando uma técnica de troca do código em cada pacote. Um novo sistema de receção VLC para ITS baseado em foto-díodos (PD), um sistema de imagem ótica e um mecanismo de orientação foi proposto pelos autores T. Hara et al [24].

O VLC não é apenas adequado para um sistema de radiodifusão como estrada-para-veículo ou sistemas de comunicação I2V mas que pode ser igualmente eficaz em sistemas de comunicação V2V e V2I. No caso do cenário V2V, um veículo na frente do semáforo recebe a informação de

segurança de tráfego e passa essa informação usando as luzes de travagem do veículo que está atrás. Eles podem até formar uma rede *ad-hoc* e partilhar informações entre si. Do mesmo modo, a viatura traseira poderá obter informação de um RSU usando os faróis frontais baseado em LEDs formando um sistema de comunicação *full-duplex*.

RSUs tais como, semáforos baseados em LED são bem adequados para difundir a comunicação no modo I2V de sistemas de comunicação veicular. Informações relacionadas com segurança no trânsito podem ser continuamente transmitida sem o uso de energia extra permitindo aumentando fluxo de tráfego, bem como reduzindo acidentes fatais. A luz emitida por um semáforo (que consiste de uma matriz de LEDs) é modulada em frequência impercetível aos olhos humanos. A luz modulada é então detetada por um foto detetor (PD) que está num recetor no veículo, fornecendo informações de segurança úteis para o motorista com antecedência. Perspetivas mais avançadas podem utilizar comunicações inter-veículo, como uma forma de transmitir informações entre veículos que estão parados próximo de um posto de controlo de tráfego.

Assim, semáforos baseados em LEDs oferecem uma opção adequada para ser incluído como RSUs e integrados na arquitetura ITS. Um dos cenários de interação e comunicação entre a RSU e um veículo é apresentado na **Figura 18**.

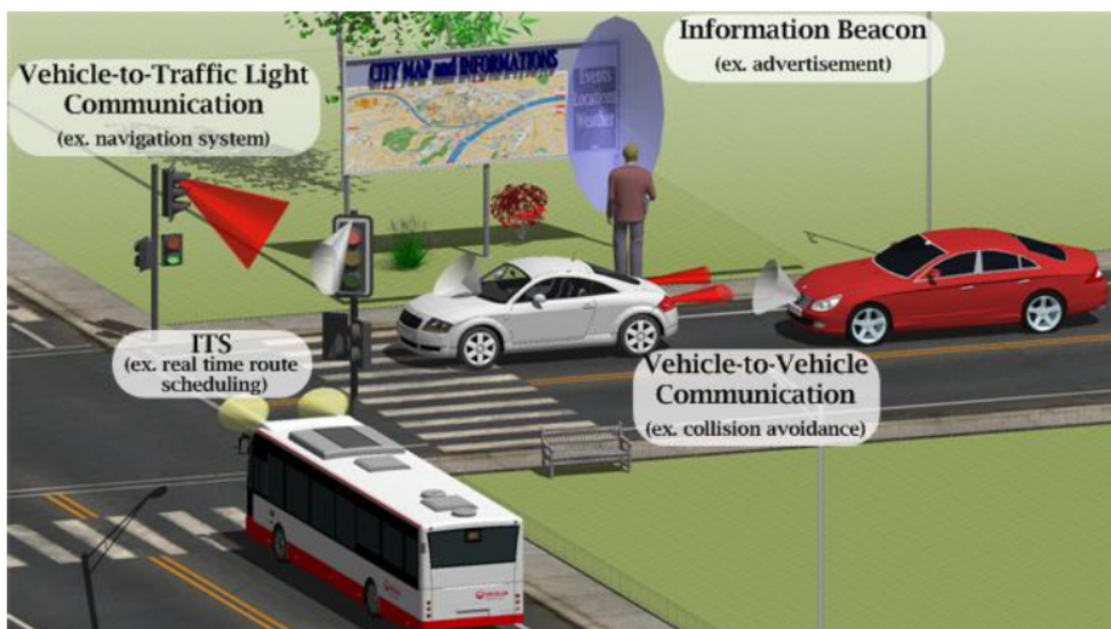


Figura 18 – Cenário de aplicação

2.5.1 VLC em semáforos LEDs nas ITS

Semáforos LEDs trabalhando como emissores em sistemas VLC podem ser usados para difundir informações de segurança nas ITS pela simples razão de que existem atualmente e a substituição de semáforos por semáforos LEDs está atualmente a ser levado a cabo. Os veículos mais recentes também estão a ser equipados com luzes traseiras e dianteiras a LEDs. Os LEDs são amigos do ambiente e fornecem melhor visibilidade. Por este motivo, a comunicação VLC pode ser considerada com um sistema de comunicação suplementar não só para difusão de informação para também para conectividade *uplink* nas comunicações V2V. No entanto, apenas foca-se na difusão de informação em sistemas baseado em LEDs para comunicação para aplicações de segurança rodoviária.

Juntamente com muitas tecnologias de acesso, o sistema VLC baseado em LEDs pode ser usado. Está incluído controlo de tráfego adicional e unidades de monitorização que podem fornecer informação de suporte adicional em conjunto com outras RSUs. Nestes sistemas, portanto, integrando um semáforo a LEDs para difusão de informação de segurança rodoviário oferecem um método de implementação de baixo custo. Uma vez que a substituição dos semáforos tradicionais está a avançar a um ritmo rápido, é altamente desejável usar a dupla funcionalidade do LED; neste caso sinalização e difusão de informação de trânsito. A integração de sistemas VLC nos semáforos irá minimizar o uso de *IR* e infraestruturas dispendiosas para comunicação de curto alcance. Para além disso, a longo prazo irá suportar a comunicação ubíqua nas estradas [25] aquando de uma viagem, usando os sistemas de iluminação das mesmas estradas. Será possível usar infraestruturas de comunicação ubíqua, tais como redes sem fios e sinais de mensagens variável para fornecer conectividade de dados entre as unidades móveis (veículos) e a *Internet* (**Figura 19**). Mas esta solução não é rentável. É muito difícil usar pontos de acesso sem fios em toda a extensão da estrada em pequenos intervalos

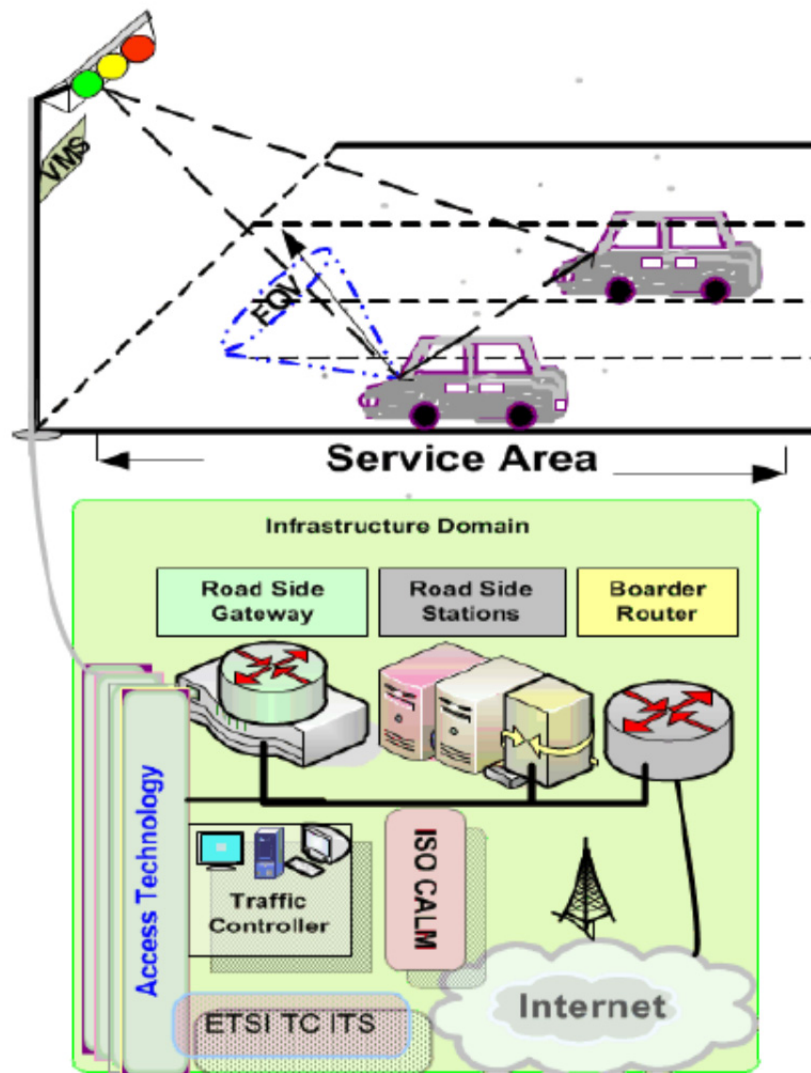


Figura 19 – Cenário de integração de semáforos com arquiteturas ITS

(FONTE: [10])

Para que o sistema VLC seja usado, não será necessário grandes alterações na infraestrutura, do lado do emissor. Por outro lado, os recetores têm um baixo custo por isso os recetores de luz não são necessários uma vez que sensores de luz automáticos são componentes comuns nos carros. Nas secções seguintes apresenta-se a arquitetura do sistema VLC e discute-se as funções dos principais blocos que compõem o sistema VLC.

2.5.2 Arquitetura do sistema VLC

O sistema VLC é uma tecnologia de rápido crescimento capaz de fornecer comunicação de dados usando LEDs e foto díodos de baixo custo. Usa a região do espectro visível (**Figura 20**), na gama dos 390nm-750nm, aproximadamente, entre a região do infravermelho e do UV. Por isso,

muitas das propriedades e detalhes tecnológicos da comunicação por infravermelhos é utilizado e é relevante para a investigação do VLC. No entanto, continua a ser uma das áreas com menos pesquisa. Nesta secção, será introduzido um sistema básico de transrecetor do sistema VLC. Uma representação do diagrama de blocos juntamente com uma breve descrição do transmissor e recetor é apresentado.

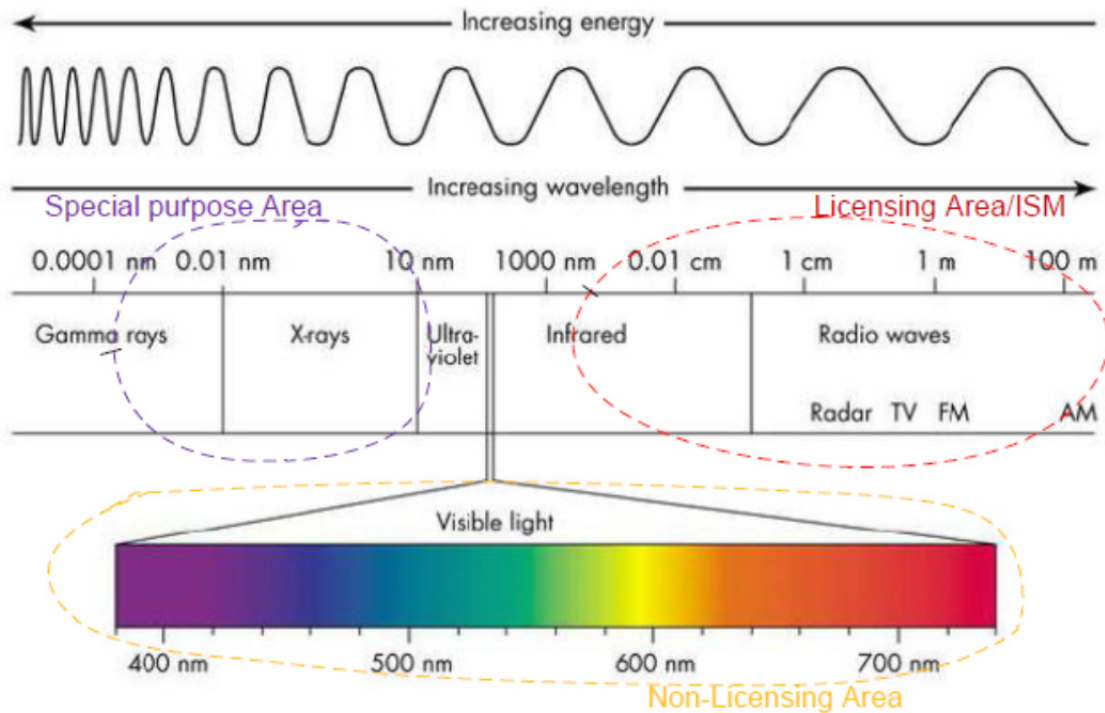


Figura 20 – Espectro de frequências

(FONTE: <http://9-4fordham.wikispaces.com/Electro+Magnetic+Spectrum+and+light>)

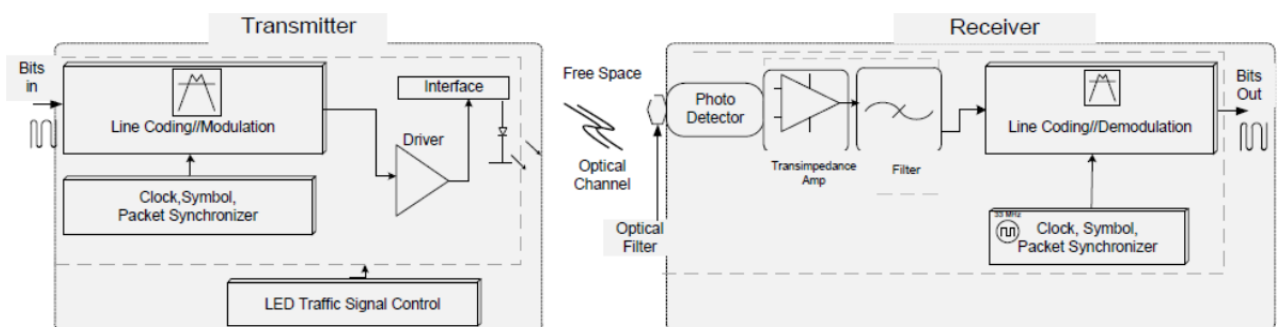


Figura 21 – Representação do diagrama de blocos do transrecetor

O diagrama de blocos do sistema VLC está representado na **Figura 21**. Dispositivos tais como computadores portáteis, telefones móveis podem ser usados para transmitir e receber informações. O bloco transmissor consiste numa fonte luminosa, modulador e um *pulse shaper* para ligar os LEDs à velocidade do ritmo de transmissão. A fonte de iluminação emite os dados usando ondas de

luz como meio ao mesmo tempo que realiza iluminação. Os dados são enviados entre dois ou mais terminais.

2.5.3 Transmissor VLC

O transmissor VLC (também denominado por emissor) é um dispositivo transdutor eletro-ótico que transmite informação usando ondas de luz visível sobre o meio de transmissão. Os sistemas VLC têm-se tornado uma tecnologia cada vez mais viável para o futuro da transmissão de dados sem fios, em grande parte devido à evolução na área da iluminação em estado sólido.

O sinal digital de dados é passado para um codificador que modula o sinal com o objetivo de ligar os LEDs à mesma velocidade que a taxa de transmissão dos dados. O método de modulação usado deverá oferecer uma elevada robustez à luz de fundo e ao mesmo tempo, a luz deverá ser o mais brilhante possível. Intensidade de modulação e deteção direta (*Intensity modulation/direct detection, IM/DD*) muitas vezes usado em IR, também poderá ser usado no sistema de comunicação VLC. Outra opção é o uso de *Pulse Position Modulation (PPM)*, a qual especifica a modulação da informação sobre a portadora de luz [26, 27]. Deste modo, a informação é formatada antes de ser aplicada na portadora. *Spread Spectrum* é outra técnica que poderá ser considerada. Esta técnica aumenta a resistência a interferência e congestionamento e também permite estabelecer uma comunicação segura.

No aspeto prático, o modulador também recebe informação da unidade de controlo de tráfego de como a que possa reter a informação quando o semáforo muda de cor. Isto garante que: (i) não há transmissão no curto intervalo de tempo na mudança do semáforo; e (ii) a transmissão é sincronizada. O sinal resultante é depois usado para controlar a mudança do LED através do driver de saída. O *driver* de saída, combinado com o sinal de controlo deverá garantir potência ótica suficiente, de modo a atingir o esperado alcance de comunicação. Às vezes, as características elétricas dos LEDs de diferentes cores, tal como a corrente de polarização direta, poderá implicar o uso de um driver de saída com diferentes canais e um modo de comutação ligeiramente diferente.

O codificador pode ser integrado ou a gama de sinais de entrada especificada. Para construir este bloco, um microprocessador é uma solução bastante económica mas a sua atualização não é um processo fácil. Usar uma FPGA poderá tornar-se mais cara mas tem melhor capacidade de processamento dos dados e torna-se mais fácil realizar uma atualização. Na eletrónica de *front-end*, integrar uma matriz de LEDs é essencial para especificar o consumo de energia, alcance ótico e frequência máxima de funcionamento.

A taxa de dados num sistema VLC é limitada pela velocidade de comutação dos LEDs emissores. Por outro lado, a comunicação de longa distância é limitada pela potência transmitida e pelas fontes de luz de fundo.

2.5.4 Recetor VLC

O recetor VLC é um transdutor ótico-eletrónico que recebe a informação, previamente modulada no espectro da luz visível e converte este sinal num sinal elétrico capaz de ser processador por um desmodulador descodificador. O desenho correto deste dispositivo é crucial para garantir uma boa performance global do sistema VLC. Entre outros fatores preocupantes está a presença de sinais de baixo nível e alta interferência de ruído.

Os pulsos de luz visível, originada pelo emissor do sistema, é recebida por um foto-detetor, um filtro de corte ótico de IR é uma solução viável para eliminar conteúdo espectral não desejado. Reversamente, um foto-díodo polarizado opera no modo fotocondutor, gerando uma corrente proporcional à luz recebida. Esta corrente tem um valor baixo exigindo pré-amplificação para converter-la em voltagem. Este pré-amplificador deverá ter baixa distorção e um grande ganho de largura de banda. Amplificadores de trans-impedância apresentam um melhor compromisso entre largura de banda e ruído, neste tipo de aplicações [28]. A voltagem resultante é depois aplicada a um filtro passa baixo para remover qualquer ruído de alta-frequência. O sinal é ainda mais amplificado na etapa final de amplificação. Também, filtragem de componente DC é aplicada à entrada das etapas de amplificação e filtragem, ajudando a reduzir o ruído da componente DC do sinal capturado bem como as componentes de baixa-frequência. O sinal de voltagem final deverá corresponder aos pulsos de luz recebidos os quais são depois descodificados no bloco de descodificação final, permitindo assim extrair o sinal digital. Este bloco final realiza a função inversa do bloco de codificação do emissor, podendo ser implementado usando um microprocessador ou melhor, uma FPGA. O esquema de desmodulação irá depender do esquema de modulação usado no lado do emissor. Uma técnica de conversão prática poderá ser a deteção direta. Recuperação de relógio (*clock*) é necessária para sincronizar o recetor com o transmissor. Adicionalmente, o sistema também precisa de uma unidade de gestão do protocolo e um bloco de recuperação de dados/relógio para sincronizar os pacotes recebidos.

O detetor é caracterizado pelo parâmetro campo de visão (*Field of View*, FOV), responsividade e área. Para uma grande área de serviço, recetor com um maior FOV é preferível. No entanto, um recetor com grande FOV leva a uma degradação de performance por causa da possibilidade de receção de sinais luminosos não desejáveis. Entre os sinais recebidos, há também

muitos ruídos indesejáveis, que são processados simultaneamente.

2.5.5 Canal VLC

Um dos requisitos rigorosos do sistema VLC é a linha direta de visão (*Line-of-Sight*, LoS). No entanto, em alguns casos de aplicações interiores, configuração de canais difusos é também usado. Um cenário de linha de vista e *links* difusos são ilustrados na **Figura 22**. A luz emitida dos LEDs transporta a informação num meio sem fios. Assim, a intensidade da luz do emissor torna-se um parâmetro importante na qual o alcance da transmissão varia. Existem muitas fontes de ruído externas tais como a luz solar e iluminação de estradas e ruas. Estas são as principais questões a serem consideradas do desenho da ligação.

Elas deterioram/enganam a intensidade da luz do emissor e podem causar falsas comunicações no foto-díodo. Filtros óticos deverão ser considerados para minimizar este efeito.

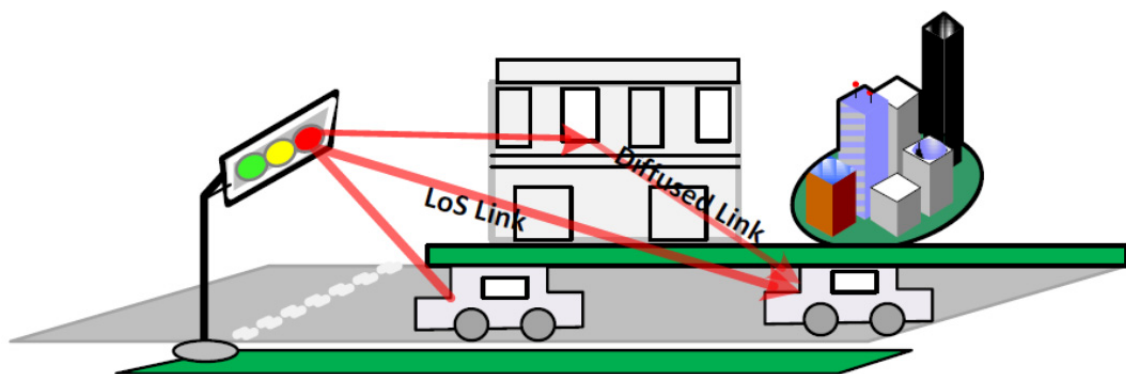


Figura 22 – Cenário de link com LoS (linha de vista) e link difuso

No geral, o desenho de sistemas VLC para aplicações exteriores é complexo e difícil. Envolve diferentes áreas de conhecimento tais como ótica, eletrónica, comunicações e rede.

2.6– Referências

- [1] World Health Organization, “Ten Causes of Death”, WHO, 2008.
- [2] IEEE 802.11p, “Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE)”, IEEE, 2010.
- [3] S. Eichler, "Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard," in *Vehicular Technology Conference, VTC-2007 Fall, IEEE 66th*, pp. 2199-2203. 2007.
- [4] C2C, "Car 2 Car Communication Consortium."
<http://www.car2car.org>, Car2X Communication System, 2013.
- [5] ITS, "Intelligent Transportation Systems," <http://www.its.dot.gov/research.htm>, 2013.
- [6] SAFESPOT, “SAFESPOT Integrated Project, Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety.” <http://www.safespot-eu.org/>, 2010.
- [7] PREVENT, "Project PREVent," <http://www.prevent-ip.org/>, 2013
- [8] CALM, "Communication Access for Land Mobile,"
<http://www.isotc204wg16.org/concept>, 2013.
- [9] Y. Tanaka, Haruyama, S. and Nakagawa, M, "Wireless optical transmissions with white coloured LED for wireless home links," in PIMRC, The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, , pp. 1325 – 1329, 2000.
- [10] S. Kitano, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "LED road illumination communications system," in IEEE 58th Vehicular Technology Conference, pp. 3346-3350, 2003.
- [11] S. Yousefi, E. Altman, R. El-Azouzi, and M. Fathy, "Analytical Model for Connectivity in Vehicular Ad Hoc Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 57, pp. 3341-3356, 2008.
- [12] P. Cencioni and R. Di Pietro, "VIPER: A vehicle-to-infrastructure communication privacy enforcement protocol," in Mobile Adhoc and Sensor Systems, MASS'2007. IEEE International Conference, pp. 1-6, 2007.
- [13] IETF, "Mobile AdHoc Networks (MANET)."

<http://datatracker.ietf.org/wg/manet/>, 2013.

[14] GEONET, "Geographic addressing and routing for vehicular communications," <http://www.geonet-project.eu/>, 2013.

[15] SEVECOM, "Secure Vehicle Communication," <http://www.sevecom.org/>, 2013.

[16] COMeSafety, "Communication for eSafety," <http://www.comesafety.org/>, 2013.

[17] PREDRIVE, "Preparation for Driving Implementation and Evaluation of Car 2 X Communication Technology,"

<http://www.pre-drive-c2x.eu/index.dhtml/444d919dde59571535mo/-/deDE/-/CS/-/>, 2010.

[18] K. Evensen, "Intelligent Transport Systems, European Standardization for ITS: WG2 Architecture," in ETSI TC ITS Workshop, Sophia Antipolis, 5 Feb. 2009.

[19] International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, "IARC Classifies Radio Frequency Electromagnetic Fields as Possible Carcinogenic to Humans", Press Release No. 208, 31 May 2011.

[20] M. Akanegawa, Y. Tanaka and M. Nakagawa, "Basic study on traffic information system using LED traffic lights," IEEE Trans. On Intelligent Transportation System, vol. 2, pp. 197-203, 2001.

[21] S. Iwasaki, M. Wada, T. Endo, T. Fujii, and M. Tanimoto, "Basic Experiments on Parallel Wireless Optical Communication for ITS," in Intelligent Vehicles Symposium IEEE, pp. 321-326, 2007.

[22] M. Wada, T. Yendo, T. Fujii, and M. Tanimoto, "Road-to-vehicle communication using LED traffic light," in Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium,, pp. 601-606, 2005.

[23] R. K. Takayuki Tsuzuki, "Inter-Vehicle Communication Protocol using Common Spreading Code," in Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 376-381, 2000.

[24] T. Hara, S. Iwasaki, T. Yendo, T. Fujii, and M. Tanimoto, "A New Receiving System of Visible Light Communication for ITS," in Intelligent Vehicles Symposium IEEE, pp. 474-479, 2007.

[25] S. Kitano, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "LED road illumination communications

system," in IEEE 58th Vehicular Technology Conference, pp. 3346-3350, 2003.

[26] Hyuncheol Park and Barry, J.R, "Modulation analysis for wireless infrared communications," 1995. ICC '95 Seattle, 'Gateway to Globalization', IEEE International Conference on Communications, vol. 2, pp. 1182 - 1186, 1995.

[27] J. R. Barry, J. M. Kahn, E. A. Lee, and D. G. Messerschmitt, "High-speed nondirective optical communication for wireless networks," Network, IEEE, vol. 5, pp. 44-54, 1991.

[28] R. L. Aguiar, A. Tavares, J. L. Cura, E. De Vaaconcelos, L. N. Alves, R. Valadas, and D. M. Santos, "Considerations on the design of transceivers for wireless optical LANs," in Optical Wireless Communications (Ref. No. 1999/128), IEE Colloquium, pp. 2/1-231, 1999.

Capítulo 3 – VLC – Modelo emissor e caracterização do canal

3.1- Introdução

Os sistemas VLC usam emissores baseados em LEDs para transmitir informação. Nas ITS, semáforos emissores baseados em LEDs são também utilizados para sinalização, ao mesmo tempo. Além disso, é compreensível que uma certa quantidade de LEDs são necessários para oferecer grande visibilidade para grandes distâncias e transmissão de dados, de modo a cobrir uma vasta área da estrada em todo o seu comprimento. Ampla cobertura da iluminação de luz é esperado que ofereça larga cobertura da área de serviço, na área em que a informação dos dados é recebida com viabilidade. Portanto, similar às características de iluminação luminosa em ambientes indoor, uniformidade e diretividade torna-se importante. Por exemplo, o padrão da iluminação ambiente é diferente da iluminação da estrada dos semáforos luminosos. Desenhar luz LEDs para iluminar uma estrada inteira torna-se mais fácil do que a iluminação LEDs de um semáforo, no entanto, esta última é mais eficaz em termos de custos. Mas a combinação de ambos os recursos irão fornecer uma comunicação ininterrupta e ubíqua durante a condução.

No entanto, na ausência de iluminação rodoviária por luz LEDs, a topologia dos semáforos do sistema VLC tornam-se dinâmicos e conseqüentemente caracterizados pela variabilidade do canal de transmissão. A distância emissor-recetor e o ruído ambiente podem alterar-se, fazendo com que a relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) varie significativamente no canal de comunicação ótico do ambiente exterior. Pequenas distâncias entre o emissor e o recetor permitem o uso de elevadas taxas de transmissão; por outro lado, um aumento da intensidade do ruído ambiente poderá ser contra balanceado com uma diminuição da taxa de transmissão.

É sabido que nas comunicações VLC, a conectividade é mais importante que a taxa de transmissão dos dados, colocando uma obrigação de que estes sistemas tenham de ter mecanismos de adaptação do ritmo de transmissão. Esta propriedade permite ao sistema responder à topologia de rede e canal com uma natureza dinâmica, oferecendo também a perspectiva do uso de múltiplas aplicações e garantir compatibilidade com os sistemas já existentes.

Com base nestes pressupostos, é discutido duas grandes questões neste capítulo. Primeiro, o desenho e desenvolvimento do emissor LED e o modelo do sistema de tráfego para as características de iluminação desenhadas; e segundo, caracterização do canal ótico e do ruído.

3.2 – Perspetiva da visibilidade humana

A visibilidade dos sinais de trânsito é muito importante para uma condução segura. Ela depende de muitos fatores, sendo os mais importantes a cor, intensidade luminosa e distribuição da intensidade luminosa.

Existem duas situações:

- Dificuldades na deteção do sinal de trânsito, e
- Capacidade para discriminar diferentes sinais de trânsito.

Limite de diferença de luminância (*Luminance Difference Threshold*, LDT) é um fator que define a visibilidade de um objeto em geral [1]. Para o ser humano perceber um objeto e reconhecê-lo, a luminância de um objeto precisa de ser diferente da luminância do fundo, e a diferença de luminância tem de ser maior que a mínima LDT que o olho humano consegue perceber. O parâmetro LDT é influenciado por fatores tais como a capacidade visual do observador e condição mental, propriedade de um objeto, condição de luminância na visão e assim por adiante. Ou seja, a visibilidade do condutor poderá ser altamente influenciada pelo clima e tempo. Estes aspetos são examinados [2] considerando intensidade luminosa e distribuição em algumas das normas.

3.3- Sistemas de comunicação sem fio usando luz visível

Os sistemas de comunicação tornaram-se a espinha dorsal da nossa “sociedade da informação”. Desde o princípio, sistemas baseados em RF dominaram o mundo das aplicações sem fio mas eventualmente começaram a chegar a um ponto de saturação. Isto fez que as soluções alternativas fossem altamente desejáveis, levando à introdução de tecnologias sem fios baseado em IR [3]. Apesar de apresentar vários benefícios em relação ao RF, o IR nunca se tornou a tecnologia principal. No entanto, tecnologia ótica sem fios continua a ser muito desejáveis e com a afirmação dos HB-LEDs como a tecnologia de iluminação do futuro, o espectro da luz visível torna-se uma alternativa viável [4, 5].

Os HB-LEDs chegaram, entre outros, à iluminação automóvel e aplicações de sinais de

trânsito, tornando possível o uso do VLC em ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*) um possibilidade, no qual o projeto VIDAS é um exemplo. Torna-se necessário especificar modelos de emissão, propagação e recepção, bem como analisar a influência de diferentes fontes de ruído [6].

3.4 – História do VLC

A importância dos sistemas de comunicação na sociedade de hoje quase não precisa ser enfatizada. Todos os dias, informação, economia, finança, transportes e outros sistemas importantes dependem de um acesso rápido e fiável à informação. As pessoas têm de estar em todo o lado, o mais depressa e fácil possível. Isto foi possível de ser feito graças à evolução dos dispositivos portáteis e à chegada das comunicações sem fios.

As comunicações sem fios modernas são dominadas pela tecnologia baseada em RF. Elas são usadas diariamente em equipamentos tais como telemóveis, redes de computador sem fios (Wi-Fi), sistema de posição global (*Global Positioning Systems*, GPS), etc. Mas apesar da sua ampla utilização, a tecnologia baseada em RF apresentam limitações consideráveis. Como a gama de frequências disponível para os sistemas baseados em RF está a ser regulada estritamente, nem sempre é possível obter licenças para implementar novas redes de comunicações. Também, os sinais de rádio deslocam-se livremente, com consequências óbvias para a segurança da informação. E em alguns casos, encriptação dos dados é um recurso obrigatório numa rede sem fios segura. Outro problema ocorre quando se tenta usar sistemas de posição baseado em RF, como o GPS. Não só a sua precisão é limitada como é também praticamente impossível usá-lo dentro de um edifício, especialmente em caves ou parques de estacionamento cobertos. Por isso, é muito desejável encontrar alternativas aos sistemas sem fios baseados em RF.

A tecnologia IR foi apresentada com uma alternativa aos sistemas RF [3], oferecendo diversos benefícios em termos de largura de banda, simplicidade de implementação e segurança de dados, entre outros [7]. No entanto nunca foi uma tecnologia principal. Constrangimentos no nível de potência radiada, relativamente à saúde do utilizador, limitaram seriamente as taxas de transmissão ou alcance das comunicações dos equipamentos comerciais disponíveis na altura. No entanto, as tecnologias sem fio ótico continuam a desempenhar um papel importante nos desenvolvimentos futuros.

Algumas das primeiras referências a sistemas de comunicação usando luz visível provém de antigas tribos, as quais usavam sinais de fumo para transmitir informação, ou dos antigos gregos, os quais usaram os seus escudos polidos para transmitir mensagens usando a reflexão da luz solar. Mas

a primeira referência à investigação e criação do primeiro protótipo do sistema VLC provém de Alexander Graham Bell. Em 3 de Junho de 1880, Alexander Graham Bell e o seu assistente Charles Tainter tiveram sucesso a transmitir a primeira mensagem telefónica do mundo numa distância de 213 metros. O protótipo usava a luz solar como fonte, a qual foi modulada usando a vibração de um espelho refletor e depois capturado por um espelho parabólico com células de selênio fotocondutor, instalado no ponto focal [8, 9]. Um desenho deste protótipo é mostrado na **Figura 23**.

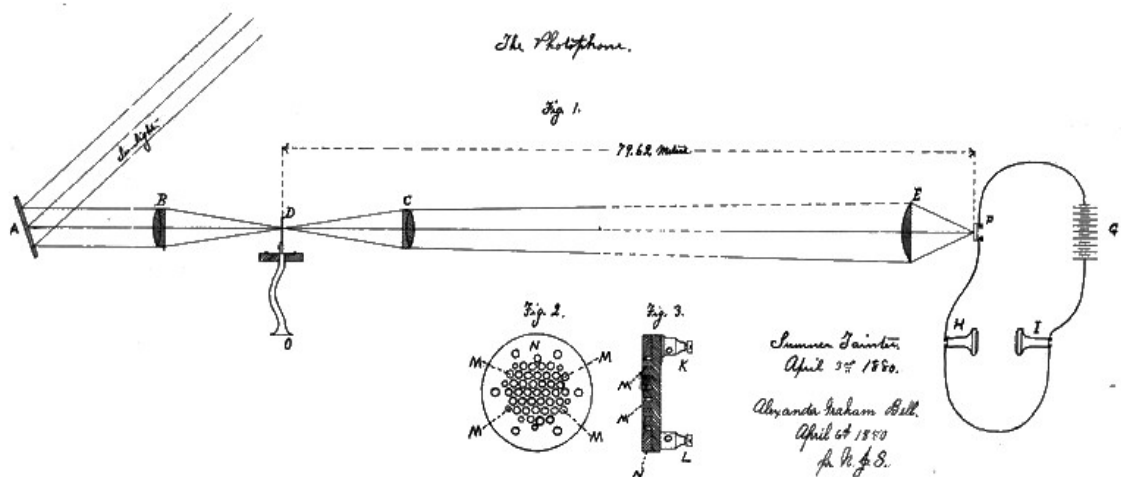


Figura 23 – O “photophone”

(FONTE: Desenho de Alexander G. Bell e Charles Tainter)

Apesar desta descoberta precoce, o VLC foi ultrapassado pelas vantagens das comunicações com fios e RF, graças à ajuda de grandes nomes como Hertz, Bell, Edison e Marconi, entre outros. No entanto, a história tem vários avanços significativos na área do VLC. Em meados de 1920, Oleg Vladimirovich Losev, que trabalhou como técnico em vários laboratórios de rádio na antiga União Soviética, observou emissão de luz a partir díodos retificadores de óxido de zinco e carboneto de silício cristalino, quando uma corrente passava por eles. Estes eram usados em recetores de rádio. Losev percebeu o potencial da sua descoberta e inventou o primeiro LED. Mais tarde, em 31 de Dezembro de 1929, ele escreveu:

“A invenção proposta usa o conhecido fenómeno de luminescência de um detetor carborundo (*carborundum detetor*) e consiste no uso do referido detetor como um relé ótico com a finalidade de construção de um telégrafo rápido ou de uma comunicação de telefone, transmissão de imagens e outras aplicações quando um ponto de contacto de luminescência é usado como a fonte de luz ligada diretamente a um circuito de corrente modulada”.

Com este plano de pensamento, Losey poderia ter iniciado a revolução das comunicações óticas mas ele morreu jovem e não reconhecido [10]. Foi apenas em 1962 que Nick Holonyak Jr. Criou o primeiro LED vermelho prático, depois de ter inventado um método de sintetizar cristais de Fosforeto de Arsenieto de Gálio (*Gallium Arsenide Phosphide GaAsP*), o qual exibiu comprimentos de onda na região do espectro visível [11]. Nos anos seguintes, a eficácia do LED vermelho aumentou significativamente e os primeiros LEDs comerciais foram apresentados por Monsanto e *Hewlett Packard* (HP) nos finais de 1960. Estes dispositivos apresentavam uma baixa eficiência, cerca de 0,1 lumens de fluxo de saída por cada Watt de potência elétrica de entrada. Eles foram usados principalmente em aplicações interior. Em 1968 outra descoberta tecnológica ocorreu com a adição de nitrogénio o qual levou à criação do primeiro LED laranja e amarelo, e no início de 1980 a chegada de dispositivos vermelhos baseados em Alumínio Gálio Arsénico (*Aluminum Gallium Arsenide, AlGaAs*), com eficiência na ordem dos 2 a 10 lumens por watt (lm/w), o LED chegou a novos mercados, tais como luzes traseiras dos automóveis, ou placas de mensagens em movimento para exteriores. Em 1990, P. Kuo e os seus co-trabalhadores apresentaram um novo LED amarelo Alumínio Gálio Índio Fosfato (*Aluminum Gallium Indium Phosphide, AlInGaP*) com performance comparável ao melhor dispositivo *AlGaAs* vermelho, e a gama de cores de alto brilho foi quase completa [12]. O azul era a cor que faltava mas em 1992, Shuji Nakamura apresentou o primeiro HB-LED azul. Ele foi, por alguma razão, isolado da principal pesquisa industrial. Quando a indústria já tinha colocado de parte a liga Nitrato de Gálio Índio (*Indium Gallium Nitride, InGaN*), ele perseverou e tomou um dos mais importantes passos na revolução da luz em estado sólido, dado que aquele LED azul é a base para os LEDs brancos HB-LED [13]. Com a crescente evolução na ótica, dispositivos semicondutores e ciência do material, a tecnologia LED cresceu de um modo exponencial. Desde 1960, os LEDs duplicaram a sua luz de saída e a eficiência de potência a cada 36 meses. Este comportamento ficou conhecido como “Haitz’s Law” [14] e é demonstrada na **Figura 24**.

Estes números confirmação a penetração do LED no mercado dos sistema de iluminação, não só em aplicações automóveis mas também na iluminação exterior das cidades, iluminação de interior em casa, etc.

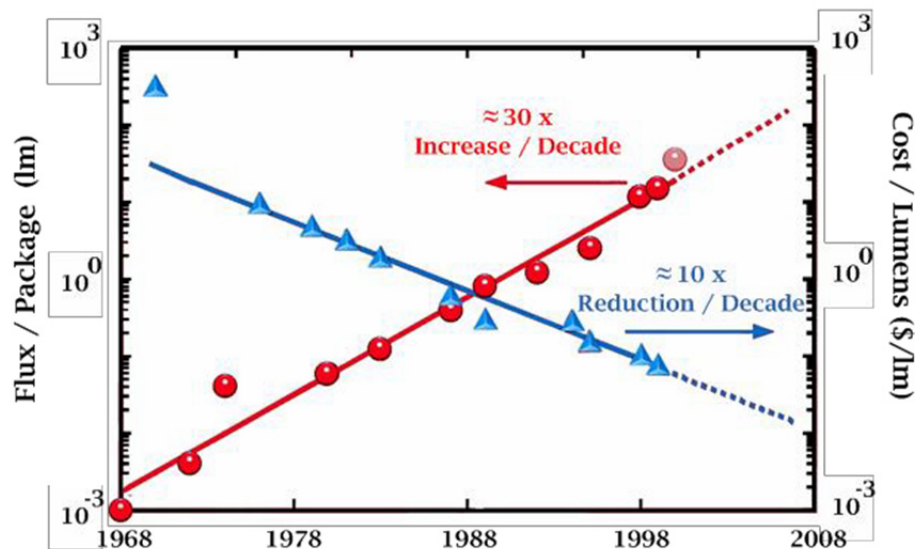


Figura 24 – Evolução do desempenho e custo para LEDs vermelhos disponíveis comercialmente

(FONTE: Dados foram compilados por R. Haitz a partir dos registos históricos da HP)

Outro importante marco para a criação do VLC foram os sistemas de comunicação sem fios IR apresentado por Gfeller [15]. Apesar do IR nunca ter sido completamente uma alternativa ao RF nos sistemas de comunicação sem fios, apresentou-se como uma tecnologia complementar com diversas vantagens. O intervalo de espectro utilizado entre os 780 e 950nm permitiu o uso de largura de banda ilimitada virtual que não é regulada mundialmente; os emissores IR e os detetores capazes de operações a alta velocidade estão disponíveis a um preço baixo; a transmissão de dados poderá ser confinada com um obstáculo opaco, permitindo reduzir interferência entre ligações e assegurar segurança dos dados de acessos exteriores; se intensidade de modulação e detecção direta são usadas, comprimentos de onda mais pequenos combinados com grandes áreas; detetores de *square-law* leva a uma diversidade espacial eficiente que previne desvanecimento por multicaminho. Este fator permite o uso de desenhos de conceção mais simples daqueles usados pelo RF, o qual é frequentemente sujeito a grandes flutuações de amplitude e fase do sinal. No entanto, num canal de comunicação ótico em espaço aberto, restrições a estas considerações necessitam de ser aplicadas, especialmente na largura de banda disponível.

Devido aos avanços no campo da iluminação de estado sólido, os HB-LEDs tornaram-se disponíveis numa vasta gama de cores. O HB-LEDs brancos apresentam-se com o futuro de cenários de iluminação tanto em exteriores como em interiores. Juntando a penetração dos

HB-LEDs na vida quotidiana e o conhecimento disponível das comunicações sem fios IR, o VLC apresenta-se como uma tecnologia promissora para o futuro das comunicações sem fios. É uma tecnologia ubíqua, não gerando interferência para a vida humana ou dispositivos eletrónicos existentes. Ao contrário dos sistemas RF, VLC poderá ser usado em hospitais, estações espaciais e outras localizações sensíveis a interferência eletromagnética. Aplicação como sistemas de áudio com luz visível [16], informação usando semáforos a LEDs [17] e a integração do VLC com sistema *Power-Line* (PLC) [18] são exemplos das capacidades do VLC. Um dos mais importantes passos tomados no sentido da normalização do VLC foi feito através da criação do *Visible Light Communications Consortium*, um grupo maioritariamente composto por empresas Japonesas que aceitaram partilhar informação em direção ao desenvolvimento desta nova tecnologia [19]. Outro sinal da importância do VLC foi a criação do *Task Group Seven* (TG7) no âmbito do grupo de trabalho IEEE 802.15 para redes de área pessoal sem fios (*Wireless Personal Area Networks*) [20].

3.5- Novas tendências nos sistemas de iluminação

A luz visível dos LEDs teve um grande desenvolvimento desde os seus dias de meros indicadores. A principal razão para isso foi o grande aumento na eficiência e redução do custo de produção [21]. Na **Figura 25** é apresentado um gráfico com a evolução dos valores de luminescência e a comparação com os valores efetivos de luminescência das fontes de luz convencionais: tubo fluorescente, halogénio automóvel, luz automóvel *Xenon High-Intensity Discharge* (HID) e lâmpada de descarga *Ultra-High-Performance* (UHP) usada para projeção. Os valores dos LEDs são codificados por cores para o correspondente comprimento de onda, e os LEDs brancos com tecnologia *Thin Film Flip Chip* (TFFC) da *LUMILEDS* são marcados com triângulos.

No lado direito da **Figura 25** estão as gamas requeridas para diversas aplicações [21].

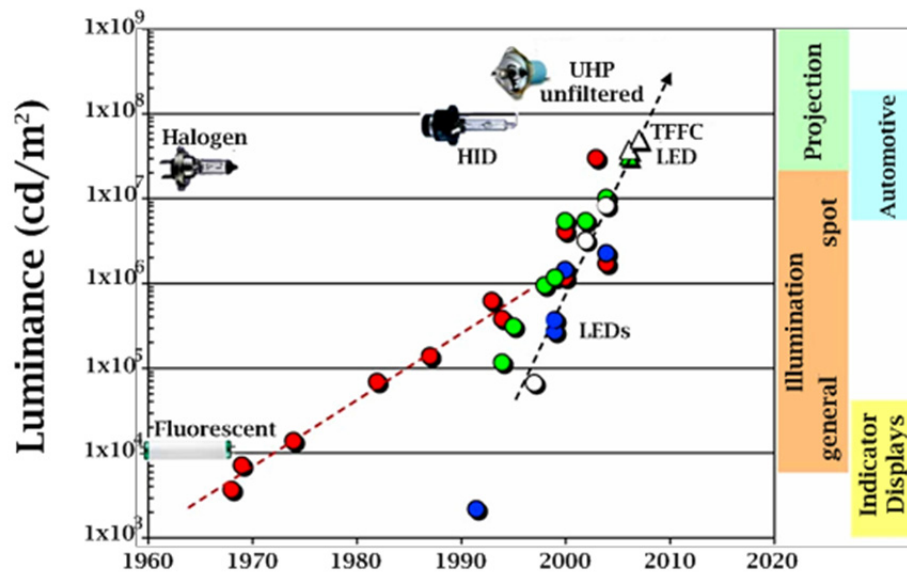


Figura 25 – Luminância de várias fontes de luz

(FONTE: "Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting", Journal of Display Technology, Vol. 3, No. 2, June 2007, pp. 160-175)

Tipo de lâmpada	Eficiência [lm/w]	Tempo de vida [h]
Incandescente 100w	15	1000
Incandescente 135w	12	5000
Halogénio 300w	24	3000
Halogénio compacto 50w	12	2500
Fluorescente compacto 11w	50	10000
Fluorescente 30w	80	20000
LED Branco (Ano 2000)	20	100000
LED Branco (Ano 2002)	30	100000
LED Branco (Ano 2005)	40	100000
LED Branco (Ano 2010)	50	100000

Tabela 2 – Eficiência, tempo de vida de fontes de luz branca convencional e semiconductor

Na tabela 2 são mostrados valores típicos de eficiência e tempo de vida de fontes de luz branca comuns, bem como valores preditos para LEDs de luz branca no ano de 2000 [22]. Embora os valores são uma previsão otimista para LEDs de luz branca, atualmente o LED da *Luxeon Rebel* consegue atingir valores de 100 lm/W, e um tempo de vida útil de 50.000 horas com manutenção de 70% de iluminação, quando alimentado com uma corrente de 700mA. E o expoente máximo da *Luxeom*, o LED K2, consegue atingir mais de 200lm/w, com um tempo de vida útil de 50.000 horas,

mantendo 70% de luminosidade, quando alimentado com uma corrente de 1A.

Nos Estados Unidos da América, cerca de um terço da eletricidade é gasta em aplicações de iluminação, com as lâmpadas incandescentes e fluorescentes a tomarem o papel principal nos dispositivos mais utilizados. Com as principais preocupações em economia de energia e redução de custos, os LEDs de luz branca tornam-se a perfeita solução para cenários futuros de iluminação. Os LEDs, ao contrário das convencionais fontes de luz, fornecem conversão direta da energia elétrica em luz, significando isto que a maior parte da energia é usada na iluminação e não é dissipada sob a forma de calor.

Os LEDs também são dispositivos mais robustos, com uma maior tolerância à humidade, menor geração de calor e maior tempo de vida útil, assim, o custo de substituição é drasticamente reduzido. O tamanho do LED também é uma grande vantagem. No entanto, tem o efeito contrário na concentração de calor, especialmente nos HB-LEDs, mas isto poderá ser resolvido através da dissipação do calor através da armadura da lâmpada. Também, as atuais tecnologias de encapsulamento abrem diversas possibilidades de dissipação de calor, tornando o *design* dos sistemas de iluminação LED mais simples, com o passar do tempo. Indiscutivelmente, os LEDs são mais agradáveis esteticamente [21, 23,24].

A principal aplicação de LEDs coloridos prende-se com a substituição da iluminação dos semáforos. Com o aumento da visibilidade atingida pelos HB-LEDs tornam estes dispositivos fáceis de adaptar. A conversão de cor é simples, sem ser necessário o uso de lentes coloridas, simplificando o *design*. Igualmente, num cenário de exterior, LEDs de luz branca podem ser facilmente adaptados à iluminação das ruas, com uma melhor distribuição de luz. O mesmo é válido para iluminação em ambientes interiores. LEDs Vermelho, verde e azul (RGB), especiais, estão também a ser usados em cartazes exteriores e ecrãs gigantes, com uma performance notável. Em todas estas aplicações, o uso de LEDs significa menor consumo de energia, levando a uma menor emissão de gases com efeito de estufa provocado pela produção de energia elétrica obtida a partir da queima de combustível fóssil.

3.6- Exemplos aplicações VLC

Com todas as novas aplicações para o LED HB, tornou-se possível a aplicação da VLC em diferentes cenários. Na **Figura 26** é demonstrado um exemplo de um cenário exterior. Todos os veículos, semáforos e placards luminosos usam HB-LEDs e estão equipados com sistemas VLC. No canto inferior esquerdo um autocarro passa o cruzamento, transmitindo a sua identificação para um

recetor montado no semáforo, esta informação é depois reencaminhada para uma estação de controlo onde um supervisor poderá verificar a localização do autocarro ou até a sua agenda, sem ser necessário recorrer a sistemas GPS baseado em RF. Este é um exemplo claro do um Sistema de Transporte Inteligente (*Intelligent Transportation System, ITS*), o qual poderá também ser usado em sistemas de portagem automatizada como já acontece em Portugal com o sistema Via Verde.

No centro da figura, o carro branco está a receber informação do semáforo, esta informação poderá estar relacionada com as condições de trânsito mais à frente, posição de GPS, etc. Também no carro branco, as luzes traseiras estão a enviar informação para o carro atrás dele, transmitindo que parou, mesmo que o condutor do carro vermelho não trave, o computador a bordo da viatura irá parar o carro automaticamente. Este é um exemplo do sistema *ADAS*, o qual poderá ser facilmente implementado usando o sistema VLC. Outra aplicação do sistema é demonstrada em segundo plano; uma pessoa pode apontar um dispositivo portátil equipado com o sistema VLC ao placard informativo e automaticamente receber informação relevante a partir dele, tal como um mapa ou publicidade. Outra utilização do sistema VLC, não demonstrada no desenho, prende-se com a possibilidade de usar o sistema de iluminação das ruas como pontos de acesso, criando uma rede global por entre toda a cidade, para partilha de informação relevante do local.



Figura 26 – Exemplos de aplicação VLC para exterior

Num cenário interior, as aplicações do sistema VLC são principalmente focadas no acesso à rede. Na **Figura 27** está presente um exemplo de uma rede de escritório usando iluminação com HB-LEDs juntamente com o sistema VLC e um *modem* PLC. Os cones no teto representam uma aproximação ao padrão de emissão de radiação (amarelo claro) e o campo de visão do recetor (a

cinzento), no caso dos terminais (portáteis, computadores e *PDA*), dado a proximidade do emissor e recetor, é desenhada somente um cone (amarelo escuro). Neste cenário é possível ver um computador ou portátil a aceder à rede através de dispositivos USB ou dispositivos integrados. As redes VLC são confinadas dentro das paredes opacas e o uso do *modem* PLC, como demonstrado no lado direito da figura, permite o uso da cablagem elétrica já implementada como a principal infraestrutura para interligar diferentes salas. Também, cada emissor é referenciado pelas respetivas coordenadas GPS permitindo deste modo o uso do sistema GPS dentro do edifício com uma maior resolução e precisão que os atuais sistemas baseados em RF.



Figura 27 – Exemplos de aplicação VLC para interior

(FONTE: "Integrated Systems of White LED Visible-Light Communications and Power-Line Communications", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 49, No. 1, Feb. 2003, pp. 71-79)

Em conclusão, com o aumento do uso dos HB-LEDs, a implementação de sistemas VLC poderá ser adaptado praticamente para qualquer cenário. O *Visible Light Communications Consortium* e o *IEEE 802.15 Task-Group 7* têm publicado informações sobre essas aplicações. Como exemplo temos o sistema localização-informação a partir de um semáforo desenvolvido por “*The Nippon Signal Co., Ltd*” e o sistema de entrega de publicidade ou promoções numa dada área de um supermercado, na qual um carrinho de compras inteligente fornece informação acerca de um produto ou promoções disponíveis numa específica área do supermercado, desenvolvido pela “*NEC*” e pela “*Matsushita Electric Works*” [25].

3.7-Descrição do emissor

A História tem vários exemplos de dispositivos emissores de luz usados para transmitir mensagens.

Os escudos dos antigos gregos, o espelho de Alexander G. Bell usando no *photophone* (já referido anteriormente) e até mesmo as lanternas de luz, ainda são usados atualmente. Isto torna a luz visível como uma opção viável como um meio de transmissão. Uma fonte de iluminação artificial ou natural ou um refletor de luz é o único dispositivo necessário. No entanto, um emissor VLC atual ainda necessita de pormenores adicionais.

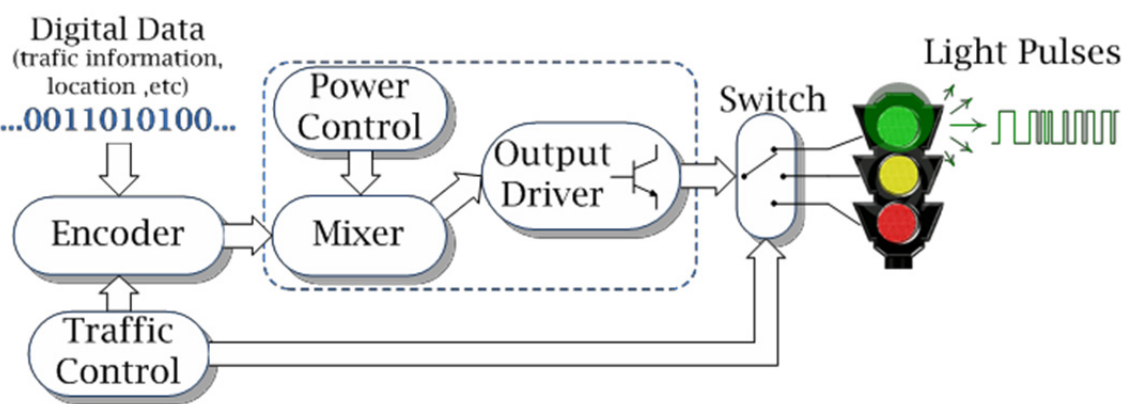


Figura 28 – Diagrama de blocos de um emissor VLC para um semáforo

Antes de comparar o emissor VLC desejável com os emissores comercialmente disponíveis, torna-se necessário descrever e especificar o dispositivo em si. O diagrama de blocos da **Figura 28** define os blocos básicos para um emissor VLC num semáforo de trânsito. O sinal de dados digital é passado para um codificador de dados que modula o sinal no formato desejado, neste caso, numa simples codificação *Non-Return to Zero* (NRZ) com modulação de amplitude *On-Off Keying* (OOK). Este bloco também recebe informação da unidade de controlo de tráfego para que ele consiga guardar a informação quando as cores das luzes muda, certificando de que não existe transmissão durante um curto período de tempo. Este sinal é então passado para um misturador o qual irá unir o sinal de dados com a fonte de alimentação, proveniente do bloco de controlo de potência. O sinal resultante é então usado para controlar a comutação do LED usando o driver de saída.

Para controlar qual a luz que deverá estar ligada, uma unidade de controlo do semáforo controla um comutador que liga a correta cor do LED no driver de saída. Por vezes, as características elétricas dos diferentes LEDs de cor, como por exemplo, corrente máxima direta ou

tensão direta, poderão implicar o uso de drivers de saída com três diferentes canais e uma ligeira diferença na comutação.

Considerando o emissor pretendido como sendo um produto completo pronto-a-usar, o codificador poderá ser integrado ou a variedade de sinais de entrada especificados. Para construir este bloco, um microprocessador é uma solução relativamente mais económica mas a sua atualização não é um processo simples. Usar uma FPGA (*field-programmable gate array*) poderá ser mais caro mas terá uma melhor capacidade de processamento de dados, sendo que a sua atualização será também mais simples.

Na dianteira da eletrónica, integrar matrizes de LEDs é essencial para especificar o consumo de potência, alcance ótico, frequência máxima de operação, etc.

O controlo de potência e os blocos de mistura são também muito importantes dado que eles controlam os níveis de corrente dos LEDs, mantendo um valor médio constante.

Atualmente nenhum sistema está comercialmente disponível e mesmo a descoberta do componente correto para construir um é uma tarefa árdua. Os emissores atualmente disponíveis são dedicados a comprimentos de onda na região do Infravermelho e as suas aplicações vão desde controlos remotos até imagens digitais, comunicações óticas por RF, lasers em estado sólido, sensores automóveis e controle de processos industriais.

3.8 – Díodos Emissores de Luz (LED) para VLC

Nos capítulos anteriores, as vantagens e a evolução dos LEDs nos sistemas de iluminação foram abordados. Esses dispositivos têm evoluído significativamente ao longo dos últimos anos, tornando-se uma solução ideal para os futuros sistemas de iluminação. Sendo um dispositivo semicondutor, eles também apresentam capacidades de comutação rápida que os torna, particularmente os HB-LEDs, no perfeito emissor de um sistema da VLC.

Ao pesquisar fichas técnicas dos HB-LEDs de vários fabricantes, existem dois conjuntos de informação tipicamente disponível, uma em relação às características elétricas e outra relativamente às características óticas. Alguns fabricantes, como a *OSRAM* ou *Philips LUMILEDS*, fornecem informação bastante detalhada com tabelas e diagramas explicando as variações dos parâmetros, e também modelos de simulação para simulações elétricas e óticas. Outros fabricantes, como a *LUMUX*, apresentam somente tabelas com informação básica. No entanto, a informação típica resolve o seguinte:

- Características óticas:
 - Tecnologia de fabrico.
 - Gama de cores (pico de comprimento de onda ou temperatura da cor).
 - Fluxo luminoso (Φ_L)
 - Half-power-angle (hpa)

- Características elétricas:
 - Voltagem direta típica (V_p)
 - Corrente direta (I_F)
 - Temperatura de Funcionamento

Na tabela 3, está a comparação entre as características óticas de alguns dos mais populares HB-LEDs no mercado. As informações foram recolhidas em fichas técnicas disponíveis no *site* do fabricante. Na tabela 4 estão as respetivas características elétricas.

Fabricante	Modelo	Tecnologia	Cor	Pico de Comprimento Onda ou Temperatura daCor	Φ_L Típico [lm] @ I_F [mA]	hpa [°]
Lumex	SML-LX3939UWC	InGaN	Branco	6300 Kelvin	190,0 @ 350	65
	SML-LX2723UWC	InGaN	Branco	6300 Kelvin	31,0 @ 350	60
	SML-LX2723SIC	AlInGaP	Vermelho	630 nm	31,0 @ 350	60
	SML-LX2723SYC	AlInGaP	Amarelo	590 nm	31,0 @ 350	60
	SML-LX2723UPGC	InGaN	Verde	525 nm	46,5 @ 350	60
	SML-LX2723USBC	InGaN	Azul	470 nm	9,0 @ 350	60
Philips LUMILEDS	LXML-PWC1-0100	InGaN	Branco	6500 Kelvin	180,0 @ 700	70
	LXK2-PW14-V00	InGaN	Branco	6500 Kelvin	140,0 @ 1500	70
	LXML-PD01-0040	AlInGaP	Vermelho	627 nm	85,0 @ 700	70
	LXK2-PD12-S00	AlInGaP	Vermelho	627 nm	100,0 @ 700	70
	LXML-PL01-0030	AlInGaP	Âmbar	590 nm	65,0 @ 700	70
	LXK2-PL12-R00	AlInGaP	Âmbar	590 nm	75,0 @ 700	70
	LXML-PM01-0100	InGaN	Verde	530nm	180,0 @ 700	70

	LXK2-PM14-U00	InGaN	Verde	530nm	130,0 @ 1500	70
	LXML-PB01-0030	InGaN	Azul	470 nm	58,0 @ 700	70
	LXK2-PB14-Q00	InGaN	Azul	470 nm	46,0 @ 1500	70
OSRAM	LUW W5SM	ThinGaN	Branco	6500 Kelvin	81,0 @ 350	60
	LUW W5AP	ThinGaN	Branco	6500 Kelvin	311,0 @ 1400	70
	LR W5SM	Thinfilm InGaAIP	Vermelho	625 nm	49,0 @ 500	60
	LR W5AP	Thinfilm InGaAIP	Vermelho	625 nm	150,0 @ 1400	70
	LA W57B	InGaAIP	Âmbar	617 nm	17,6 @ 400	60
	LA W5AP	Thinfilm InGaAIP	Âmbar	617 nm	185,0 @ 1400	70
	LY W57B	InGaAIP	Amarelo	587 nm	17,6 @ 400	60
	LY W5AP	Thinfilm InGaAIP	Amarelo	590 nm	140,0 @ 1400	70
	LV W5SG	InGaN	Verde	505 nm	35,0 @ 500	60
	LT W5AP	ThinGaN	Verde	528 nm	185,0 @ 1400	70
	LB W5SG	InGaN	Azul	470 nm	11,0 @ 500	60
	LB W5AP	ThinGaN	Azul	470 nm	75,0 @ 1400	70

Tabela 3–Características óticas dos HB-LEDs

Uma rápida comparação dos dados revela que os atuais HB-LEDs tem valores de fluxo luminoso mais altos, principalmente os LEDs brancos e verdes. Os LEDs azuis são os que mostram os menores valores de fluxo luminoso, o que é perfeitamente compreensível, dado que estes são as mais recentes descobertas e o desenvolvimento ainda está num estado inicial. Tendo em conta que os HB-LEDs são utilizados principalmente para fins de iluminação, os valores de *Half-Power-Angle(hpa)* são muito similares produzindo um padrão de radiação luz uniforme ao invés de um padrão direcional que pode ser atingida com valores menores.

Com uma comparação das tabelas 3 e 4, verifica-se que os valores mais altos de corrente geralmente significam maiores valores de fluxo luminoso. Evidentemente, para altas correntes, desenhar um *driver* de LED é um duplo desafio em termos de potência da eletrônica e dissipação de

calor. Quanto maior a potência aplicada, maior terá de ser a dissipação de calor.

Fabricante	Modelo	Cor	V _F Típico [V]@I _F [mA]	Max I _F (DC) [mA]	Temp. min [°C]	Temp. max [°C]
Lumex	SML-LX3939UWC	Branco	7,3@350	700	-40	80
	SML-LX2723UWC	Branco	3,2@350	350	-40	85
	SML-LX2723SIC	Vermelho	2,0@350	350	-40	85
	SML-LX2723SYC	Amarelo	2,0@350	350	-40	85
	SML-LX2723UPGC	Verde	3,2@350	350	-40	85
	SML-LX2723USBC	Azul	3,2@350	350	-40	85
Philips LUMILEDS	LXML-PWC1-0100	Branco	3,4@700	1000	-40	135
	LXK2-PW14-V00	Branco	3,9@1500	1500	---	150
	LXML-PD01-0040	Vermelho	3,6@700	700	-40	120
	LXK2-PD12-S00	Vermelho	3,6@700	700	---	150
	LXML-PL01-0030	Âmbar	3,6@700	700	-40	120
	LXK2-PL12-R00	Âmbar	3,6@700	700	---	150
	LXML-PM01-0100	Verde	3,4@700	1000	-40	135
	LXK2-PM14-U00	Verde	3,9@1500	1500	---	185
	LXML-PB01-0030	Azul	3,4@700	1000	-40	135
	LXK2-PB14-Q00	Azul	3,9@1500	1500	---	185
OSRAM	LUW W5SM	Branco	3,2@350	1000	-40	110
	LUW W5AP	Branco	3,5@1400	2000	-40	150
	LR W5SM	Vermelho	2,2@400	1000	-40	110
	LR W5AP	Vermelho	2,5@1400	2000	-40	150
	LA W57B	Âmbar	2,2@400	400	-40	100
	LA W5AP	Âmbar	2,5@1400	2000	-40	150
	LY W57B	Amarelo	2,2@400	400	-40	100
	LY W5AP	Amarelo	2,5@1400	2000	-40	150
	LV W5SG	Verde	3,8@350	500	-40	100
	LT W5AP	Verde	3,5@1400	2000	-40	150
	LB W5SG	Azul	3,8@350	500	-40	100
	LB W5AP	Azul	3,5@1400	2000	-40	150

Tabela 4 – Características elétricas HB-LEDs

Ao projetar um emissor, a frequência máxima de operação é um fator chave, uma vez que para se ter uma grande largura de banda é necessário escolher o correto projeto e os componentes corretos. Para os blocos de controlo de potência, misturador e driver de saída existem diversas alternativas de componentes disponíveis, com informação extensiva das suas características elétricas, mas escolher o LED apropriado pode-se tornar um trabalho árduo. Embora os fabricantes não tenham um único conjunto de condições de teste para caracterizar os LEDs, a informação ótica é abundante e a comparação não é muito difícil. Alguns fornecedores até fornecem *software* gratuito para ajudar a desenvolver soluções de iluminação, calcular a dissipação de potência e controlo de cor. O problema surge quando se tenta determinar as capacidades de comutação dos LEDs.

Nos dispositivos de comunicações por IR, o tempo de subida e descida (*Rise and Fall Time*) é informação padrão nos folhetos técnicos, no entanto, nos LEDs de iluminação tal informação não aparece nos folhetos técnicos dos componentes. Depois de uma busca intensiva, o único conjunto de informação encontrada acerca do comportamento da comutação de LEDs na região do visível, vem da *VISHAY*, no documento “*Physics of Optoelectronic Devices*” [26] mas estes são valores de referência para a tecnologia de produção no qual os LEDs são agrupados por cores. Os valores específicos para cada LED não são apresentados. Também as condições de teste são para correntes diretas de 10mA, o que levanta a questão de saber se a informação indicada é para LEDs regulares, HB-LEDs ou para ambos.

3.9– Referências

- [1] The Colour Science Association of Japan, "Handbook of Colour Science, 2nd Ed. University of Tokyo Press, 1998.
- [2] F. Kimura, T. Takahashi, Y. Mekada, I. Ide, H. Murase, T. Miyahara, and Y. Tamatsu, "Measurement of Visibility Conditions toward Smart Driver Assistance for Traffic Signals," in Intelligent Vehicles Symposium IEEE, pp. 636-641, 2007.
- [3] – Gfeller, F. R. and U. Bapst; —Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation, Proceedings of the IEEE Vol. 67, No. 11, Nov. 1979, pp. 1474-1486
- [4] – Pang, G.; T. Kwan; H. Liu; Chi-Ho Chan; —LED Wireless, IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 8, No. 1, Jan. 2002, pp. 21-28
- [5] – Craford, M. G.; —LEDs Challenge the Incandescents, IEEE Circuits and Devices Magazine, Vol. 8, No 5, Sept. 1995, pp. 24-29
- [6] – Tavares, A. and R. Valadas; —IRWLAN Deliverable 1.3 - Signal-to-Noise-Ratio estimation and combining techniques, IRWLAN Project (PRAXIS 2/2.1/TIT/1578/95), May 1999
- [7] – Kahn, J. M. and J. R. Barry; —Wireless Infrared Communications, Proceedings of the IEEE Vol. 85, No. 2, Feb. 1997, pp.265-298
- [8] – Bell, A.; —Upon the Production of Sound by Radiant Energy, Paper read before the National Academy of Sciences, April 21st, 1881, available at:
<http://www.archive.org/details/uponproductionof00bellrich>
- [9] – Hranilovic, S.; —Wireless Optical Communication Systems, New York, 2005 Springer Science + Business Media, Inc., 2005, Chapter I
- [10] – Zheludev, N.; "The life and times of the LED — a 100-year history", Nature Photonics, Vol. 1, Apr. 2007, pp. 189–192,;
<http://www.nanophotonics.org.uk/niz/publications/zheludev-2007-ltl.pdf>
- [11] – Perry, T. S.; —Red Hot [light emitting diodes], IEEE Spectrum, Vol. 40, No. 6, June 2003, pp. 26–29
- [12] – Craford, M. G.; —LEDs Challenge the Incandescents, IEEE Circuits and

Devices Magazine, Vol. 8, No 5, Sept. 1995, pp. 24-29

[13] – Riordan, M.; —Books: Tales of Nakamura [review of Brilliant! Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology (Johnstone, B.; 2007)], IEEE Spectrum, Vol. 44, No. 5, May 2007, pp. 56-58

[14] – Haitz, R.; F. Kish; J. Tsao; J. Nelson; —The Case for a National Research Program on Semiconductor Lighting, Optoelectronics Industry Development Association (OIDA 1999), Washington, Oct. 1999:

http://lighting.sandia.gov/lightingdocs/hpsnl_long.pdf

[15] – Gfeller, F. R. and U. Bapst; —Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation, Proceedings of the IEEE Vol. 67, No. 11, Nov. 1979, pp. 1474-1486

[16] – Pang, G.; Ka-Lim Ho; T. Kwan; E. Yang; —Visible Light Communication for Audio Systems, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 45, No. 6, Nov. 1999, pp. 1112-1118

[17] - Akanegawa, M.; Y. Tanaka; M. Nakagawa; —Basic Study on Traffic Information System Using LED Traffic Lights, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 2, No. 4, Dec 2001, pp. 197-203

[18] – Komine, T. and M. Nakagawa; —Integrated Systems of White LED Visible-Light Communications and Power-Line Communications, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 49, No. 1, Feb. 2003, pp. 71-79

[19] - Visible Light Communications Consortium website:

<http://www.vlcc.net>

[20] – IEEE 802.15 WPAN Task Group 7 website:

<http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>

[21] – Krames, M. R.; O. B. Shchekin; R. Mueller-Mach; G. O. Mueller; Zhou Ling; G. Harbers; M. G. Craford; —Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting, Journal of Display Technology, Vol. 3, No. 2, June 2007, pp. 160-175

[22] – Haitz, R.; F. Kish; J. Tsao; J. Nelson; —The Case for a National Research Program on Semiconductor Lighting, Optoelectronics Industry Development Association (OIDA 1999),

Washington, Oct. 1999, :

http://lighting.sandia.gov/lightingdocs/hpsnl_long.pdf

[23] – Krames, M. R.; H. Amano; J. J. Brown; P. L. Heremans; —Introduction to the Issue on High-Efficiency Light-Emitting Diodes, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, No. 2, March 2002, pp. 185-188

[24] – Shur, M. S. and R. Zukauskas; —Solid-State Lighting: Toward Superior Illumination, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 10, Oct. 2005, pp. 1691-1703

[25] – Haruyama, Shinichiro; —Japan’s Visible Light Communications Consortium and Its Standardization Activities, Jan. 2008, available at:

<https://mentor.ieee.org/802.15/file/08/15-08-0061-01-0vlc-japan-s-visible-light-communications-consortium-and-its.pdf>

[26] – VISHAY; —Physics of Optoelectronic Devices, Technical Note, Rev. 1.2, July 2004, :

<http://www.vishay.com/docs/80097/physics.pdf>

Capítulo 4 – Ambiente laboratorial

4.1- Caracterização Optoeletrónica

Tal como referido anteriormente, nos sistemas de transmissão de dados podemos utilizar dois tipos de fontes, os LEDs (*Light-Emitting Diodes*) ou os LASERs (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*) de estado sólido como emissores, fibras óticas como canais de transmissão [1] e dispositivos de multiplexagem/desmultiplexagem para obter melhores desempenhos no tratamento dos sinais emitidos. Nas experiências realizadas neste trabalho e em trabalhos anteriores, foram usados três LEDs de cores diferentes ou seja de três comprimentos de onda diferentes: o vermelho de 626 nm, o verde de 525 nm e o azul de 470 nm, e foram aplicados outros três LEDs semelhantes aos dos canais emissores (vermelho, verde e azul), para estudar a influência da variação do comprimento de onda na radiação de fundo.

Para a desmultiplexagem dos canais foram testados e caracterizados opto-electronicamente, em trabalhos anteriores [2, 3], vários tipos de estruturas heterogéneas semicondutoras baseadas em foto-díodos pin de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H e/ou a-SiC:H). Foram estudados vários dispositivos que apresentam espessuras diferentes na camada intrínseca do foto-díodo pin baseado em a-Si:H, tendo-se concluído que o dispositivo que melhor permitia a descrição dos três canais R&G&B era o dispositivo com 200 nm de espessura na camada do pin 1 baseada em a-SiC:H e de 1000 nm de espessura na camada do pin 2 baseada em a-Si:H. Estas estruturas semicondutoras são fabricadas sobre um substrato de vidro onde se deposita previamente um eléctrodo eléctrico transparente baseado em ITO – *Indium-Tin Oxide*. Depois de depositar a estrutura multicamada (pin1/pin2), posteriormente é aplicado outro eléctrodo eléctrico transparente (ITO). Estes dois contactos eléctricos servem para medir a foto-corrente gerada pelo dispositivo e também para permitir a sua polarização eléctrica, são transparentes para permitirem a passagem dos sinais óticos. Estes dispositivos foram fornecidos pelo Centro de Física Molecular do Instituto Superior Técnico, e foram produzidos utilizando a técnica PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) [2,3,11].

Através dos estudos anteriores, ficou provado [2] que com a estrutura NC5 se conseguiam obter melhores resultados na desmultiplexagem *WDM* dos sinais luminosos enviados, na gama do visível, sendo por isso, o dispositivo escolhido para desenvolver este trabalho.

A estrutura NC5 é constituída por dois foto-díodos pin empilhados, como se pode verificar na **Figura 29**. Diz-se que estes dois foto-díodos são empilhados porque existe uma grande interação entre os dois. O primeiro foto-díodo (pin1) tem uma camada intrínseca muito fina (200 nm) baseada em a-SiC:H, e o segundo (pin2) tem uma camada intrínseca espessa (1000 nm) baseada em a-Si:H [2, 6, 11].

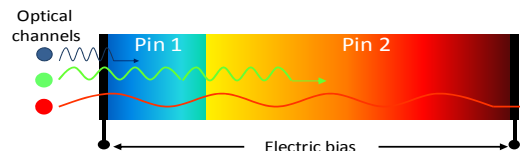


Figura 29 – Diagrama da secção transversa da estrutura NC5

Nesta estrutura observam-se duas áreas distintas de geração de foto-corrente, uma na zona dos 500 nm e outra na zona dos 625 nm, dependentes das tensões de polarização aplicadas. Acima dos 625 nm o valor da foto-corrente é independente da tensão de polarização direta ou indireta [2].

Estas duas zonas distintas devem-se às diferentes características de cada foto-díodo. Do estudo de cada um concluiu-se que para o foto-díodo frontal baseado em a-SiC:H (pin1), se observa um máximo de foto-corrente em torno dos 470 nm e que em torno dos 600 nm o dispositivo deixa de gerar foto-corrente. Este facto justifica-se pelo valor de 2.1eV do hiato energético do a-SiC:H. Em termos práticos, este foto-díodo absorve o azul (470 nm) e o verde (525 nm) e deixa passar, para o pin2, o vermelho (626 nm). Para o foto-díodo posterior baseado em a-Si:H (pin2), observou-se um máximo de foto-corrente em torno dos 600 nm, o que significa que absorve o vermelho (626 nm) que o pin1 deixa passar. O dispositivo deixa de gerar foto-corrente em torno dos 700 nm, o que é justificado pelo valor de 1,8 eV do hiato energético do a-Si:H [2, 5, 8].

Em suma, ambas as estruturas empilhadas foram desenvolvidas de forma a alcançar uma grande absorção à luz azul e grande transparência à luz vermelha, no foto-díodo frontal (pin1), assim como grande absorção da luz vermelha no foto-díodo posterior (pin2) [9].

Em trabalhos anteriores, também se chegou à conclusão que o valor da foto-corrente para o sinal vermelho (626 nm) é sempre constante qualquer que seja a tensão aplicada, e que para os sinais verde (525 nm) e azul (470 nm) a foto-corrente varia com a tensão sendo este valor tanto maior quanto maior for a tensão inversa aplicada [3, 4, 11].

No caso das experiências anteriores, onde se tinha como objetivo a caracterização

optoeletrônica do dispositivo NC5, sob diferentes condições de iluminação, ou seja, com ou sem radiação de fundo, verificou-se a influência da variação do comprimento de onda na radiação de fundo, na influência da potência ótica dos canais de emissão e sobre a variação da frequência de transmissão. Foram aplicados outros três LEDs semelhantes aos dos canais emissores (vermelho, verde e azul), para estudar a influência da variação do comprimento de onda na radiação de fundo para os valores de tensão de polarização de -8V e +1V e concluindo-se que, considerando a polarização inversa, a radiação de fundo vermelha amplifica os valores de foto-corrente do canal azul, e a radiação de fundo azul amplifica o canal vermelho e verde. No caso da polarização direta, apenas a radiação de fundo azul amplifica os valores da foto-corrente do canal vermelho. De forma geral, foi concluído que à medida que a intensidade do canal aumenta também aumenta a amplitude da foto-corrente, qualquer que seja a radiação de fundo aplicada. Sendo mais notória para a polarização inversa do que para a polarização direta [11].

4.2 - Desmultiplexagem do sinal de foto-corrente

O objetivo da primeira fase deste trabalho consiste na caracterização optoeletrônica do dispositivo NC5 como desmultiplexador, sob diferentes condições de iluminação, nomeadamente do comprimento de onda dos LEDs geradores do sinal ótico e a radiação de fundo. Este estudo teve como intuito de avaliar o desempenho do dispositivo em função da polarização ótica aplicada, a fim de verificar os resultados e conclusões obtidos nos trabalhos anteriores já referidos anteriormente.

Para se caracterizar a estrutura semicondutora como dispositivo desmultiplexador mediu-se, com um osciloscópio, a foto-corrente gerada sob diferentes valores de tensão aplicada, usando fontes de luz visível de diferentes comprimentos de onda, moduladas à mesma frequência e com radiação de fundo para realizar a polarização ótica. Esta abordagem teve como principal objetivo aferir sobre a influência do comprimento de onda da iluminação de fundo. A montagem experimental está esquematizada na **Figura 30**.

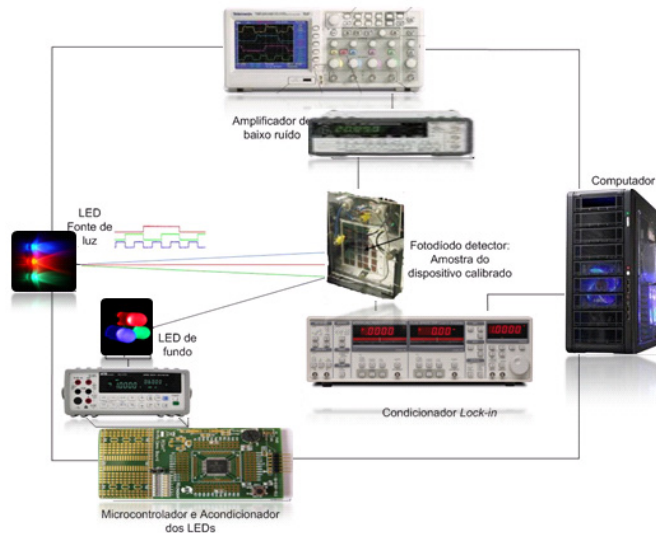


Figura 30 – Diagrama da montagem para caracterizar o dispositivo

As fontes de luz usadas nesta experiência, para simular os diferentes canais de transmissão, foram LEDs com comprimentos de onda que cobrem a região do espectro visível: LED de luz vermelha (626 nm), verde (525 nm) e azul (470 nm). Uma vez que se pretende que cada LED represente um canal ótico diferente, regulou-se a corrente de polarização dos LEDs, através de um sinal quadrado. A figura mostra, ainda, um amplificador de *Lock-in* cuja principal função, nesta montagem, é controlar a tensão de polarização do foto-díodo pin.

Usando um microcontrolador gerador de sequências binárias individuais nos três canais, foi possível controlar a intensidade luminosa dos LEDs emissores, ligados a esses canais de forma individual. Este microcontrolador controlou também o ritmo binário, o qual é igual para todos os canais. Para se controlar a tensão de polarização do foto-díodo recorreu-se a um amplificador de *Lock-in*. Para ler os sinais de polarização ótica dos LEDs e a foto-corrente gerada pelo dispositivo utilizou-se um osciloscópio digital de 4 canais. Para amplificar o sinal de corrente do dispositivo foi necessário utilizar-se um pré-amplificador de baixo ruído.

De salientar que todos os gráficos apresentados neste projeto estão normalizados, isto é, o sinal a normalizar é decomposto nas suas duas componentes tempo e amplitude. Na componente das amplitudes soma-se ao sinal o mínimo do sinal e este é por sua vez dividido pela diferença entre o máximo e o mínimo de modo a obter o sinal normalizado. A forma de onda do sinal é reconstruída juntando a amplitude normalizada com o domínio do tempo [8, 11].

4.3- Estudo dos canais R & G com e sem polarização ótica

Para esta primeira experiência efetuada, tínhamos como objetivo o estudo dos canais separadamente e com isto configurámos as intensidades luminosas dos vários LEDs num valor fixo para ambos os canais, de $1,56\mu\text{A}$ (para o LED azul (470nm), o LED vermelho (626nm) e para o LED verde (525nm). Variámos o Bit Rate de 2000bps a 6000bps nos três LEDs. Foi aplicada uma tensão de polarização ótica a variar de -8V a +1V, e não foi usada radiação de fundo nas primeiras experiências. A combinação de bits escolhida foi 10101010 para os três LEDs (azul, vermelho e verde). Foi realizado o estudo individual de cada canal.

Nas experiências onde foram aplicadas a radiação de fundo, só foi aplicada a radiação do LED vermelho, visto que em trabalhos anteriores e conforme verificado no capítulo anterior, foi verificado que para polarização inversa, abaixo dos 500 nm, o sinal é amplificado pelo fundo vermelho. Para comprimentos de onda superiores, o sinal passa a ser amplificado pelo fundo azul e atenuado pelo fundo vermelho. A razão de amplificação do fundo vermelho, para comprimentos de onda curtos, é superior à razão de amplificação do fundo azul, para comprimentos de onda longos. O fundo verde atenua qualquer comprimento de onda [11]. Assim passou-se ao estudo de cada canal individual.

4.4- Estudo do Canal Vermelho (R)

Esta série de medidas foi repetida usando agora o LED vermelho no canal de transmissão e manteve-se a mesma forma do sinal transmitido pelo canal, mas para o Bit Rate 2000bps. Na **Figura 31** mostra a foto-corrente medida sem radiação de fundo para uma tensão de -8V e +1V, para o sinal transmitido pelo LED vermelho (a sua forma está representada no topo da figura).

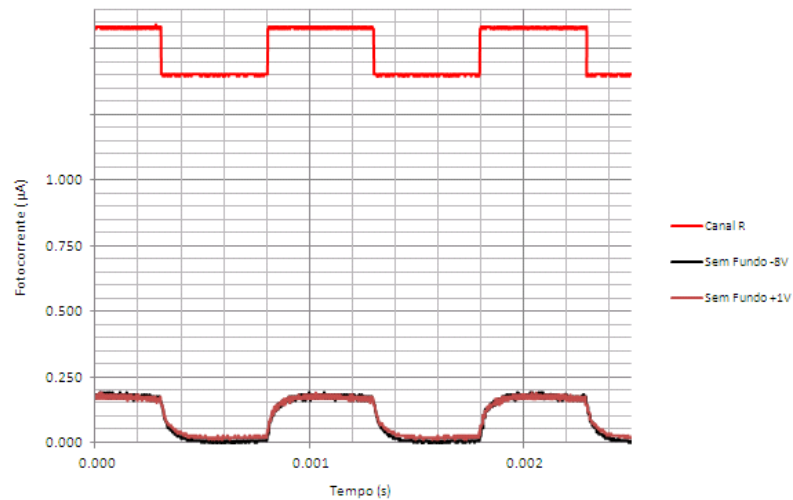


Figura 31 – Foto-corrente do canal vermelho com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Para este caso, e na ausência da radiação de fundo, os valores da foto-corrente são idênticos quer para uma tensão de polarização de -8V quer para uma tensão de +1V. Este resultado está em concordância com as medidas da resposta espectral, como se pode verificar em trabalhos anteriores [11].

A **Figura 32** mostra a curva da foto-corrente do canal vermelho, para Bit Rate 2000bps, com aplicação do fundo vermelho, para uma tensão de -8V e +1V.

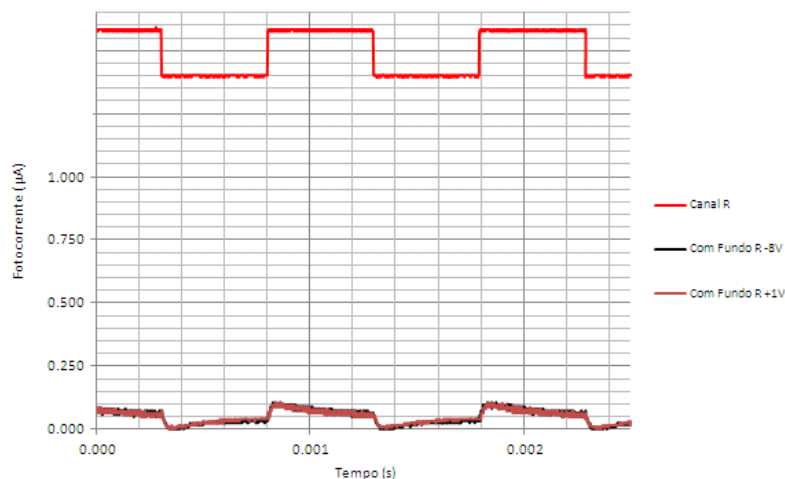


Figura 32 – Foto-corrente do canal vermelho com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho

Para as condições da figura acima, pode verificar-se, que ao aplicar a radiação de fundo do LED vermelho, com uma aplicação de um Bit Rate 2000bps, para uma tensão de polarização -8V e +1V, verificámos que este não varia com a tensão de polarização, onde os sinais estão sobrepostos, mas o valor da amplitude, só é máximo quando existe a transição do Bit para “1” e depois o sinal vai decaindo para metade do seu valor como se tivesse um comportamento de um condensador a descarregar. De notar também, que sempre que o Bit passa a “1” o valor da amplitude tem tendência a ser crescente e quando o bit passa a “0”, tem a tendência para ser decrescente.

A **Figura 33** mostra os valores da foto-corrente do canal vermelho com um Bit Rate 6000bps, para uma tensão de -8V e +1V sem fundo.

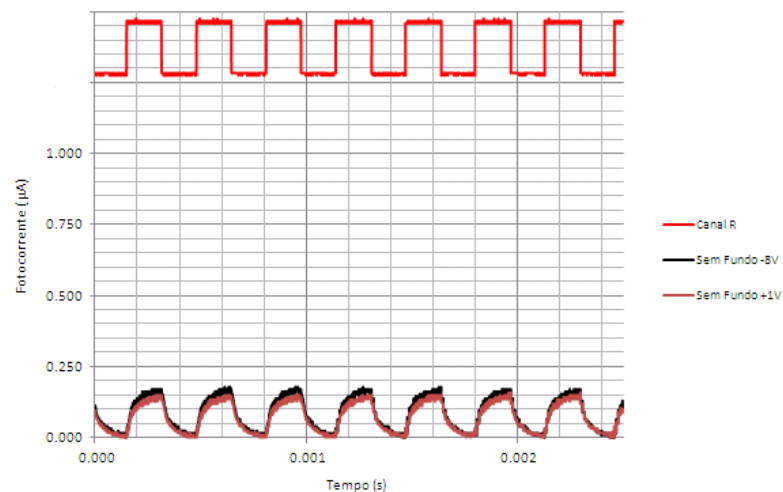


Figura 33 – Foto-corrente do canal vermelho com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Na experiência anterior foi aplicado um Bit Rate 6000bps para uma tensão de -8V e +1V, sem aplicação de fundo e mais uma vez verifica-se que em ambas as polarizações os sinais são idênticos, ficando sobrepostos.

A **Figura 34** mostra os valores da foto-corrente do canal vermelho com um Bit Rate 6000bps, para uma tensão de -8V e +1V, com aplicação da polarização de fundo do LED vermelho.

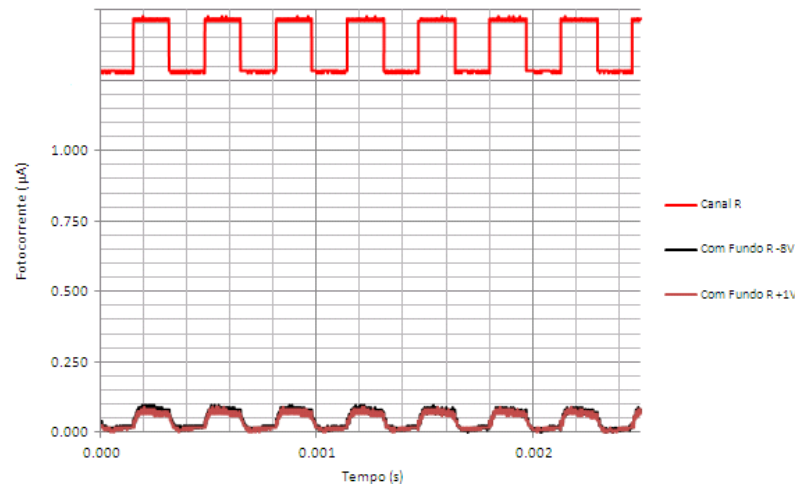


Figura 34 – Foto-corrente do canal vermelho com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.

Tanto nesta experiência com nas anteriores, podemos verificar que sem a polarização de fundo do LED vermelho e com a aplicação da radiação de fundo do LED vermelho, os valores dos sinais são sempre muito próximos, desta forma podemos concluir que, quando se aplica a polarização de fundo a amplitude do sinal da foto-corrente tem a tendência a diminuir logo após a transição do Bit a “1”, comportando-se como um condensador a descarregar.

4.5- Estudo do Canal Verde (G)

Os resultados obtidos agora para o LED verde, com Bit Rate 2000bps, não considerando nenhuma radiação de fundo e para uma tensão de -8V e +1V, estão mostrados na **Figura 35**. Mais uma vez a forma de onda do sinal transmitido é mostrada no topo da figura.

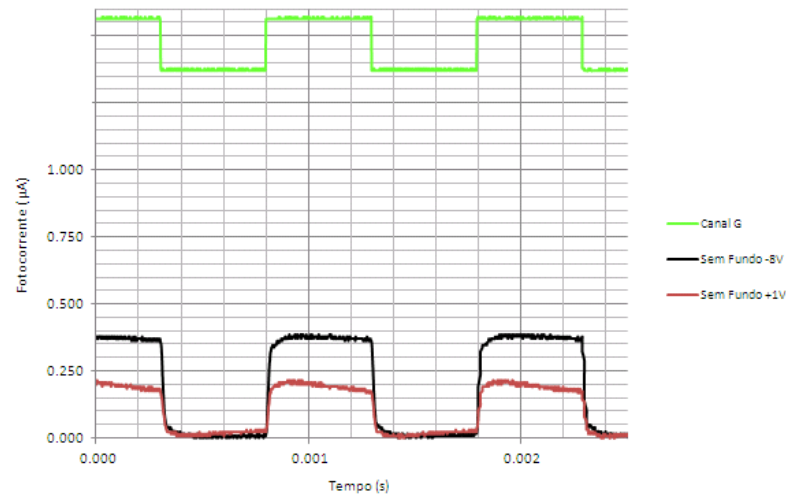


Figura 35 – Foto-corrente do canal verde com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Verifica-se que ao aplicar o LED verde com um Bit Rate a 2000bps para uma tensão a -8V e a +1V sem aplicação da polarização de fundo, verificámos que o sinal do canal verde é influenciado pelos valores da polarização, sendo os valores da foto-corrente para -8V o dobro dos valores medidos para +1V.

A **Figura 36** mostra o canal verde com Bit Rate 2000bps, com aplicação da polarização de fundo do LED vermelho, para uma tensão de -8V e +1V.

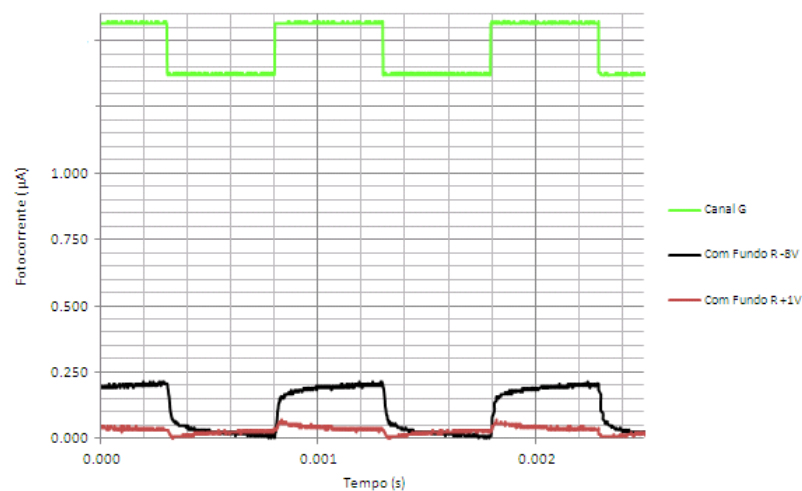


Figura 36 – Foto-corrente do canal verde com Bit Rate 2000bps, para uma tensão a -8V e

a +1V e com fundo vermelho

Nesta experiência podemos verificar a mesma situação que na figura anterior, em que o canal verde é influenciado pelos valores de polarização e ainda quando se aplica a polarização de fundo com o LED vermelho, constata-se que a amplitude, para quando aplicada uma tensão de -8V tem um comportamento contrário do canal vermelho, quando o Bit transita para “1” o canal verde comporta-se como um condensador a carregar e quando transita para o Bit “0” tem o comportamento contrário, de descarregar. O que quando aplicada uma tensão de +1V tem o comportamento inverso ao da aplicação da tensão a -8V.

A **Figura 37** mostra o canal verde, com Bit Rate 6000bps, sem aplicação da polarização de fundo, para uma tensão de -8V e +1V.

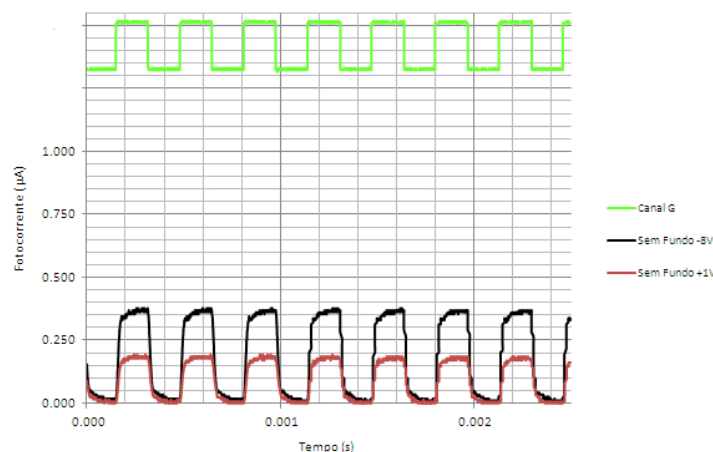


Figura 37 – Foto-corrente do canal verde com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e sem fundo.

Da figura anterior pode-se concluir, que ao aumentarmos o Bit Rate para 6000bps, constata-se que o valor da amplitude da foto-corrente sem aplicação da radiação de fundo, é igual á amplitude do valor da foto-corrente para quando se aplica um Bit Rate 2000bps, com uma pequena diferença, quando aplicado o Bit Rate a 2000bps o valor da amplitude a uma tensão +1V tem um comportamento decrescente, quando existe a transição para o Bit “1”, enquanto aplicado um Bit Rate a 6000bps, na transição para o Bit “1” o comportamento do valor da amplitude a uma tensão de +1V é crescente, assim verificamos mais uma vez que o LED verde é influenciado pela

polarização do LED vermelho.

A **Figura 38** mostra o canal verde, com Bit Rate 6000bps, com aplicação da polarização de fundo vermelho, para uma tensão de -8V e +1V.

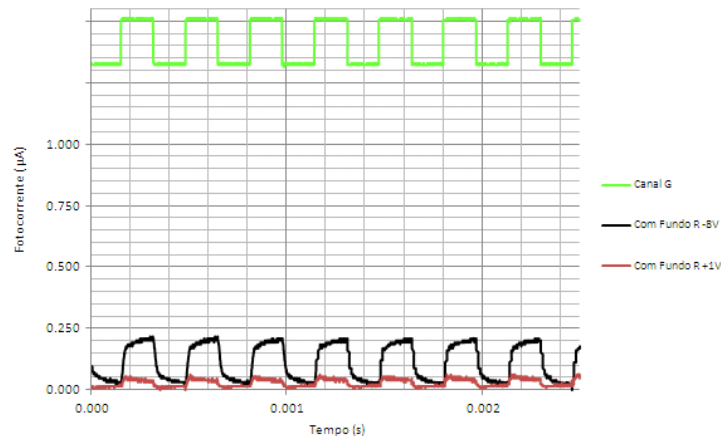


Figura 38 – Foto-corrente do canal verde com Bit Rate 6000bps, para uma tensão a -8V e a +1V e com fundo vermelho.

Da figura anterior pode-se concluir, para além de tudo o que já foi referido anteriormente, podemos verificar com maior rigor, que com a variação da polarização a -8V pode-se verificar que o valor da foto-corrente vai decaindo lentamente quando o bit passa a “0”, enquanto a +1V o valor da foto-corrente tem um decréscimo mais “brusco” chegando quase ao valor de zero.

Devido ao facto de se não se conseguir arranjar um LED amarelo em tempo útil e uma vez que o tempo que um semáforo permanece nessa cor, não foi efetuado nenhum estudo com a cor Amarelo.

4.6– Referências

- [1] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, A. Fantoni, C. Francisco, M. Barata, “Optical multiplexer for short range communications”, *Physica E* (2008), doi: 10.1016/j.physe.2008.08.029.
- [2] José Manuel Espadinha Caeiro, tese de dissertação de Mestrado em “Dispositivos semicondutores em sistemas de multiplexagem por divisão em comprimento de onda”, ISEL, Novembro de 2009.
- [3] Cátia Susana Gonçalves Francisco, tese de dissertação de Mestrado em “Demultiplexagem ótica controlada por tensão (DOV)”, ISEL, Novembro de 2008.
- [4] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, S. Amaral, J. Costa, M. Fernandes, “Optical Demultiplexer Device Operating in the Visible Spectrum” ” in print in *Sensors & Actuators: A. Physical* (2010).
- [5] M. Vieira, M. Fernandes, P. Louro, M. A. Vieira, M. Barata, A. Fantoni, “Multilayered a-SiC:H device for Wavelength-Division (de)Multiplexing applications in the visible spectrum”, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1066* (2008), Materials Research Society, 1066-A08-01.
- [6] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, J. Costa, M. Fernandes, M. Barata, “Demultiplexer/photodetector Integrated system based on a-SiC:H multilayered structures”, (2010) simp A_754796.
- [7] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, S. Amaral, J. Costa, M. Fernandes, “Optical Demultiplexer Device Operating in the Visible Spectrum”, *Procedia Engineering* 5 (2010) 657–660.
- [8] C. Francisco, P. Louro, M. Barata, “Demultiplexagem ótica controlada por tensão (DOV)”, *Jornadas de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores - JETC08*, 20 e 21 de Novembro de 2008.
- [9] P. Louro, M. A. Vieira, S. Amaral, M. Fernandes, J. Costa, M. Vieira “Integrated demultiplexer and photodetector for short range transmission in the visible range”, *Phys. Status Solidi C*, 1– 5 (2010) / DOI 10.1002/pssc.201000169.
- [10] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, J. Costa, A. Fantoni, “Use of a-SiC:H photodiodes in optical communications applications”, 2010.

[11] Susana Amaral, tese de dissertação de Mestrado em “Ótica Transparente : Wavelength Division Multiplexer” , ISEL, Dezembro de 2010.

Capítulo 5 – Conclusões

5.1 – Conclusões

Os sistemas VLC, aproveitando os benefícios do avanço dos LEDs, têm sido reconhecidos como uma tecnologia importante. Esta tecnologia pode oferecer comunicação ubíqua uma vez que a luz pode ser disponibilizada em todos os lugares. Nos sistemas de transporte inteligentes, o VLC tem uma nova aplicação e um papel importante na segurança humana e material.

Começando com a pesquisa realizada sobre os sistemas de VLC, parece ser uma tecnologia viável e tem uma boa oportunidade para se tornar uma tecnologia difundida no futuro das comunicações óticas sem fios. Isto também é suportado com novos fabricantes a investir cada vez mais no VLC. No entanto, existem ainda muitas coisas que têm de ser mais bem estudadas e analisadas.

Uma primeira importante contribuição pode ser descrita como a proposta arquitetura OSI baseada na camada VLC na ITS, e a sua integração com as atuais ITS. O uso de tecnologia VLC permitirá a remoção de diversos sistemas de comunicação e de curto alcance baseado em RF, minimizando assim o custo sem perda de funcionalidade. Uma vez que o desenvolvimento de arquiteturas ITS já se encontra em andamento, é altamente desejável considerar os papéis que podem ser desempenhados pela tecnologia VLC nessas estruturas.

Uma restrição importante para o sistema VLC é o facto de que os fabricantes ainda não perceberam o potencial deste tipo de aplicações. Eles podem fornecer, num futuro próximo, uma nova gama de aplicações para os seus produtos. Mas para que esse crescimento comercial aconteça, os fabricantes precisam fornecer mais informações sobre os seus produtos. Embora as características óticas estejam bem especificadas, na maioria dos *datasheets* o comportamento elétrico dos dispositivos não é fornecido. Isso acontece especialmente na ficha técnica do LED, fazer pesquisa de dispositivos para um transceptor VLC é uma tarefa difícil.

Outra conclusão importante vem a aplicação prática dos dispositivos projetados. Embora os resultados experimentais dos dispositivos projetados estão dentro do intervalo das simulações, foi deixado claro que o protótipo é importante. O comportamento dos componentes optoeletrónicos não pode ser totalmente traduzido para as simulações. Portanto, a melhor maneira de caracterizar

completamente os dispositivos implementados é a prototipagem, que se torna essencial para avaliar o comportamento real.

Outra contribuição importante que pode ser discutida é a caracterização do canal. O canal do VLC é altamente dependente das condições atmosféricas e do ambiente. Algumas das mais importantes situações e ambientes foram considerados e caracterizados. A validação experimental não poderia ser feita para todas estas situações devido à dependência das condições atmosféricas e também por causa da logística adequada nessas situações, ficando reduzido somente aos testes laboratoriais levados a cabo.

5.2– Trabalho futuro

Embora os sistemas VLC tenham muitos benefícios, também existem diversos desafios a superar. Os dois principais desafios são a implementação do VLC e desafios tecnológicos.

5.2.1 Implementação do VLC

Este é um dos maiores desafios nos sistemas VLC. Envolve administração municipal de uma cidade, órgãos reguladores, fabricantes de semáforos e de veículos e utilizadores. Porém, existem orientações gerais a serem seguidas na instalação de semáforos, no entanto elas têm tendência a negligenciadas. A fim de implantar sistemas VLC com um funcionamento eficaz, as diretrizes padrão deverão ser seguidas e irá ser necessário fazer alguns ajustes na instalação de semáforos de LEDs. Por exemplo, semáforos de 200 milímetros de diâmetro podem ser colocados a uma altura recomendada de cerca de 2,5 m a 3m na estrada enquanto semáforos com 300 milímetros de diâmetro precisam ser colocados a uma altura de cerca de 5m acima da estrada. Da mesma forma, para os fabricantes de semáforos, é suposto seguirem o *design* recomendado, no entanto isto é um grande problema até que o standard seja definido. Adicionalmente, os fabricantes de automóveis deverão começar a promover esta tecnologia através da integração de recetores VLC de baixo custo nos veículos.

Contudo, apesar das perspectivas acima indicadas parecem realmente desafiadoras, não são muito complexos, porque, os semáforos de LEDs já estão a substituir os já existentes. Também, o recetor VLC é rentável e não precisa de muitas modificações para instalar nos veículos. Portanto, os sistemas VLC podem ser implantados de forma eficiente para a qualidade das aplicações previstas.

5.2.2 Desafios tecnológicos

Esta é outra importante área a ser endereçada à comunidade científica e de pesquisa, para uma implantação efetiva e generalizada dos sistemas VLC nas ITS. Em particular, existem alguns problemas técnicos que precisam ser analisados:

- Limitação do longo alcance: Devido ao requisito do caminho LoS, a tecnologia é considerada adequada para a comunicação de curto e médio alcance. Comunicação de longo alcance é possível utilizando a técnica de múltiplos saltos em ambientes veiculares no entanto, minimizar o efeito do ambiente e de outras fontes de ruído para alcançar isto, ainda continua a ser um problema.
- *Design do uplink*: Usar fontes de iluminação natural é adequada para transmitir aplicações. Mas a concepção de um sistema VLC para transmissão e recepção bidirecional seria muito difícil. No entanto, este *design* irá oferecer muito valor acrescentado às aplicações e serviços, o mais importante, acesso à Internet, quando em movimento. Tais serviços integrados podem aumentar a implantação.
- Aumento da taxa de transferência: A fim de permitir o acesso à Internet ou serviços dedicados que exigem alta taxa de dados, diferentes técnicas de modulação devem ser adotadas. Técnicas de equalização mostram melhoria na taxa de transferência dos dados especialmente nas aplicações de interior. Poderia esta técnica ser válida no exterior, quando a implementação do sistema requer baixo custo e simplicidade? Além disso, a largura de banda limitada dos LEDs é outro grande desafio para a comunicação de alta velocidade. Portanto, o estudo deve abordar estas questões para um melhor desempenho e implementações avançadas.

De facto, o VLC é uma nova tecnologia emergente e tem grandes aplicações no exterior, bem como no interior. Esta área precisa ser explorada para tirar o máximo proveito da sua largura de banda e disponibilidade ubíqua. Deve-se tirar o máximo proveito do avanço da tecnologia LED. Dos desafios acima mencionados, muitos temas interessantes podem ser pesquisados.

De modo a melhorar o transceptor optoelectrónico, várias considerações sobre questões de implementação podem ser feitas, bem como diretrizes para o futuro desenvolvimento e melhoria.

Em relação ao recetor, é evidente que as fontes de luz externa terão uma influência muito forte. Isto poderia comprometer seriamente o desempenho global do transceptor. Como foi abordado

durante esta dissertação, a filtragem ótica é uma solução cara. No entanto, deve ser ensaiada. Se um simples filtro de corte de IR fosse usado, uma grande parte do espectro que contém sinais interferentes seria removido. Caso esta solução fosse aplicada, a escolha de um filtro correto é muito importante. Não só precisa de interromper o componente IR, mas também não pode ter uma influência considerável sobre a luz visível.

Igualmente, sabendo que é possível qualificar e quantificar grande parte dos parâmetros de um LED, seria interessante proceder a um estudo teórico e prático que pudesse levar à modelação de um modelo de propagação do meio ambiente, quando aplicado a um sistema VLC. Com os componentes e elementos existentes em laboratório, poderia ser realizado um estudo prático da diferença de foto-corrente no recetor, usando como emissores dois LEDs: um vermelho e outro verde. Um dos possíveis testes passaria pela variação da distância dos LEDs emissores ao recetor, fazendo a medição da foto-corrente que chegaria ao recetor. Com isto conseguir-se-ia analisar qual a intervenção da distância dos elementos sobre a performance global do sistema. Igualmente poderia ser feito um estudo efetuando a variação da diretividade do LED em relação ao recetor, podendo ser analisado qual a interferência deste elemento, em termos de performance. Entende-se por performance do sistema, a capacidade de transmissão dos dados entre o emissor e recetor e a consequência taxa de transferência dos dados, uma vez que com uma menor taxa de transmissão, a informação a ser transmitida demorará mais tempo a ser transmitida aos veículos, fazendo com que exista um limite mínimo de taxa de transferência para a qual a aplicabilidade do sistema VLC em sistemas ITS deixa de ser viável. Para colmatar esta possível limitação, o uso de mais do que um canal seria algo a considerar.

Outra linha de pensamento, que deve ser prosseguida no futuro, é como implementar um sistema recetor múltiplo. Em vez de usar uma única célula do recetor, soluções sobre como integrar vários foto-díodos, ou mesmo vários recetores integrados, devem ser estudados e desenvolvidos. Neste cenário, o conhecimento anterior obtido por vários grupos de trabalho que trabalharam em sistemas sem fio IR irá revelar-se extremamente útil, sendo que os seus desenvolvimentos e projetos deverão ser usados como diretrizes.