

# **Implementação de uma Ligação com Recurso à Luz – Li-Fi**

**David Alexandre Ribeiro Andrade**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Eletrotécnica e Computadores**

Orientador: Professor Paulo Sérgio de Brito André  
Professor João Pedro Castilho Pereira Santos Gomes

## **Júri:**

Presidente: Professor José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Professor Paulo Sérgio de Brito André

Vogal: Professor Rogério Pais Dionísio

**Novembro 2018**



# Declaração

Declaro que este documento é um trabalho totalmente original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do código e de boas práticas da Universidade de Lisboa.



# Agradecimentos

Tendo terminado o Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, gostaria de agradecer as pessoas que, direta ou indiretamente foram importantes durante todo o meu percurso e para o sucesso nesta fase importante da minha vida.

Ao Instituto Superior Técnico e ao Instituto de Telecomunicações, que forneceram as condições necessárias durante a realização da dissertação de forma a que eu pudesse completá-la com sucesso. Em particular, ao Instituto de Telecomunicações pelo financiamento e espaço disponibilizados para a realização desta dissertação.

Aos orientadores da dissertação, Prof. Paulo Sérgio de Brito André e ao Prof. João Pedro Gomes, pela oportunidade que me deram de desenvolver este trabalho e por toda a disponibilidade que demonstraram durante a sua realização.

Ao Prof. António Luís Campos da Silva Topa, pela avaliação durante a apresentação de IIEEC e as respetivas sugestões que permitiram melhorar e perceber a melhor forma de organizar e desenvolver esta dissertação.

Ao Paulo Barata, por ajudar no fornecimento e montagem de alguns dos materiais utilizados na realização dos testes.

Aos meus colegas e amigos que realizaram a tese no departamento de telecomunicações e que tiveram um papel importante, pelo seu apoio e contributo ao longo da realização da dissertação.

Aos meus amigos, em particular aos que tive a oportunidade de conhecer e partilhar experiências na Residência Duarte Pacheco, por todo o apoio prestado ao longo do curso e da realização desta dissertação.

À minha namorada Vera Gouveia, que esteve sempre presente, nos bons e maus momentos, por ter sido um apoio constante ao longo do meu percurso no Instituto Superior Técnico.

Por fim, à minha família, pelo apoio e motivação que me foi dado ao longo de todo este percurso.

A todos um muito obrigado.



# Resumo

A largura de banda por utilizador aumenta todos os anos, sendo que é necessário apresentar alternativas que possam satisfazer este crescimento. Uma possível solução consiste em explorar o crescimento da utilização dos díodos emissores de luz (*Light Emitting Diodes* – LED). As comunicações que utilizam luz (*Visible light communications* – VLC) são uma tecnologia emergente, que exhibe diversas vantagens em relação às alternativas que conhecemos atualmente. Esta solução pode ser combinada em simultâneo com a iluminação, apresentando-se desta forma como uma alternativa mais económica. Comutação rápida, maior tempo de utilização, maior largura de banda e a inexistência de interferência com outras fontes eletromagnéticas são outras das vantagens apresentadas pelo VLC. Existem diversas aplicações em meios interiores e exteriores, sendo neste último onde são apresentadas as principais dificuldades de implementação e onde existem as principais fontes de interferência na comunicação. O Li-Fi (*Light Fidelity*) é um sistema VLC capaz de transmitir dados a elevados ritmos de transmissão. Este sistema recorre à luz proveniente de LEDs, explorando as suas características particulares de funcionamento, apresentando-se como uma alternativa aos sistemas sem fios atualmente existentes. Este trabalho apresenta inicialmente uma análise ao estado da arte do VLC, evoluindo até ao Li-Fi, passando depois pela análise de uma solução que utiliza técnicas de modulação em intensidade, em particular a modulação *Color Shift Keying*, com o objetivo de efetuar uma transmissão Li-Fi. Os objetivos principais consistem na implementação de três variações do sistema Li-Fi e na posterior otimização da solução proposta.





# Abstract

The bandwidth per user increases every year and it is necessary to present alternatives that can satisfy this growth. One possible solution is to explore the increased use of LEDs (Light Emitting Diodes). Visible Light Communications (VLC) is an emerging technology that shows many advantages comparing to other alternatives that we currently know. This solution can be simultaneously combined with illumination being a more economical alternative. Quick switching, increased uptime, increased bandwidth and the lack of interference with other electromagnetic sources are other advantages of VLC. There are several applications in indoor environments but the main implementations difficulties and the interference in communications are higher in outdoor environments. Li-Fi (Light-Fidelity) is a VLC system capable of transmitting data at high data rates. This system uses the LED light, exploring its operating characteristics, showing up as an alternative to the existing wireless system. This work initially presents an analysis to the VLC state of the art, evolving to Li-Fi and then going on to analyze a solution that uses intensity modulation techniques, for example Color Shift Keying Modulation with the purpose of projecting a Li-Fi transmission. The main purpose of this work is to implement three variations of the Li-Fi system and the subsequent optimization of the proposed solution.

**Keywords:** Optical Communications, Visible Light Communications, Light Emitting Diodes, Colour-Shift Keying, Li-Fi.



# Índice

Declaração .....	iii
Agradecimentos .....	v
Resumo.....	vii
Abstract .....	ix
Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Tabelas .....	xvii
Lista de Acrónimos .....	xix
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto e Motivação.....	1
1.2. Estado da Arte .....	2
1.3. Objetivos Principais .....	9
<b>2. Fundamentação Teórica.....</b>	<b>9</b>
2.1. Estrutura de um sistema de VLC .....	9
2.1.1. Emissor .....	10
2.1.2. Recetor .....	17
2.2. Processamento do Feixe Ótico .....	19
<b>3. Desenho de um sistema de Li-Fi.....</b>	<b>22</b>
3.1. Descrição geral.....	22
3.2. Análise teórica .....	22
3.3. Caracterização do LED .....	26
3.4. Câmara do <i>smartphone</i> como recetor <i>Li-Fi</i> .....	28
3.5. Fotodíodo como recetor .....	30
3.6. Transmissão recorrendo à modulação <i>Color-Shift Keying</i> .....	32
3.6.1. Matriz RGB .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4. Resultados experimentais .....</b>	<b>38</b>
4.1. Resultados com <i>Smartphone</i> .....	38
4.2. Resultados com Fotodíodo.....	41
4.3. Resultado utilizando um LED RGB como emissor.....	45
<b>5. Conclusões e Trabalho Futuro .....</b>	<b>52</b>

5.1. Conclusões .....	52
5.2. Trabalho futuro .....	53
<b>6. Referências.....</b>	<b>55</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Global Mobile data traffic [2].	1
Figura 1.2 - Espectro de frequência do VLC [3].	2
Figura 1.3 - Sistema de VLC indoor [6].	3
Figura 1.4 - Esquema geral de uma ligação VLC bidirecional em linha de vista (LOS) [8].	4
Figura 1.5 - Variação do data rate em função da intensidade de luz (esquerda) e distância (direita) [8].	4
Figura 1.6 - Experiências efetuadas para a medição do BER [10].	5
Figura 1.7 - BER em função da distância [10].	5
Figura 1.8 - Sistema VLC de comunicação entre as luzes de sinalização e o veículo 2 (adaptado de [1]).	6
Figura 1.9 – Esquema utilizado no estudo entre as luzes de trafego e o veículo [11].	6
Figura 1.10 - Operações do UTROV [12].	7
Figura 1.11 - LiFi-XC [16].	8
Figura 1.12 - Luminárias LED Philips: a) LuxSpace PoE e b) PowerBalance gen2 [17] [18].	8
Figura 1.13 - MyLifi apresentado pela Oledcomm [20].	9
Figura 2.1 - Estrutura simplificada de um sistema de VLC (adaptado de [23]).	10
Figura 2.2 – Configuração de um Emissor de VLC (adaptado de [24]).	10
Figura 2.3 – Espectro de potência normalizado de um LED branco (linha preta) com LEDs azul, verde e vermelho [1].	11
Figura 2.4 - Diagrama de Radiação do LED Branco apresentado na Tabela 1 [27].	12
Figura 2.5 - Formas de onda ao longo do tempo de: a) OOK-NRZ e b) OOK-RZ [1].	13
Figura 2.6 - Formas de onda ao longo do tempo de todos os símbolos 4-PPM possíveis para dois bits de entrada [1].	13
Figura 2.7 – Comparação da eficiência espectral de diferentes tipos de modulação [1].	14
Figura 2.8 - Drivers digitais: a) único transistor b) CMOS c) combinação em paralelo de dois MOSFETs [1].	15
Figura 2.9 - Circuitos de combinação do sinal com a polarização: a) bias tee b) circuito combinado ativo [1].	16
Figura 2.10 - Configuração de um Recetor de VLC (adaptado de [24]).	18
Figura 2.11 - Topologias básicas de um amplificador: a) configuração open-loop e b) configuração feedback [37].	19
Figura 2.12 - Esquemas de polarização do fotodiodo: a) Filtro passa alto e b) polarização dinâmica [1].	19
Figura 2.13 – Lentes: a) colimada e b) convergente [39].	20
Figura 2.14 - Espectro de várias fontes de luz [40].	20
Figura 2.15 - Filtro proposto contra a luz solar que incide obliquamente [40].	21
Figura 3.1 - Esquema da solução proposta.	22
Figura 3.2 – Situação em que não é utilizada uma lente.	23

Figura 3.3 – Solução em que é utilizada uma lente colimada.....	24
Figura 3.4 - Solução em que não se recorre a uma lente, variando a posição do fotodíodo. ....	25
Figura 3.5 - Teste realizado para análise de funcionamento do LED XLamp MC-E [26] .....	26
Figura 3.6 - Curvas de descrição do funcionamento dos LEDs vermelho, azul, branco e verde. ....	26
Figura 3.7 - Curvas que caracterizam o funcionamento do LED RGB XLamp MC-E presentes no Datasheet [26]. ....	27
Figura 3.8 - Espectro obtido para o LED RGB XLamp MC-E analisado. ....	28
Figura 3.9 – Esquema do circuito utilizado para a situação em que se recorre à câmara frontal do smartphone como recetor. ....	29
Figura 3.10 - Processo de desmodulação utilizado, quando recorremos à câmara frontal do smartphone como recetor. ....	29
Figura 3.11 - Esquema do circuito utilizado para a situação em que se recorre ao fotodíodo como recetor. ....	31
Figura 3.12 - Processo de desmodulação utilizado quando recorremos a um fotodíodo como recetor. ....	31
Figura 3.13 - Esquema do circuito utilizado para a situação em que se recorre à câmara traseira do smartphone como recetor e a um LED RGB como emissor. ....	33
Figura 3.14 - Esquema do processo de desmodulação utilizado, quando recorremos a um LED RGB como emissor. ....	33
Figura 3.15 - Esquema do circuito utilizado para a situação em que se recorre à câmara traseira do smartphone como recetor, num meio escuro para determinar a Matriz RGB. ....	35
Figura 3.16 - Intensidade média recebida de cada uma das cores ao longo do tempo. a) Azul, b) Vermelho e c) Verde.....	36
Figura 4.1 - Sinal enviado para o emissor através do Adalm1000.....	38
Figura 4.2 - Amostras captadas através da câmara frontal do smartphone e aplicação “Luxímetro”. .	39
Figura 4.3 - Amostras normalizadas após análise e comparação de intensidades. ....	39
Figura 4.4 – Mensagem binária recebida após desmodulação. ....	40
Figura 4.5 - Evolução do BER em função do aumento do ritmo de transmissão, para uma distância de 21 cm.....	42
Figura 4.6 - Evolução do BER com o aumento da potência recebida no recetor. ....	43
Figura 4.7 - Evolução do BER com o aumento do ritmo de transmissão, para uma distância fixa de 7 cm.....	43
Figura 4.8 - Diagrama de olho correspondente à transmissão a 10 bit/s, a uma distância de 7 cm, com n = 400. ....	44
Figura 4.9 - Sinal recebido pelos três LEDs RGB em simultâneo quando recorremos a um ambiente escuro para eliminar a interferência da luz exterior. ....	46
Figura 4.10 - Sinais desmodulados na ausência de luz exterior, correspondentes aos sinais recebidos pelas cores: a) Vermelho, b) Azul e c) Verde. ....	47
Figura 4.11 - Sinal recebido pelos três LEDs RGB em simultâneo quando recorremos a um ambiente com interferência da luz ambiente. ....	48

Figura 4.12 - Sinais desmodulados na presença de luz exterior, correspondentes aos sinais recebidos pelas cores: a) Vermelho, b) Azul e c) Verde.....	49
Figura 4.13 - Sinais obtidos recorrendo à simulação através da Matriz S.....	50
Figura 4.14 - Sinal desmodulado resultante da simulação recorrendo a matriz S. ....	51





# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características do LED proposto [26]. .....	11
Tabela 3.1 – Valores calculados para a situação 1 .....	23
Tabela 3.2 – Valores calculados para a situação 2. ....	24
Tabela 3.3 – Variação da potência recebida quando variamos a posição do fotodíodo em relação ao eixo central. ....	25
Tabela 3.4 - Valores de tensão característicos de cada um dos LEDs utilizados. ....	27
Tabela 3.5 - Tensões aplicadas a cada um dos LEDs para obter os parâmetros da Matriz S .....	35
Tabela 3.6 - Valores de intensidade obtidos para as três cores: Azul, Vermelho e Verde. ....	36
Tabela 3.7 - Valores de intensidade normalizados, obtidos para as três cores: Azul, Vermelho e Verde. ....	37
Tabela 4.1 - Potência recebida correspondente a tensão aplicada nos para os bits '0' e '1' para um recetor com 1 cm <sup>2</sup> . ....	41
Tabela 4.2 - Potência recebida correspondente a tensão aplicada nos para os bits '0' e '1' para um recetor com 9 mm <sup>2</sup> . ....	41
Tabela 4.3 - Valores de tensão colocados à entrada. No caso dos LEDs vermelho e azul à entrada dos respetivos LEDs e no caso do verde à entrada do modulador. ....	45
Tabela 4.4 – Valores de tensão e frequências atribuídos ao bit '0' e bit '1' para as cores Azul, Vermelho e Verde. ....	50



# Lista de Acrónimos

**APD** - Avalanche Photodetector

**APD** - Avalanche Photodiode

**BER** - Bit Error Rate

**CMOS** - Complementary Metal-Oxide Semiconductor

**CSK** - Color Shift Keying

**FFT** - Fast Fourier Transform

**IFFT** - Inverse Fast Fourier Transform

**IR** - Infrared Radiation

**LD** - Laser Diodes

**LED** - Light Emitting Diodes

**Li-Fi** - Light Fidelity

**LOS** - Line of Sight

**MOSFET** - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

**NRZ** - Non-Return to Zero

**OFDM** - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

**OOK** - On/Off keying

**OWC** - Optical Wireless Communications

**PAM** - Pulse Amplitude Modulation

**PD** - Photodiode

**PIN** - P-type-Insulator-n-type

**PoE** - Power-over-Ethernet

**PPM** - Pulse Position Modulation

**QAM** - Quadrature Amplitude Modulation

**RF** - Radiofrequency

**RLI** - Relative luminous Intensity

**RZ** - Return to Zero

**Si** - Silicon

**TDD** - Time-Division Duplex

**TIA** - Transimpedance Amplifier

**UPVLC** - Ultra-parallel visible light communication

**UTROV** - Un Tethered Remotely Operated Vehicle

**VLC** - Visible Light Communications

**WDM** - Wavelength Division Multiplexing

**Wi-Fi** - Wireless Fidelity

# 1. Introdução

## 1.1. Contexto e Motivação

Nas últimas décadas o mundo assistiu a um grande crescimento no tráfego transportado pelas redes de telecomunicações. O aumento do número de dispositivos capazes de aceder as redes móveis e a crescente procura por serviços de internet que utilizam ritmos de transmissão elevados (Redes Sociais, Vídeo Chamadas, serviços baseados em *Cloud*, aplicações móveis, etc.) alertou para a necessidade de novas inovações, pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias que sejam capazes de fornecer ritmos de transmissão extremamente elevados aos utilizadores [1]. De acordo com dados apresentados pela CISCO, haverá um crescimento de cerca de sete vezes no tráfego de comunicações móveis em 2021 quando comparado com 2016, como é possível verificar na informação da Figura 1.1 [2].

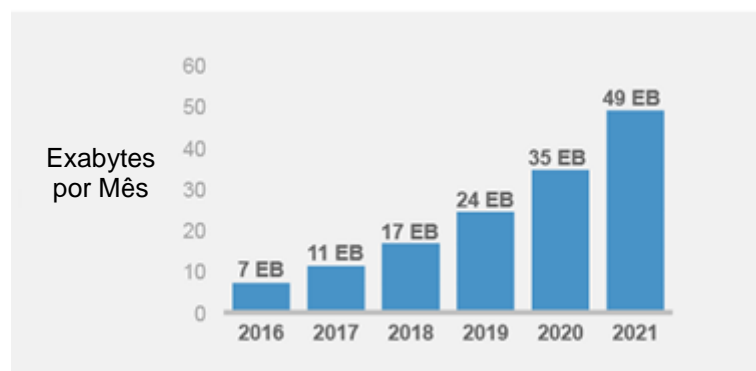


Figura 1.1 – Previsão de crescimento do tráfego de comunicações móveis (CISCO) [2].

Os sistemas de comunicação baseados em radiofrequência (RF) sofrem em particular dos efeitos da propagação multicaminho em ambientes urbanos densos, o que reduz a ligação disponível e a sua performance. A largura de banda destes sistemas em conjunto com o congestionamento do espectro implica que apenas alguns canais de alta definição possam ser utilizados numa determinada área. De modo a aumentar a capacidade dos sistemas, seria possível libertar um novo espectro e desta forma teríamos uma maior largura de banda, ou optarmos por melhorar a eficiência espectral. Contudo estas duas soluções implicam um custo muito elevado e um aumento da complexidade no desenho e na gestão do emissor e do recetor [1]. Dependendo da frequência utilizada, as comunicações por RF podem implicar ainda problemas de segurança (ondas penetraram facilmente as paredes), afetar a saúde dos seres humanos (caso sejam usadas com uma potência de transmissão acima de um determinado limite) e causar interferência em diversos sistemas, como é o caso da comunicação e navegação nas aeronaves [3].

Uma possível solução é a utilização da banda do visível, que ocupa o espectro compreendido entre 380 nm e os 750 nm. As comunicações nesta banda de frequências são conhecidas por *Visible Light*

*Communications* (VLC). Este tipo de comunicação oferece uma largura de banda extremamente elevada (na ordem dos THz), não sendo sujeita a interferência eletromagnética. Desta forma proporciona um elevado grau de confinamento espacial, fazendo com que a reutilização de frequências seja praticamente ilimitada. Assim diminui significativamente os custos de licenciamento e aumenta a segurança na transmissão de dados [1]. A luz em questão pode ser gerada através do uso de *light-emitting diodes* (LEDs) ou de díodos *laser* [4], permitindo desta forma utilizar esta tecnologia em simultâneo para iluminação e para comunicações de dados a velocidades muito elevadas. O Li-Fi é uma das variantes do VLC e permite a transmissão de informação recorrendo à modulação da luz, podendo apresentar-se como um complemento, ou até mesmo um substituto do Wi-Fi. O Li-Fi assume-se como uma tecnologia sustentável e ecológica, com potencial para revolucionar a forma como usaremos a luz num futuro próximo.

## 1.2. Estado da Arte

O VLC foi proposto pela primeira vez na sociedade tecnológica por Alexander Graham Bell com o fotofone em 1880. Este dispositivo era capaz de modular a luz do sol com vibrações introduzidas pela voz e transmitia a luz modulada para um dado recetor. Os verdadeiros avanços nesta tecnologia surgiram em 1927, com a descoberta da eletroluminescência e do LED. Apesar destas descobertas, as comunicações por RF, conseguiram impor-se ao longo das últimas décadas. As comunicações óticas *wireless* (OWC) foram propostas inicialmente por Gfeller e Bapst em 1979, que resultaram num aumento global dos estudos e pesquisas relacionados com o tema [1]. As pesquisas atuais em OWC focam-se no alcance de diferentes comprimentos de onda, desde o UV, passando pelo visível até as regiões próximas do infravermelho (IR). Com o aumento da utilização dos LEDs para iluminação diária, o VLC tem se mostrado cada vez atrativo, capaz de ser combinado com os sistemas RF utilizados atualmente. Esta tecnologia utiliza o espectro visível para comunicação (380 nm - 750 nm), que corresponde a um espectro de frequência dos 430 THz até 790 THz, como é possível visualizar na Figura 1.2.

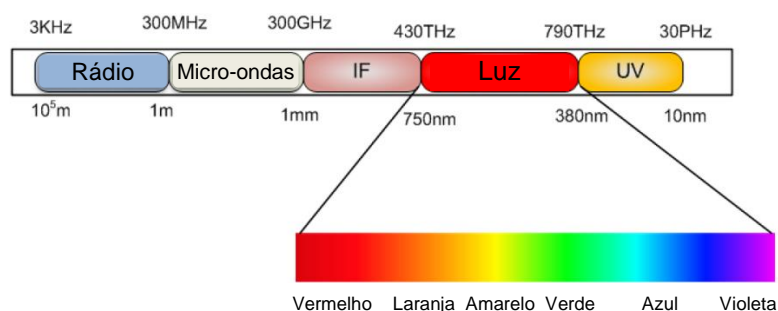


Figura 1.2 - Espectro de frequência do VLC [3].

Atualmente a maioria dos trabalhos de investigação têm como base as aplicações *indoor*, enquanto que alguns estudos se focam em aplicações *outdoor* a longas distâncias [5]. No que toca a aplicações

*indoor*, em [6] os autores propuseram um sistema de transmissão, como é mostrado na Figura 1.3, que utiliza luzes LED brancas. As luzes LED são utilizadas com uma dupla função de iluminação e comunicação. Desde então tem havido um progresso muito considerável no que toca a *indoor* VLC.

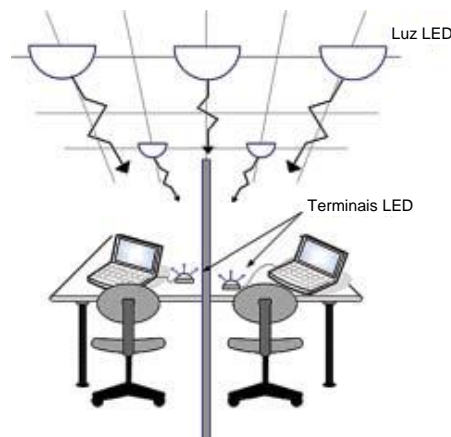


Figura 1.3 - Sistema de VLC indoor [6].

Em 2013, Rajan Sagotra e Reena Aggarwal em [7], testaram a possibilidade de enviar uma imagem e uma música utilizando lâmpadas LED de pequenas dimensões e baixo custo. Este sistema utilizava diferentes comprimentos de onda, através de LEDs de cores distintas (Vermelho, Amarelo e Verde). Recorrendo a uma modulação WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), foi possível transmitir a informação pretendida entre dois computadores de forma segura e com um custo muito reduzido. Devido a baixa potência dos LEDs utilizados, a distância máxima de transmissão foi de apenas 50 cm.

Em [8] foi testado um sistema VLC indoor bidirecional (Figura 1.4), de elevada capacidade em tempo real. Este sistema operava em modo *half-duplex* baseado em *time-division duplex* (TDD). A transmissão de dados teve como base uma modulação e desmodulação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*). Os principais componentes do recetor consistiam num dispositivo de controlo de corrente e num LED de luz de alta potência. No recetor foi utilizado um amplificador de transimpedância (*transimpedance amplifier* - TIA) e um fotodíodo PIN. Com os primeiros resultados, a cerca de 2 metros do emissor foi possível disponibilizar um ritmo de transmissão de 200 Mb/s a cada utilizador. Recorrendo ao mesmo circuito combinado com um feixe ótico mais estreito, o desempenho do sistema melhorou, obtendo um débito binário de 100 Mb/s por utilizador, a uma distância de cerca de 20 metros. Reduzindo a distância ou recorrendo a um feixe mais direcionado, a experiência mostrou ser possível atingir um ritmo de transmissão máximo de 500 Mb/s. À medida que a distância ao recetor aumenta o ritmo de transmissão diminui como indica a Figura 1.5 (esquerda). Desta forma os autores concluíram que o parâmetro mais importante é a intensidade de luz no recetor, levando a uma variação quase proporcional do ritmo de transmissão como mostra a Figura 1.5 (direita).

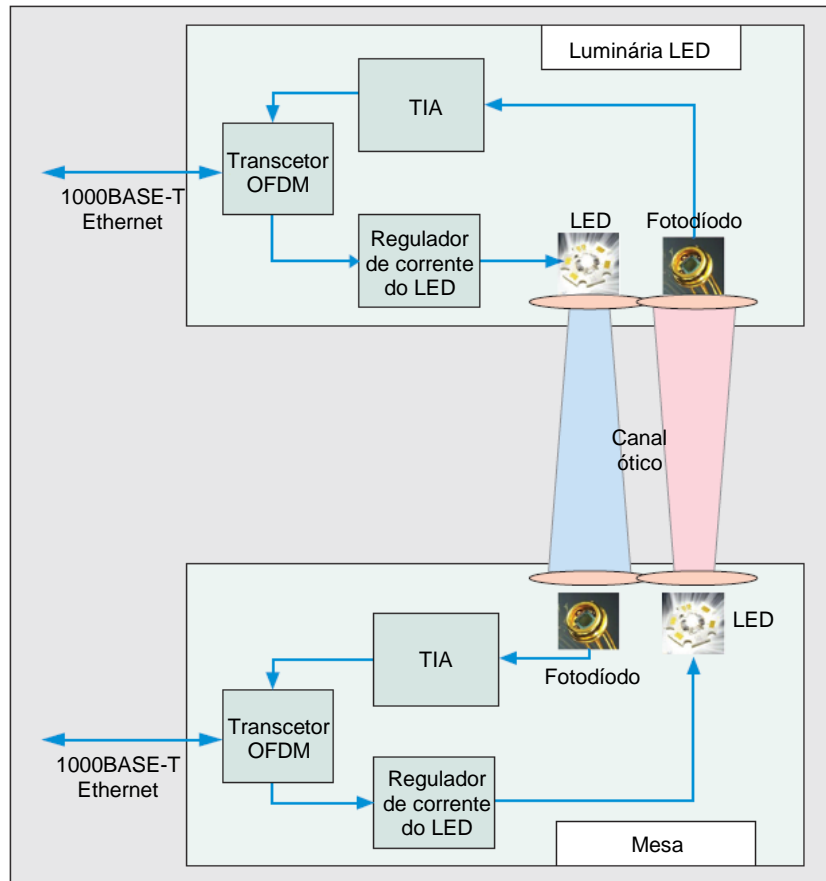


Figura 1.4 - Esquema geral de uma ligação VLC bidirecional em linha de vista (LOS) [8].

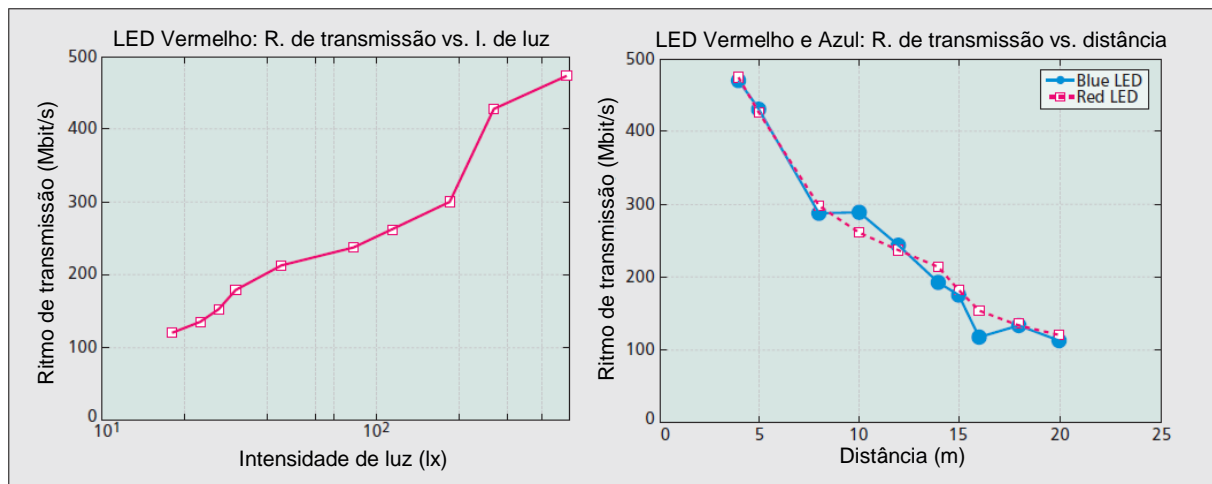


Figura 1.5 - Variação do data rate em função da intensidade de luz (esquerda) e distância (direita) [8].

No que toca a aplicações *outdoor*, em 2008 o Japão realizou uma ligação com recurso a VLC, na praia de *Kujukuri*. O sinal foi transmitido por um LED num farol e recebido por um sensor de imagem. A distância máxima de comunicação foi de 2 km a um *data rate* de 1022 bps [5], [9]. De modo a testar a possibilidade de transmissão a distâncias superiores, em 2016 Zhang Minglun desenhou um protótipo de um sistema de VLC para longas distâncias. O sistema baseava-se em 30 LEDs azuis utilizados no



transmissor e num pré-amplificador. Depois mediram o Bit Error Rate (BER) associado, utilizando quatro emissores que enviavam o sinal para o mesmo recetor a diferentes distâncias, como mostra a Figura 1.6. A relação entre o BER e a distância, e o diagrama de olho a 10.7 km são apresentados na Figura 1.7.

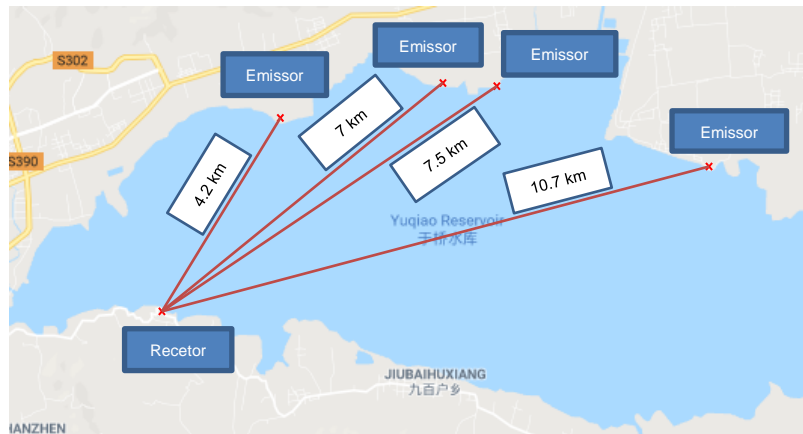


Figura 1.6 - Experiências efetuadas para a medição do BER [10].

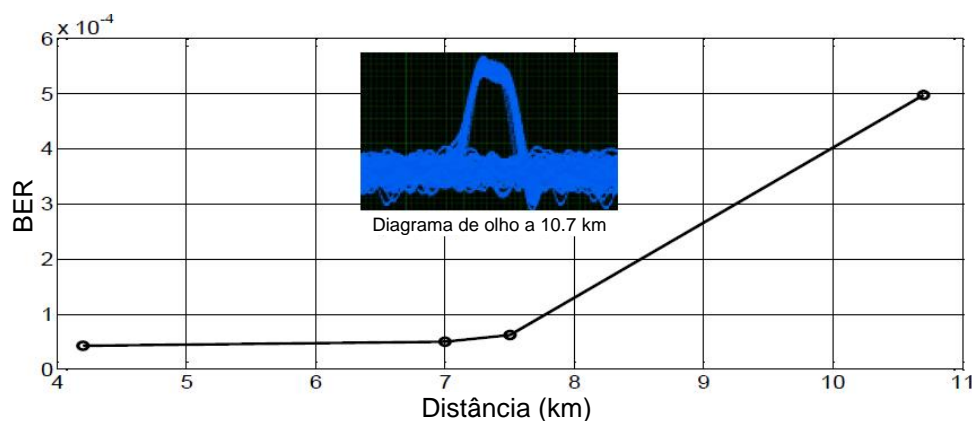


Figura 1.7 - BER em função da distância [10].

A experiência conseguiu mostrar que é viável fornecer um canal de comunicação a uma distância de 10.7 km, com um BER abaixo do valor considerado aceitável para uma transmissão ( $10^{-3}$ ), embora com um ritmo de transmissão reduzido (28.8 kbps) [10].

O VLC pode também ser usado para comunicações nos veículos devido a presença das luzes LED nos automóveis e nas estruturas de sinalização. Em [11] é analisado um sistema VLC *outdoor* que utiliza as luzes LED da sinalização das estradas para comunicação (Figura 1.8). Neste caso foi considerada a interferência resultante da luz solar e da luz artificial proveniente de outras fontes de iluminação presentes no meio de transmissão. O sistema (Figura 1.9) consistia na utilização da luz proveniente da sinalização já existente nas estradas como emissor e um fotodíodo como recetor. No emissor foi gerado um sinal sinusoidal de 500 kHz, com uma amplitude de 1.5 V que combinado com um DC *bias* dirigiam o LED a funcionar na zona quase linear. O sinal de saída sofre uma atenuação no canal de transmissão em linha de vista (*Line of sight* – LOS) é depois recebido no recetor, onde se recorre a um filtro passa banda de modo a reduzir a interferência da luz solar. O sinal ótico é recebido no fotodíodo de modo a

ser convertido em sinal elétrico. O resultado foi depois amplificado e apresentado num analisador de espectros, sendo que as distâncias analisadas variam entre os 5 e os 80 m. Recorrendo a diferentes *M-Pulse-position modulation* (PPM) os autores concluíram que com 2-PPM a interferência proveniente de luzes artificiais era mais reduzida. Foi possível, utilizando 2-PPM a um ritmo de transmissão de 100 kbps, com um BER de  $10^{-3}$  alcançar uma comunicação a uma distância de 80 m.

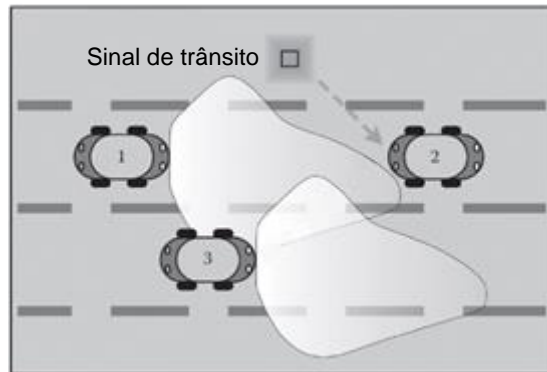


Figura 1.8 - Sistema VLC de comunicação entre as luzes de sinalização e o veículo 2 (adaptado de [1]).

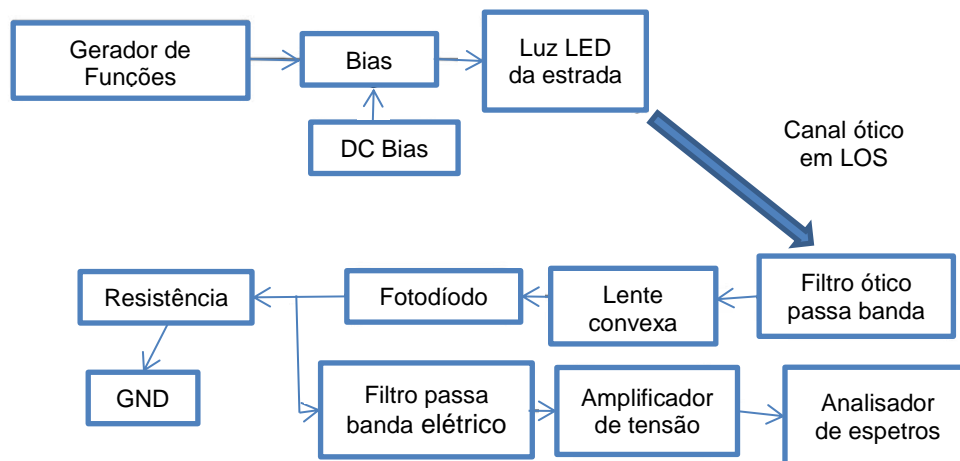


Figura 1.9 – Esquema utilizado no estudo entre as luzes de tráfego e o veículo [11].

Relativamente às comunicações dentro de água, as VLC apresentam-se como uma melhor solução, uma vez que as ondas de radio frequência não se propagam bem na água devido a sua boa condutividade. São também mais eficientes energeticamente quando comparados com as comunicações tradicionais, que utilizam a técnica de comunicação acústica e têm um menor impacto na vida marinha. Em [12] foi testado um sistema (*Un Tethered Remotely Operated Vehicle - UTROV*) para ambientes subaquáticos que utiliza comunicações ótica e acústica. Este sistema realiza funções de observação dos oceanos, sendo o seu funcionamento ilustrado na *Figura 1.10*. À esquerda é apresentada a comunicação do UTROV utilizando comunicações subaquáticas de baixa largura de banda. No centro e à direita a comunicação é alcançada utilizando um canal de comunicações ótico, através de um pequeno relé conectado ao barco ou uma estrutura fixa no fundo do mar. Através dos estudos realizados, os autores conseguiram demonstrar ser possível efetuar uma comunicação

omnidirecional, de baixa potência com um alcance próximo dos 100 m e com um ritmo de transmissão de 10 Mbps, utilizando emissores e receptores de baixo custo.

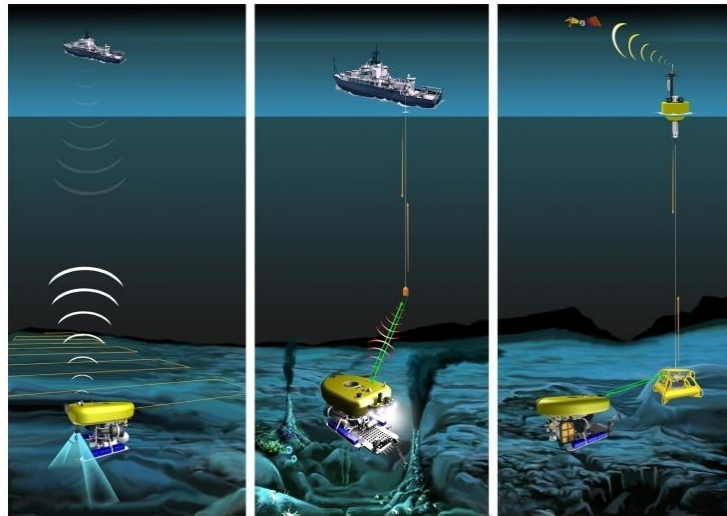


Figura 1.10 - Operações do UTROV [12].

Recentemente a *Ambalux* [13] introduziu um sistema de comunicação ótica, para funcionar debaixo de água com um ritmo de transmissão máximo de 10 Mbps e um alcance de 40 m. Também a *Sonardyne* [14] começou a comercializar o *BlueComm 200*, um sistema com a mesma funcionalidade do anterior, mas que consegue operar até uma distância de 150 m com um ritmo de transmissão de 12.5 Mbps.

Uma alternativa ao Wi-Fi é apresentada em [15], sendo designada por Li-Fi. Esta tecnologia é desenhada com o objetivo de comunicação sem fios e iluminação, sendo desta forma necessário utilizar um esquema de modulação adequado. Os autores referem que em Li-Fi é possível recorrer a *Colour Shift Keying (CSK)*, uma modulação em intensidade que apresenta a vantagem de garantir um fluxo de iluminação constante. No emissor é utilizado um chip desenvolvido no projeto UPVLC (*Ultra-parallel visible light communication*) e o recetor é baseado num APD (*avalanche photodetector*). Combinando a luz LED com redes de dados sem fios é possível obter uma redução considerável no tamanho das células e conseqüentemente um aumento do ritmo de transmissão, do número de utilizadores servidos e do tráfego total. Assim é possível atingir, com equipamentos de pequenas dimensões, ritmos de transmissão na ordem de 1 Gb/s. Neste estudo, é ainda feita uma comparação entre o Wi-Fi e o Li-Fi, concluindo que o desempenho é superior quando ambas as técnicas são utilizadas em simultâneo, de forma balanceada.

Em 2017 a *pureLiFi* [16] lançou o *LiFi-XC* (Figura 1.11), um dispositivo que permite efetuar comunicações sem fios, a ritmos de transmissão muito elevados, de forma segura através de luz proveniente de LEDs. O LiFi-XC é um sistema *plug and play* certificado que funciona com dispositivos USB e devido à sua dimensão reduzida possibilita que seja integrado em computadores, tablets ou dispositivos inteligentes. Permite transmissões até 43 Mbps a partir de cada LED que suporte Li-Fi, possibilitando uma comunicação bidirecional em modo *Full Duplex*. Este sistema permite ainda que um utilizador circule entre diferentes LEDs, mantendo a conexão e evitando assim interrupções na ligação.

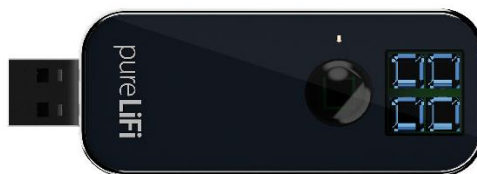


Figura 1.11 - LiFi-XC [16].

A iluminação LED tem sofrido uma grande evolução no que toca ao Li-Fi. A *Philips* lançou em 2018 dois modelos de luminárias LED preparados para iluminar e transmitir informação em simultâneo, a *LuxSpace PoE* [17] ( Figura 1.12 a)) e a *PowerBalance gen2* [18] (Figura 1.12 b)). Ambas possuem uma tecnologia *Power-over-Ethernet (PoE)* que permite receber alimentação e dados através de um único cabo *Ethernet standard*, possibilitando desta forma sem afetar a iluminação, um ritmo de transmissão até 30 Mb/s numa ligação que pode ser unidirecional ou bidirecional. Consoante o modelo escolhido, para uma potência de entrada que varia entre os 9.2 W e 16.2 W é possível obter um fluxo luminoso de 1200 lm e 2200 lm respetivamente, podendo diminuir o consumo elétrico em cerca de 80% [19].



Figura 1.12 - Luminárias LED Philips: a) *LuxSpace PoE* e b) *PowerBalance gen2* [17] [18].

O *MyLifi* (Figura 1.13 - *MyLifi* apresentado pela *Oledcomm* [20].Figura 1.13) foi apresentado em 2018 e é outro exemplo de iluminação LED preparada para a utilização do Li-Fi [20]. Produzido pela *Oledcomm*, é capaz de atingir ritmos de transmissão até 23 Mbps em download e 10 Mbps de upload, podendo ser utilizado em simultâneo como um candeeiro convencional. Este dispositivo assume-se também como sendo mais eficiente, uma vez que o *MyLifi* de 800 lumens utiliza uma potência de 13.5W, inferior aos 20 W consumidos por um router Wi-Fi convencional [21]. Tal como nos exemplos apresentados na Figura 1.12, para a utilização deste sistema é necessário que o recetor consiga captar a luz que é emitida, sendo que a *Oledcomm* apresenta também um dispositivo USB que permite que qualquer dispositivo com esta interface consiga utilizar o Li-Fi. Mesmo quando a Luz aparenta estar desligada, o dispositivo encontra-se em funcionamento e possui ainda sensores de luminosidade e uma aplicação (web ou mobile) que permite o controlo total da iluminação [20].



Figura 1.13 - MyLifi apresentado pela *Oledcomm* [20].

Um outro aspeto importante consiste em evitar que a luz emitida divirja. Assim principalmente em grandes distâncias, é importante concentrar o fluxo de luz, de forma a que seja possível direcioná-lo e evitar perdas desnecessárias. Para isto é usual recorrer-se à utilização de lentes, no emissor e no recetor. Em [22] é proposto um sistema com um LED de 1 W para o emissor em que são utilizadas lentes colimadas, capazes de proporcionar um ângulo de emissão de  $1.7^\circ$ . Neste sistema é tida em conta a atenuação atmosférica e recorrendo a OOK, foi possível alcançar uma comunicação a 90 m, com um ritmo de transmissão de 210 Mbit/s com um BER de  $10^{-3}$ .

### 1.3. Objetivos Principais

Os objetivos principais deste trabalho podem ser sumarizados nos seguintes tópicos:

- ✓ Desenvolvimento e implementação de um sistema Li-Fi que permita efetuar a comunicação em espaço livre, utilizando esquemas de modulação adequados.
- ✓ Análise e otimização do sistema implementado com recurso a um *smartphone*.

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1. Estrutura de um sistema de VLC

A estrutura típica (simplificada) de um sistema de VLC (*Figura 2.1*) consiste num emissor, que tem a função de emitir o sinal pretendido, um canal de propagação e num recetor que recebe e descodifica o sinal. Do lado do emissor, a luz é gerada recorrendo a conversores e LEDs ou Diodos Laser (*Laser Diodes - LD*). A luz emitida é enviada através de um canal ótico até ser detetada pelo recetor. Este é composto tipicamente por um circuito de amplificação, um filtro ótico e um *photodetector* (*PIN / APD Detector*).

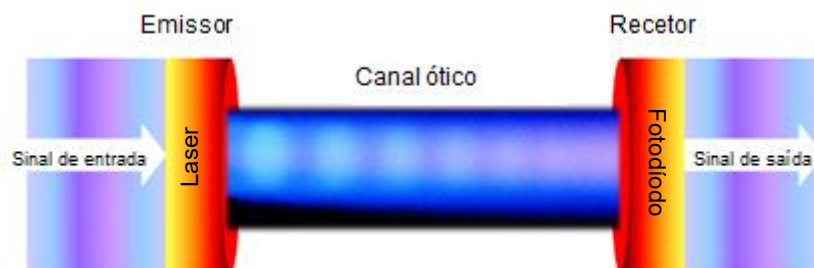


Figura 2.1 - Estrutura simplificada de um sistema de VLC (adaptado de [23]).

### 2.1.1. Emissor

O emissor num sistema VLC possui características distintas dos convencionais que utilizamos atualmente, uma vez que pode ser utilizado para comunicação e para iluminação. O principal componente do emissor é o LED, que tem a dupla função de iluminação e transmissão de dados. O Laser pode também funcionar como emissor, sendo apenas útil para a comunicação. A Figura 2.2 mostra um diagrama de blocos com os diferentes componentes que compõem um emissor típico de um sistema de VLC.

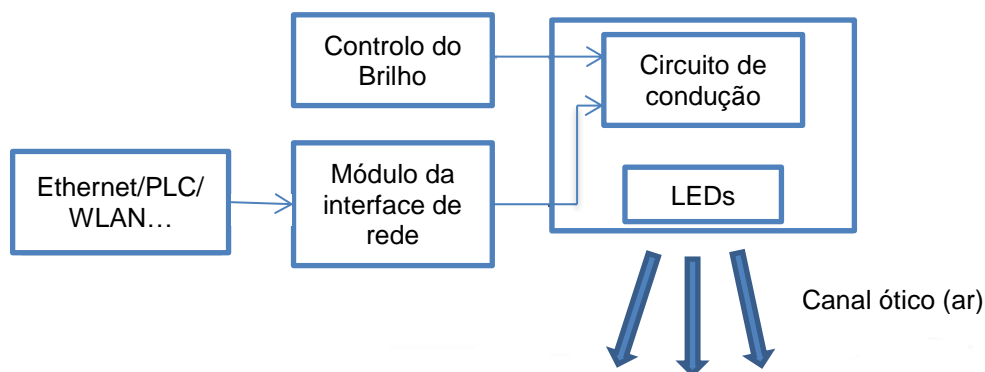


Figura 2.2 – Configuração de um Emissor de VLC (adaptado de [24])

As iluminações baseadas em LED tornaram-se cada vez mais presentes na iluminação e a tendência é que substituam as lâmpadas utilizadas atualmente. Quando atuam como dispositivo de iluminação os LEDs devem satisfazer os requisitos de iluminância, que para a iluminação *indoor* variam entre os 200 – 1000 lx, de acordo com as recomendações ISO [24]. Os LEDs de elevado brilho utilizam correntes superiores a 100 mA, valor elevado quando comparado com os dispositivos de comunicação utilizados atualmente.

Além da sua capacidade de iluminação, a sua luz pode ser modulada a um ritmo de transmissão elevado. Desta forma é possível obter ritmos de transmissão significativamente elevados a distâncias moderadas. Existem dois tipos principais de LEDs de luz branca, que são utilizados normalmente para

iluminação: fosforescente e multicolor (RGB). O tipo fosforescente consiste num *chip* LED azul em conjunto com uma camada de fósforo amarelo. Por outro lado, os LEDs multicolor consistem em três *chips* individuais, vermelho, verde e azul. Embora o tipo fosforescente permita, principalmente devido ao *design* mais simples uma instalação mais eficiente em termos de custo, apenas permite uma largura de banda de modulação reduzida, devido ao tempo de resposta lento do material utilizado. Por outro lado, os LEDs RGB permitem a utilização de três canais de cor diferentes, cada um com uma largura de banda aproximada de 15 MHz, permitindo elevados ritmos de transmissão. Os LEDs vermelhos emitem tipicamente no comprimento de onda próximos de 625 nm, os LEDs verdes nos 525 nm e os LEDs azuis nos 470 nm. O espectro de potência normalizado é apresentado na *Figura 2.3*, sendo observável que o espectro de emissão dos LEDs brancos cobre toda a gama da luz visível. Desta forma é possível utilizar uma modulação WDM, mas embora se obtenha um ritmo de transmissão mais elevado os custos aumentam consideravelmente [8].

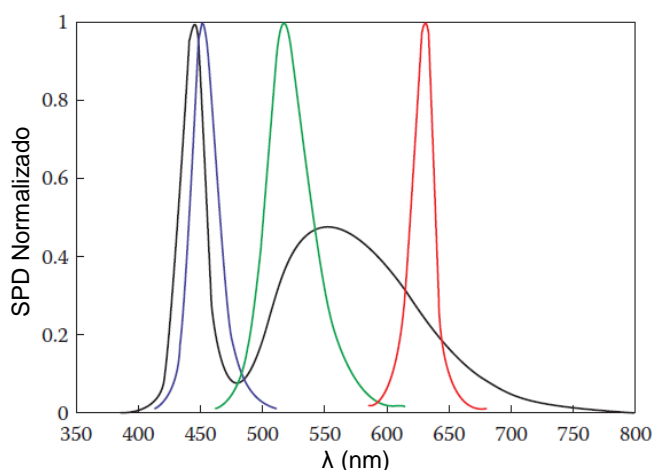


Figura 2.3 – Espectro de potência normalizado de um LED branco (linha preta) com LEDs azul, verde e vermelho [1].

Existem diversos tipos de LEDs e com variadas potências. Recorrendo à CREE [25], é possível seleccionar alguns modelos com as características pretendidas, de entre os modelos disponíveis, englobando os LEDs de cores verde, vermelho, azul e branco. Desta forma foi seleccionado um LED RGB, que possibilita a utilização destas mesmas cores num único LED. As respetivas características apresentam-se na Tabela 2.1.

Modelo	Cor	CCT / Comprimento de Onda		Fluxo Luminoso Mínimo @ 350 mA
		Mínimo	Máximo	
Cree XLamp MC-E Color	Vermelho	620 nm	630 nm	30.6 lm
	Verde	520 nm	535 nm	67.2 lm
	Azul	450 nm	465 nm	8.2 lm
	Branco	3700 K	4300 K	80 lm

Tabela 2.1 - Características do LED proposto [26].

Tendo em conta que o diagrama de radiação espacial do LED apresentado na Tabela não é constante, é necessário ter em conta esse fator quando se pretende analisar os valores de potência recebida. Desta forma, para o modelo utilizado o diagrama de radiação típico apresenta a forma da Figura 2.4.

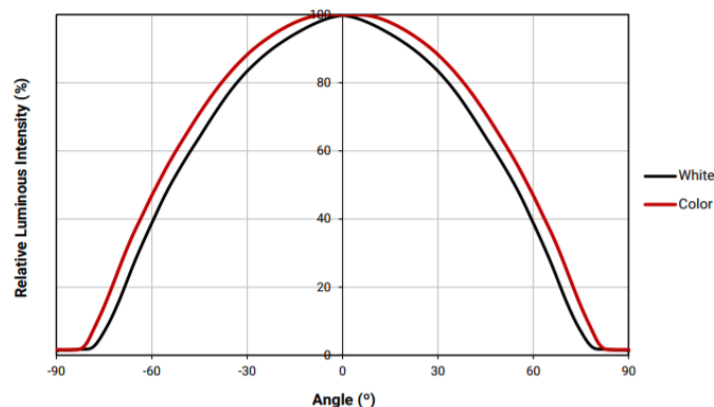


Figura 2.4 - Diagrama de Radiação do LED Branco apresentado na Tabela [27].

Na Figura 2.4, é possível verificar que à medida que nos distanciamos do eixo central, a intensidade diminui de forma significativa, reduzindo para mais de metade do valor quando consideramos um ângulo superior a  $60^\circ$ . Assim, quando pretendemos calcular a intensidade recebida num determinado ponto, temos de considerar o ângulo em relação ao centro do LED, multiplicando o valor obtido da intensidade recebida pela intensidade relativa luminosa correspondente.

Para ritmos de transmissão mais elevados ( $>10$  Gb/s) ou distâncias mais longas, os díodos laser apresentam-se como uma melhor escolha, sendo tipicamente utilizados no exterior, em comunicações óticas em espaço livre.

O VLC baseia-se em modulação de intensidade e deteção direta (IM/DD) para transmissão de dados. Nos sistemas IM/DD a intensidade ótica deve ser um valor real e não negativo [1]. Desta forma as modulações nos sistemas VLC devem satisfazer esta condição. Neste tipo de sistemas a potência ótica varia consoante a informação que pretendemos transmitir. É possível a utilização de diferentes comprimentos de onda, desde que sejam processados de forma individual no recetor, recorrendo a um filtro ótico passa banda e a um fotodíodo [28]. O *pulse amplitude modulation* (PAM) e o *pulse position modulation* (PPM) apresentam-se como bons esquemas de modulação para o VLC, uma vez que quando utilizados juntamente com um equalizador de *feedback* de decisão podem superar esquemas de modulação mais complexos, como o OFDM. Quando o objetivo é maximizar a capacidade do sistema recorremos a OFDM [1].

O *On/Off keying* (OOK) é uma técnica de modulação muito popular devido a sua simplicidade de aplicação. Também conhecido como PAM binário, é a forma mais simples de IM/DD [1]. Consoante a informação que é transmitida, é gerado um pulso que na maioria dos casos tem a forma de um retângulo, simplificando de forma significativa o *design* do emissor e do recetor [29].

O OOK pode ser apresentado em dois formatos: NRZ (*Non Return to Zero*) ou RZ (*Return to Zero*) (Figura 2.5). No formato NRZ a largura do pulso tem a mesma duração do intervalo do bit, enquanto que no formato RZ, o sinal transmitido retorna a zero, mesmo que sejam transmitidos vários bits com



valor "1". O pulso óptico pode ter diferentes ciclos de trabalho ( $\gamma$ ), sendo definido pelo rácio entre a duração do pulso e a duração do bit. No caso da Figura 2.5 apresenta um  $\gamma$  de 0.5.

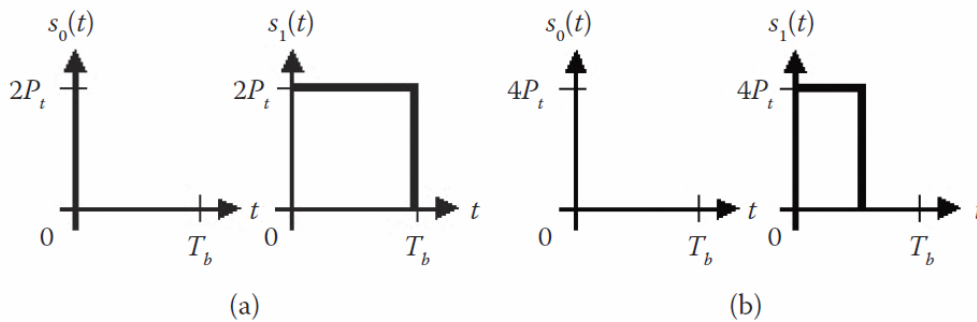


Figura 2.5 - Formas de onda ao longo do tempo de: a) OOK-NRZ e b) OOK-RZ [1].

Na Figura 2.5  $P_t$  corresponde à potência média transmitida e  $T_b = 1/R_b$  ( $R_b$  - ritmo de transmissão) corresponde à duração do pulso [28].

No formato RZ a transição do nível 1 para o nível 0 é sempre realizada com todos os bits "1", sendo favorável do ponto de vista da recuperação do *clock*. Este formato é também mais resistente à interferência intersimbólica introduzida pelo multicaminho, uma vez que a duração do pulso é menor [29].

O *pulse position modulation* é um método de modulação em que a informação é modulada na posição dos pulsos. Um símbolo L-PPM consiste em L *slots* de tempo de igual duração [1]. Na Figura 2.6 é apresentado um exemplo para 4-PPM, em que são mostradas todas as formas de onda possíveis para dois bits de entrada. É possível verificar que todos os L símbolos são ortogonais, uma vez que as L posições dos pulsos não se cruzam. À medida que o L aumenta, a eficiência média de potência é melhorada, enquanto que a eficiência de largura de banda é reduzida. Devido a sua fraca eficiência de largura de banda, o PPM é mais suscetível a propagação multicaminho introduzida pela interferência intersimbólica. Geralmente o L-PPM é menos eficiente no que toca a largura de banda do que o NRZ-OOK, o que limita a sua utilização em sistemas VLC de alta velocidade [1] [22].

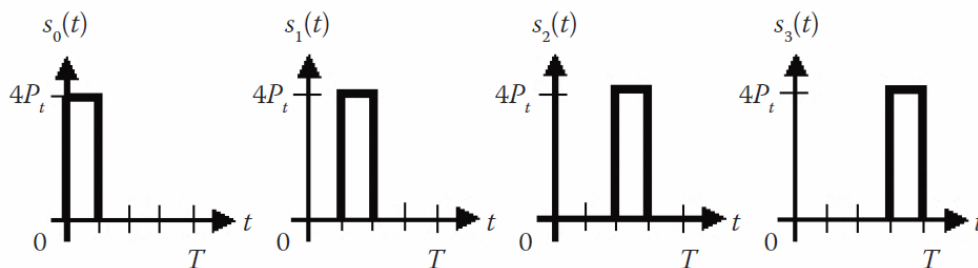


Figura 2.6 - Formas de onda ao longo do tempo de todos os símbolos 4-PPM possíveis para dois bits de entrada [1].

O uso de L-PPM faz com que a potência necessária na transmissão, para atingir um determinado BER seja reduzida quando comparada com OOK, mas por outro lado aumenta a largura de banda necessária no recetor, por um fator de  $L/\log_2(L)$  para um dado bit rate [28].

A largura de banda limitada e a propagação multicaminho são duas limitações associadas ao VLC, desta forma os esquemas de modulação multiportadora podem ser mais eficientes quando comparados com os esquemas de modulação em banda base (Figura 2.7). De modo a aumentar o ritmo de transmissão nos sistemas VLC, a escolha mais comum consiste em utilizar OFDM, uma vez que aumenta a eficiência espectral e é uma solução mais eficiente contra a interferência intersimbólica, proveniente da propagação multicaminho ou da largura de banda limitada do sistema [1]. Em OFDM as frequências da subportadora são escolhidas de forma a que os sinais sejam ortogonais ao longo do período de um símbolo OFDM, fazendo com que não ocorra interferência entre os canais vizinhos.

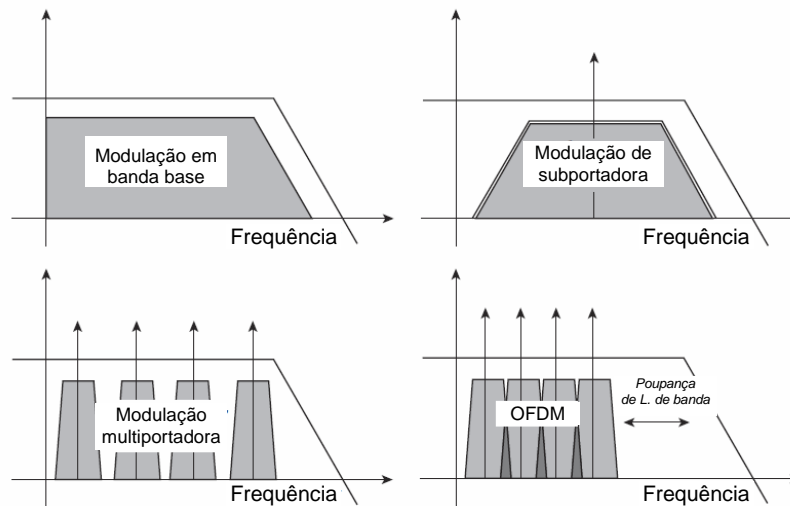


Figura 2.7 – Comparação da eficiência espectral de diferentes tipos de modulação [1].

Os sinais são gerados de uma forma precisa e eficiente, uma vez que tanto a modulação como a multiplexagem são feitas no domínio digital, recorrendo a transformada de Fourier rápida inversa (IFFT). Devido ao facto dos sinais transmitidos serem ortogonais, as portadoras são depois demoduladas sem ocorrer interferência, não sendo necessário recorrer a um filtro analógico para separar os sinais recebidos. A demultiplexagem do sinal é depois feita recorrendo a transformada rápida de Fourier (FFT) [30].

A estrutura do circuito do LED *driver* deve ter em conta o tipo de sinais que pretendemos modular. No caso da transmissão de sinais com formato de modulação digital utilizamos *On/Off drivers*. Para formatos de modulação mais complexos em que exijam níveis de saída contínua ou múltipla é mais indicado a utilização de *drivers* analógicos.

Os *On/Off drivers* permitem uma modulação do LED no domínio digital. Devido à sua baixa resistência de condução, o *metal-oxide-semiconductor field-effect* transístor (MOSFET) é normalmente utilizado quando temos em conta este domínio. Esta característica faz com que este transístor consiga suportar simultaneamente elevadas correntes e uma menor potência dissipada. Em [1] são analisadas várias configurações, sendo as mais importantes apresentadas na Figura 2.8.

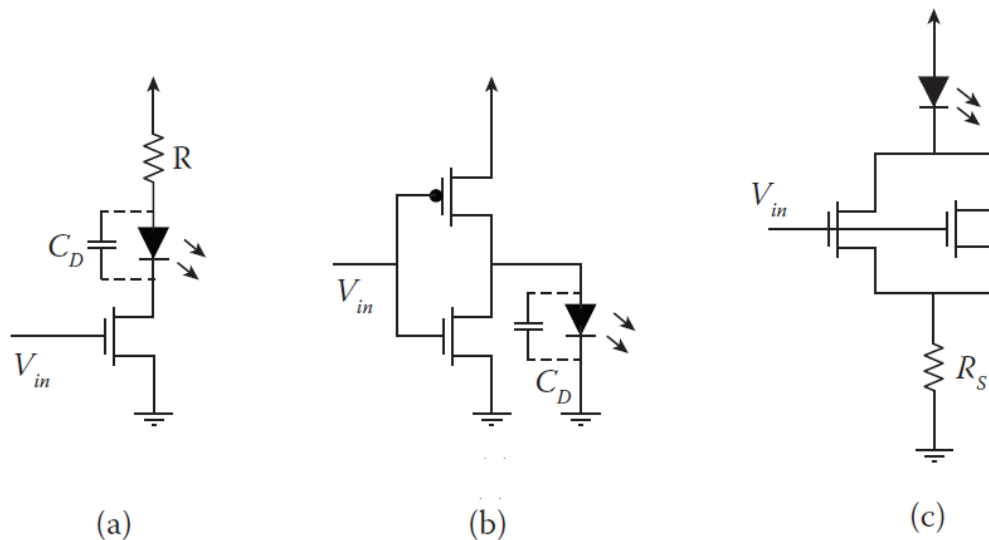


Figura 2.8 - Drivers digitais: a) único transistor b) CMOS c) combinação em paralelo de dois MOSFETs [1].

A Figura 2.8 a) apresenta um transistor em série com o LED. À medida que a tensão de entrada ( $V_{in}$ ) aumenta, a corrente no LED cresce, sendo possível controlá-la desta forma. Com o aumento da corrente, o condensador  $C_D$  vai carregando, estando limitado pela resistência  $R$ . Depois quando o transistor é desligado o condensador começa a descarregar lentamente, não acontecendo uma comutação rápida como seria desejável. Para evitar esta situação é colocado outro transistor em paralelo com o LED. Na Figura 2.8 b) recorre-se a um *complementary metal-oxide semiconductor* (CMOS). Neste caso apenas um dos transistores está ligado, sendo possível desta forma controlar a corrente através do transistor que está em cima e descarregar rapidamente o condensador  $C_D$ , utilizando o transistor que esta em baixo. De modo a aumentar a corrente no circuito geralmente acrescentam-se um ou mais transistores em paralelo, como é mostrado na Figura 2.8 c) [1].

Os *drivers* analógicos, são utilizados em modulações mais complexas, como *quadrature amplitude modulation* (QAM) e OFDM [31]. Em termos de linearidade, a melhor solução consiste em utilizar alternativas de condução de corrente.

De forma a utilizar o LED simultaneamente como fonte de comunicação e iluminação é necessário juntar o sinal de dados com o sinal responsável pelo escurecimento. Desta forma a modulação da saída ótica de um LED branco é tipicamente feita recorrendo a um *bias tee* (Figura 2.9 a)), utilizando uma corrente DC apropriada. [29]. Este dispositivo é composto por três portos, um para o sinal de entrada, outro para polarização e o terceiro que representa a combinação de ambos os sinais. Neste caso é

utilizado um condensador para alimentar a componente do sinal e uma bobina para polarização.

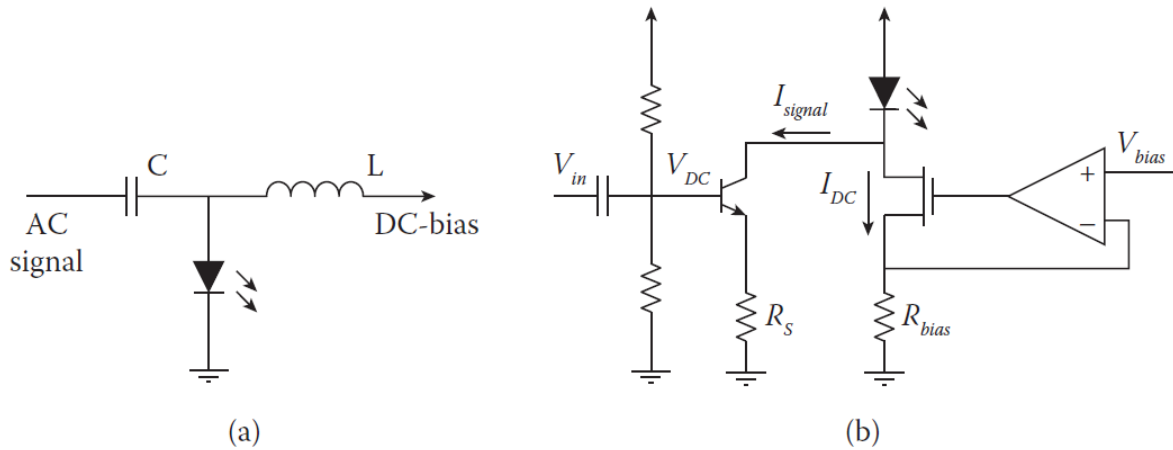


Figura 2.9 - Circuitos de combinação do sinal com a polarização: a) bias tee b) circuito combinado ativo [1].

O desempenho do circuito está diretamente ligado à qualidade do porto de saída. Desta forma a impedância de carga deve corresponder ao bias tee, caso contrário a seleção da frequência passa a estar dependente da carga. O circuito da Figura 2.9 a) não suporta a independência do LED em relação a corrente de polarização. Desta forma é apresentado um circuito alternativo na Figura 2.9 b), que utiliza dois transístores. O transístor da direita define a polarização, enquanto que o da esquerda elimina a corrente adicional do LED, de acordo com o sinal de entrada  $V_{in}$  [1]. A corrente de polarização é dada por:

$$I_{DC} = \frac{V_{Bias}}{R_{Bias}} + \frac{V_{DC} - V_{BE}}{R_S} \quad (1)$$

E a corrente do sinal é dada por:

$$I_{signal} = \frac{V_{in}}{R_S} \quad (2)$$

As unidades que descrevem as intensidades das saídas dos LEDs que emitem no visível são unidades luminosas (fotométricas). Por outro lado, a sensibilidade do fotodíodo é expressa em termos de unidades radiantes (radiométricas), sendo necessária uma conversão de modo a que seja possível comparar os dois sistemas. Esta conversão é feita recorrendo à função da sensibilidade do olho humano  $V(\lambda)$  e ao parâmetro da eficácia luminosa  $K_m = 683 \text{ lm/W}$ , que estabelece a relação entre a unidade radiométrica (Watt) e a unidade fotométrica (lumen) [32], [33]. A equação de conversão é dada por [24]:

$$Photometric \text{ unit} [lx] = radiometric \text{ unit} [Watt] \times K_m \left( \frac{lm}{W} \right) \times V(\lambda) \quad (3)$$

Sendo a função da sensibilidade do olho humano, com  $\lambda$  em micrómetros, dada por:

$$V(\lambda) = 1.019e^{-285.4(\lambda-0.559)^2} \quad (4)$$

Recorrendo ao gráfico da função presente em [32] a sensibilidade do olho humano apresenta um máximo para a luz verde ( $\lambda=555$  nm),  $V(555) = 1$  e para a luz vermelha ( $\lambda=700$  nm) o valor diminui consideravelmente,  $V(700) = 0.001$ .

A maioria dos estudos no VLC são feitos assumindo que a fonte de luz emitida é monocromática [24]. Desta forma, a potência ótica recebida de uma luz monocromática a um determinado comprimento de onda  $\lambda$  esta relacionada com a iluminância  $I(0)$ :

$$P_{rec} = \frac{I(0)\cos^m(\phi)}{K_m V(\lambda) D_d^2 \cos(\psi)} \quad (5)$$

Na equação 5,  $\phi$  corresponde ao ângulo de irradiação em relação ao eixo normal com a superfície do emissor e  $\psi$  o ângulo de incidência em relação a normal com a superfície do recetor.  $D_d$  corresponde a distância entre o emissor e a superfície do recetor.

O espectro da luz visível é composto por múltiplos comprimentos de onda, que variam entre os 380 nm e os 780 nm. Desta forma, para calcular a potência ótica recebida e a iluminância, é necessário integrar ao longo de todos os comprimentos de onda ocupados pela luz na função da sensibilidade do olho humano[24], [32]. A potência ótica recebida no recetor é dada por:

$$P_{rec} = \frac{I(0)\cos^m(\phi)}{K_m D_d^2 \cos(\psi) \int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad (6)$$

Na equação 6  $P(\lambda)$  corresponde à densidade espectral de potência, que corresponde a luz emitida por cada comprimento de onda [33].

### 2.1.2. Recetor

O recetor no sistema VLC é a parte do circuito responsável por receber e processar a luz emitida pelo emissor. É geralmente composto por um circuito de amplificação, um filtro ótico, um fotodíodo e um circuito de recuperação do sinal [18] [27], como é apresentado na Figura 2.10.

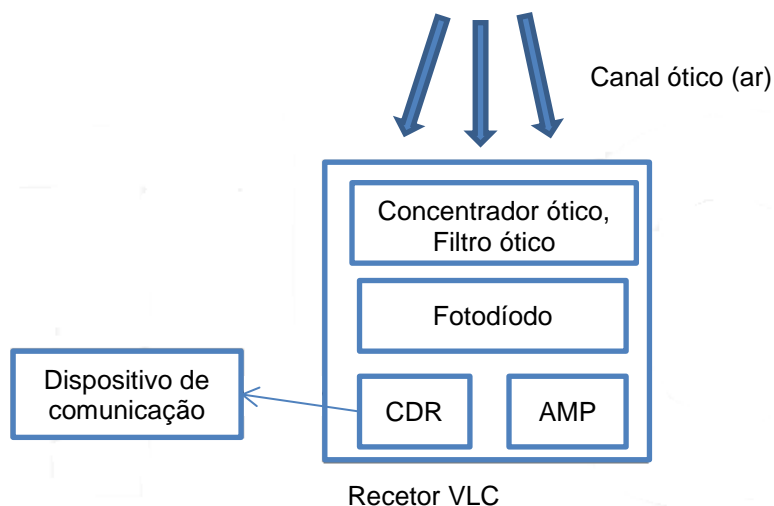


Figura 2.10 - Configuração de um Recetor de VLC (adaptado de [24]).

No recetor VLC, a luz é detetada recorrendo um fotodíodo e depois é convertida num sinal elétrico. Os fotodíodos que melhor reagem a luz visível são os que utilizam silício como material semiconductor, o *silicon p-type-insulator-n-type photodiode* (Si PIN-PD) e o *silicon avalanche photodiode* (Si APD). Estes operam entre os 400 nm e os 1200 nm, o que inclui a gama de comprimentos de onda da luz visível [24].

O fotodíodo APD tem uma melhor performance a atuar como recetor num sistema de comunicação ótica em espaço livre, quando comparado com o fotodíodo PIN [35]. Por outro lado, embora o fotodíodo PIN não possua um ganho tão elevado como o APD, a sua utilização pode ser vantajosa em ambientes com elevado ruído, onde o APD tende a saturar. Este apresenta também um custo mais reduzido e uma maior área ativa [6].

A corrente resultante da conversão do sinal ótico por parte do fotodíodo é geralmente muito pequena, sendo necessário recorrer a um amplificador para amplificar o sinal para níveis adequados, para posterior processamento [36]. Os amplificadores de transimpedância (TIAs) são utilizados para converter a corrente proveniente do fotodíodo em tensão [37]. Existem dois tipos de TIAs, o *open loop* e o *Feedback*. No caso do *open loop* (Figura 2.11 a)), dependendo da arquitetura, podem ser divididos em amplificadores de baixa ou de alta impedância de entrada. Os de baixa impedância de entrada são mais indicados em situações em que as aplicações requerem elevada largura de banda e um melhor desempenho em ambientes com pouco ruído, mas apresentam uma baixa sensibilidade. Os amplificadores de alta impedância, ao contrário dos anteriores apresentam uma elevada sensibilidade, mas um baixo desempenho em baixa frequência. Por outro lado, os *Feedback* TIAs caracterizam-se por uma elevada largura de banda em baixa impedância de entrada e uma grande sensibilidade com ganhos elevados, ultrapassando os principais problemas apresentados pelo *open loop* TIAs. Desta forma a solução escolhida geralmente, passa por utilizar um *Feedback* TIAs [1].

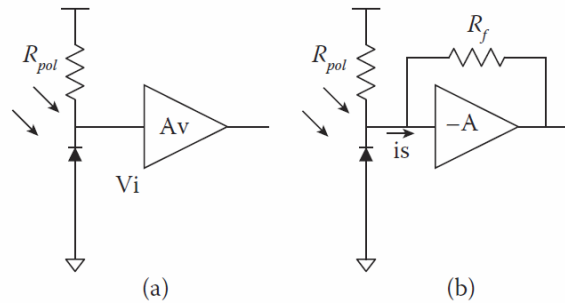


Figura 2.11 - Topologias básicas de um amplificador: a) configuração *open-loop* e b) configuração *feedback* [37].

De modo a melhorar o desempenho dos amplificadores, em [1], [36] e [37] são apresentadas diversas soluções que utilizam TIAs. Um dos problemas consiste na componente de ruído que é gerada além da corrente do sinal, quando utilizamos um fotodíodo para detetar o sinal ótico. Ruído térmico, *shot noise* e ruído ótico em excesso são exemplos de fontes de ruído com origens distintas. A solução apresentada em [37] consiste no uso de um filtro passa alto, colocado à entrada do circuito. Este filtro é realizado recorrendo a uma resistência de *bias* e a um condensador *bypass*, como mostra a Figura 2.12 a). Contudo este circuito possui algumas limitações, uma vez que seria necessária uma grande área para implementar o condensador desejado. Uma alternativa é apresentada na Figura 2.12 b), em que é possível utilizar integração, aplicando um esquema de polarização dinâmico ao fotodíodo. O efeito do excesso de ruído ótico é depois considerado como flutuações, que são posteriormente subtraídas (utilizando uma fonte de corrente controlada) ao sinal de entrada, eliminado assim o ruído existente [1].

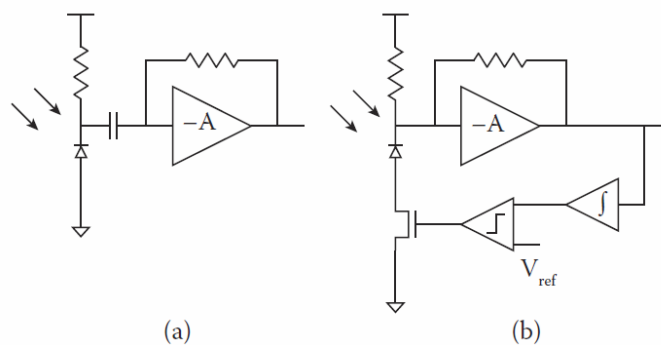


Figura 2.12 - Esquemas de polarização do fotodíodo: a) Filtro passa alto e b) polarização dinâmica [1].

## 2.2. Processamento do Feixe Ótico

Para que seja possível realizar um sistema de VLC é necessário que as potências emitidas e recebidas possuam níveis adequados. No caso do emissor, o elevado ângulo de visão normalmente utilizado ( $120^\circ$ ) faz com que o fluxo de luz emitida se disperse, fazendo com que não seja possível utilizar o VLC em comunicações a longas distâncias [38]. No caso do recetor, o fotodíodo geralmente possui uma área ativa reduzida, fazendo com que o sinal ótico captado não possua uma intensidade muito elevada

quando se encontra a uma grande distância do emissor. Desta forma, a solução para ambos os problemas referidos passam pela utilização de uma lente, tanto no emissor como no recetor.

No emissor é importante direccionar a luz emitida de forma a evitar que esta se disperse. A solução passa por reduzir o ângulo de visão, através de uma lente colimada de forma a criar um efeito de luz uniforme [22]. Este tipo de lente faz com que a luz emitida pelo LED seja concentrada dentro do diâmetro da Lente, como é possível observar na Figura 2.13 a). No caso do recetor é importante que a intensidade de luz recebida seja a desejada. Desta forma soluções possíveis consistem no uso de uma lente convergente (Figura 2.13 b)) ou tal como acontece no emissor, uma lente colimada mas com a função oposta, que faz com que o fluxo de luz recebido na sua superfície da lente seja concentrado na área ativa do fotodiodo. Para as funções pretendidas surgem alguns exemplos de lentes que são possíveis de utilizar: Fresnel, esférica e esférica.

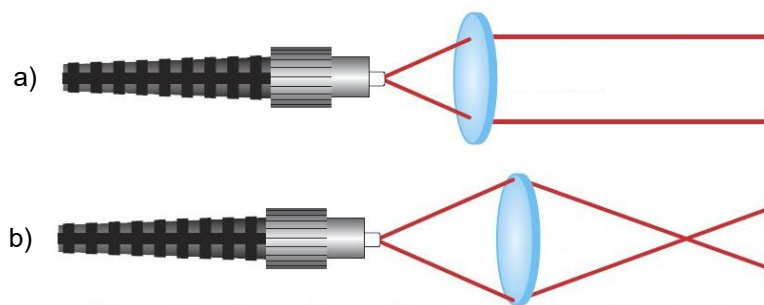


Figura 2.13 – Lentes: a) colimada e b) convergente [39].

O sistema VLC está exposto a diversas fontes de iluminação, além da luz proveniente do emissor. Desta forma, é importante utilizar um filtro óptico apropriado, de modo a rejeitar as componentes DC do ruído que não são desejadas no sinal [3]. Como é possível visualizar pela Figura 2.14, o ruído proveniente de outras fontes de luz, interfere com diferentes densidades de potência espectral. A luz incandescente emite níveis elevados na zona dos infravermelhos, enquanto que na iluminação fluorescente os níveis de radiação emitida variam desde o ultravioleta até ao infravermelho. A luz do sol é a maior fonte de interferência, emitindo níveis de radiação elevados ao longo de toda a gama visível.

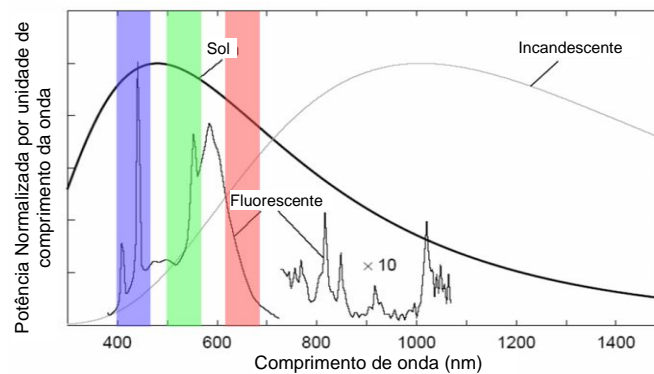


Figura 2.14 - Espectro de várias fontes de luz [40].



Uma possível solução consiste no uso de um filtro de interferência [6]. Este filtro seria colocado na lente que se encontra à entrada do fotodíodo, fazendo com que o recetor receba apenas os sinais numa determinada banda de comprimentos de onda. Outra alternativa é proposta em [40], em que o método de filtragem ótica (Figura 2.15) utiliza uma membrana especial que contém uma camada de *microlouver*, capaz de reduzir ou praticamente eliminar o efeito da luz incidente em ambientes externos. A utilização destes filtros, embora seja necessária pode diminuir o comprimento do sinal recebido, fazendo com que o dispositivo esteja mais suscetível a erros [6].

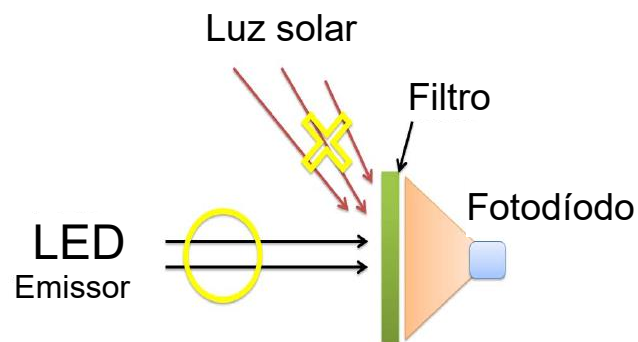


Figura 2.15 - Filtro proposto contra a luz solar que incide obliquamente [40].

# 3. Desenho de um sistema de Li-Fi

## 3.1. Descrição geral

Como solução inicial é proposto um modelo para VLC, composto por um emissor, um meio de transmissão em espaço livre e um recetor. O emissor consiste num LED branco com uma potência elétrica de aproximadamente 1 W. O sinal pode ser gerado recorrendo a um gerador de sinais, sendo depois modulado através de OOK. Do lado do recetor, o sinal é filtrado recorrendo a um filtro ótico e depois é concentrado no fotodíodo PIN, através de uma lente convergente. O sinal ótico recebido é depois convertido num sinal elétrico é amplificado através de um TIA. O esquema da solução proposta é apresentado na Figura 3.1.

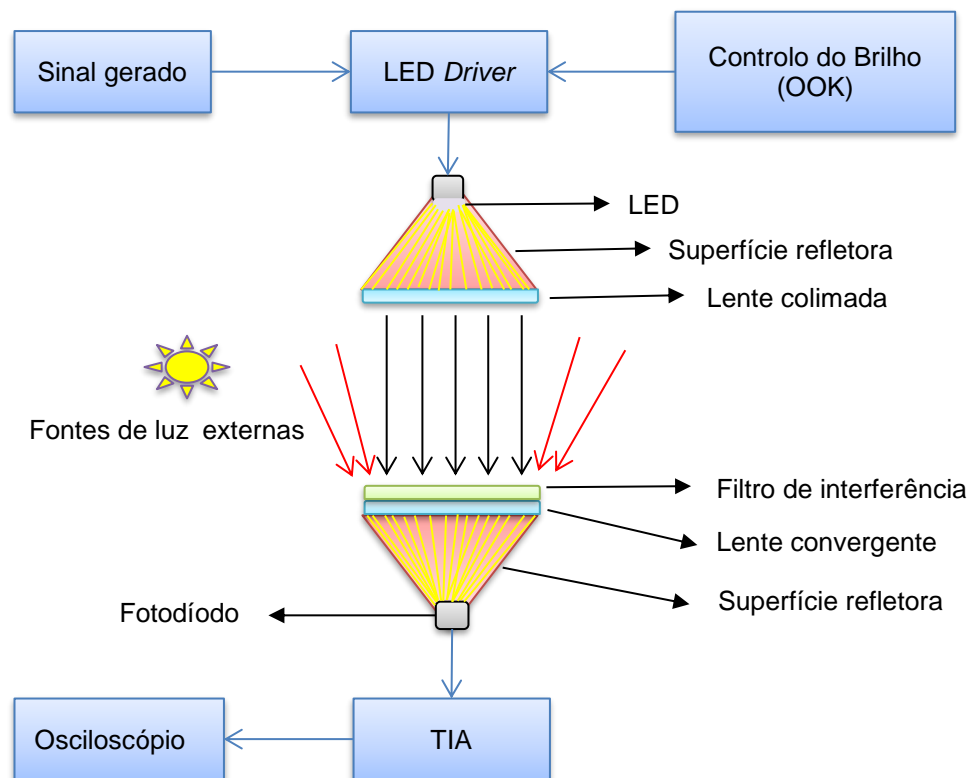


Figura 3.1 - Esquema da solução proposta.

## 3.2. Análise teórica

De forma a obter resultados teóricos iniciais, analisaram-se três situações com o objetivo de calcular a corrente recebida a uma determinada distância do emissor. A primeira situação corresponde ao caso em que não é utilizada uma lente colimada, sendo que neste caso o fluxo se dispersa de forma constante, de acordo com o ângulo de abertura do LED (Figura 3.2). No segundo caso (Figura 3.3), é utilizada uma lente, com o objetivo de concentrar o fluxo à saída do LED num determinado diâmetro.

Na última situação analisou-se o efeito do perfil do feixe na potência recebida (Figura 3.4). Nas três situações, não é considerado o ruído que seria introduzido por outras fontes de luz externas.

- **Situação 1 – feixe divergente**

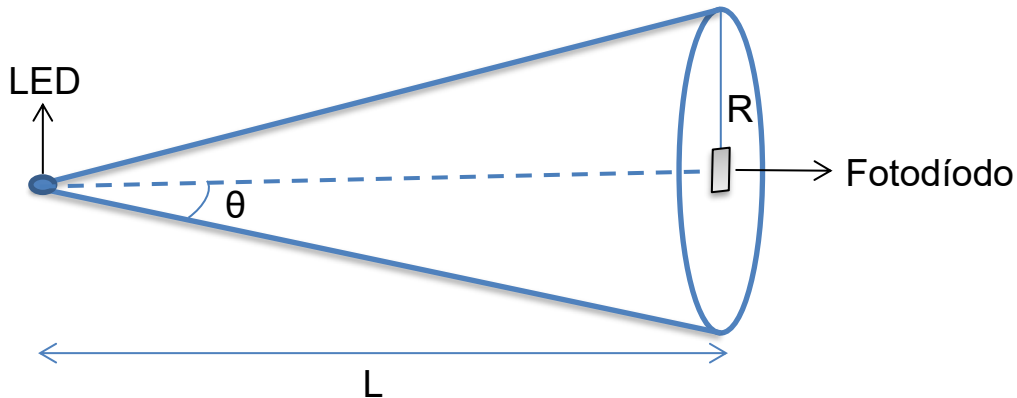


Figura 3.2 – Situação em que não é utilizada uma lente.

Na Figura 3.2 R corresponde ao raio da superfície iluminada, L à distância e θ a metade do ângulo da abertura total. Desta forma, R vem dado por:

$$R = L \tan(\theta) \quad (7)$$

Considerando uma potência emitida no LED ( $P_e$ ) e o coeficiente de absorção do ar ( $\alpha$ ), é possível obter a intensidade de radiação a uma distância L, sendo dada pela seguinte expressão:

$$I_r = \frac{P_e}{\pi R^2} e^{-\alpha L} \quad (8)$$

Tendo em conta que o fotodíodo PIN tem uma determinada área ( $A_f$ ) é possível calcular a potência recebida na sua superfície à distância analisada:

$$P_r = I_r A_f \quad (9)$$

Uma vez que neste caso, o fotodíodo se encontra no centro da circunferência alinhado com o emissor, o ângulo  $\varphi = 0^\circ$ . Assim considerando o diagrama de radiação apresentado na Figura 2.4, a intensidade relativa luminosa para este ângulo apresenta o valor de 100%, não alterando os resultados apresentados. Tendo em consideração o efeito de absorção da atmosfera ( $\alpha = 0.001 \text{ m}^{-1}$  [41]), com  $L = 2 \text{ m}$ , recorrendo ao LED branco apresentado na secção 2.1.1 (com  $P_e = 1.03 \text{ W}$  e  $\theta = 60^\circ$ ) e a um fotodíodo PIN (PD70-01B/TR7 [42]) com uma área ativa de  $4.4 \times 3.9 \text{ mm}^2$ , obtém-se os valores apresentados na tabela 3.1.

Parâmetro	Valor
<b>R</b>	3.46 m
<b>I<sub>r</sub></b>	0.03 W/m <sup>2</sup>
<b>P<sub>r</sub></b>	$0.47 \times 10^{-6} \text{ W}$

Tabela 3.1 – Valores calculados para a situação 1

- **Situação 2 – feixe colimado**

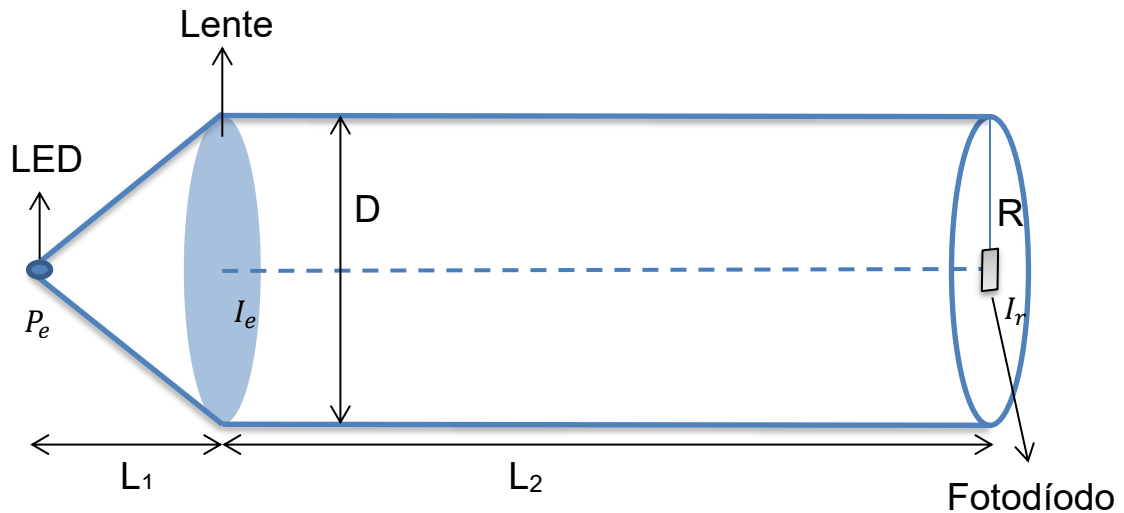


Figura 3.3 – Solução em que é utilizada uma lente colimada.

Considerando que a distância  $L_1$  é muito reduzida ( $L_1 = 5$  cm), podemos desprezar na equação (8) o fator exponencial, sendo a intensidade de radiação à distância  $L_1$  dada por:

$$I_e = \frac{P_e}{\pi R^2} \quad (10)$$

Uma vez que nesta situação se utiliza uma lente, a luz está concentrada dentro do diâmetro  $D$ , sendo que para obter a intensidade de radiação à distância  $L_2$  ( $I_r$ ), apenas temos de considerar o efeito de absorção da atmosfera. Assim,  $I_r$  é dado por:

$$I_r = I_e e^{-\alpha L_2} \quad (11)$$

Tal como na situação 1, o fotodíodo apresenta-se no centro da circunferência, obtendo-se assim com a análise do diagrama de radiação o ângulo  $\varphi = 0^\circ$  e intensidade relativa luminosa de 100%, sendo que este fator não altera os resultados apresentados. De forma a obter a potência recebida recorre-se novamente a expressão (9), considerando uma distância  $L_2 = 2$  m. Tendo em consideração o efeito de absorção da atmosfera ( $\alpha = 0.001 \text{ m}^{-1}$  [41]), recorrendo ao mesmo fotodíodo PIN apresentado na situação 1 (PD70-01B/TR7 [42]), com uma área ativa de  $4.4 \times 3.9 \text{ mm}^2$  e ao LED branco apresentado na secção 2.1.1 (com  $P_e = 1.03 \text{ W}$ ), obtém-se os valores apresentados na tabela Tabela 3.2.

Parâmetro	Valor
$R$	0.087 m
$I_e$	43.71 W/m <sup>2</sup>
$I_r$	43.63 W/m <sup>2</sup>
$P_r$	$0.75 \times 10^{-3} \text{ W}$

Tabela 3.2 – Valores calculados para a situação 2.

Como previsto anteriormente, uma vez que na situação 2 o fluxo de luz emitida se encontra concentrado no diâmetro  $D$ , a intensidade de luz recebida à mesma distância é muito superior, quando comparada

à situação 1. Desta forma é possível verificar que o uso de uma lente no emissor conduz a uma diminuição da luz dispersa e a um conseqüente aumento da potência recebida.

- **Situação 3 – Efeito do perfil do feixe**

Recorrendo novamente ao exemplo apresentado na Figura 3.2, analisou-se qual seria a variação da potência recebida, no caso em que o fotodíodo se desloca em relação ao eixo central, fazendo com que o ângulo  $\varphi$  seja diferente de zero. Uma vez que se trata do mesmo sistema da situação 1, optou-se por utilizar as mesmas distâncias, assim como a mesma potência emitida, podendo assim ser realizada uma comparação com a situação em que  $\varphi = 0^\circ$ . O esquema utilizado para esta situação encontra-se apresentado na Figura 3.4.

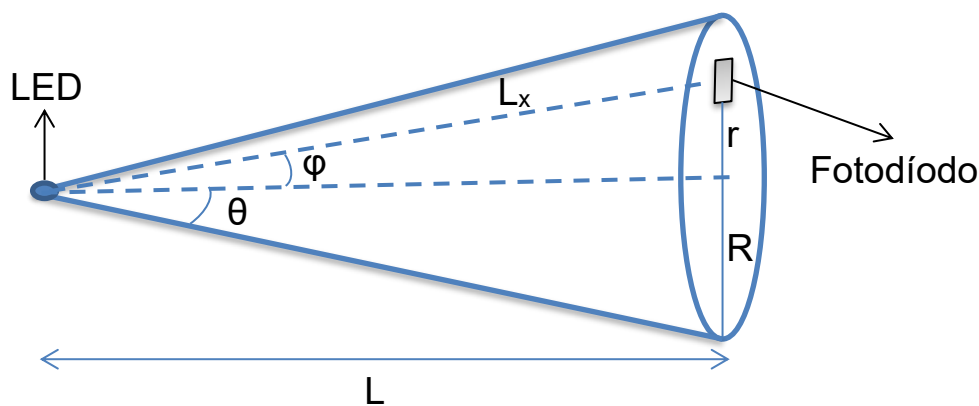


Figura 3.4 - Solução em que não se recorre a uma lente, variando a posição do fotodíodo.

Para a solução apresentada na Figura 3.4, uma vez que neste caso pretendemos analisar a variação com o ângulo  $\varphi$ , optou-se após análise da Figura 2.4, por considerar 3 situações distintas, em que temos  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$  e  $\varphi = 60^\circ$ . No caso em que o ângulo  $\varphi$  é diferente de zero, a potência recebida corresponde ao valor da intensidade luminosa recebida quando  $\varphi = 0^\circ$  multiplicada pela intensidade luminosa relativa (RLI) correspondente ao ângulo  $\varphi$ . Utilizando uma distância  $L = 2$  m, com a mesma potência emitida e ângulo de emissão ( $P_e = 1.03$  W e  $\theta = 60^\circ$ , LED branco), considerando o efeito de absorção da atmosfera ( $\alpha = 0.001$  m<sup>-1</sup>[41]) e o mesmo fotodíodo PIN utilizado na situação 1 ( $A = 4.4 \times 3.9$  mm<sup>2</sup>), obtém-se os valores apresentados na tabela 3.3.

Ângulo $\varphi$	R	r	$L_x$	RLI (%)	$I_r$	$P_r$
0°	3.46 m	0 m	2 m	100	0.03 W/m <sup>2</sup>	0.47x10 <sup>-6</sup> W
30°	3.46 m	1.15 m	2.3 m	80	0.024 W/m <sup>2</sup>	0.41 x10 <sup>-6</sup> W
60°	3.46 m	3.46 m	3.97 m	40	0.012 W/m <sup>2</sup>	0.21x10 <sup>-6</sup> W

Tabela 3.3 – Variação da potência recebida quando variamos a posição do fotodíodo em relação ao eixo central.

Analisando os resultados obtidos na Tabela, verifica-se que à medida que o fotodíodo se afasta do eixo central, a potência recebida diminui de forma significativa, de acordo com o diagrama de radiação do LED utilizado. Neste caso em particular, para um ângulo  $\varphi = 30^\circ$  a potência recebida diminui cerca de 20%, enquanto que na situação mais extrema (com  $\varphi = 60^\circ$ ) o valor de potência recebida diminui aproximadamente 60%, quando comparado à situação em que  $\varphi = 0^\circ$ .

### 3.3. Caracterização do LED

Um dos aspetos importantes a analisar no LED, consiste em perceber para que valores inicia o seu funcionamento e para que valores de tensão podemos considerar um valor médio. Desta forma para caracterizar o desempenho de cada um dos LEDs presentes no *XLamp MC-E LED* [26], realizou-se um teste em que se recorreu a um gerador de potência DC (*Velleman PS613* [43]) e um fotómetro (IF-PM200 [44]). O esquema realizado apresenta-se na Figura 3.5. Uma vez que este LED possuiu 4 LEDs de cores distintas (Verde, Azul, Vermelho e Branco) torna-se necessário realizar a análise para as quatro situações. A potência emitida é proporcional à corrente, desta forma variando a corrente entre 0 e 500 mA, em intervalos de 50 mA, traçou-se as respetivas curvas de funcionamento para cada um dos LEDs em questão, encontrando-se apresentadas na Figura 3.5.

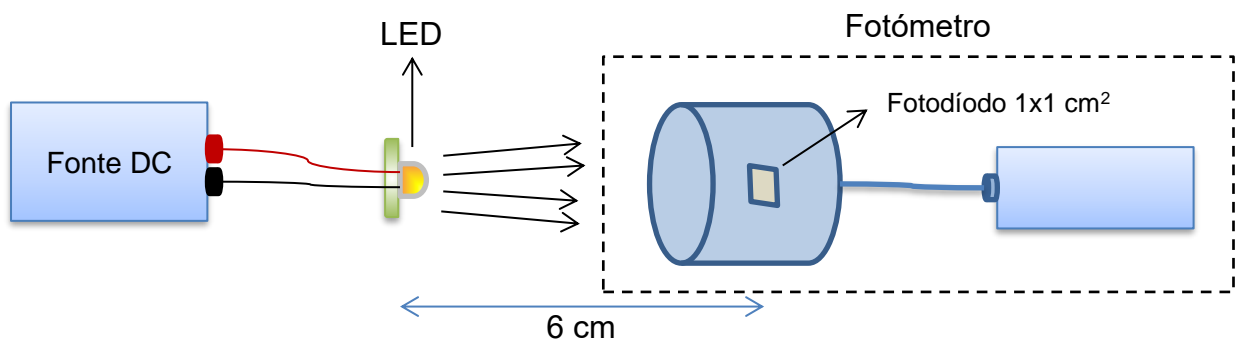


Figura 3.5 - Teste realizado para análise de funcionamento do LED *XLamp MC-E* [26] .

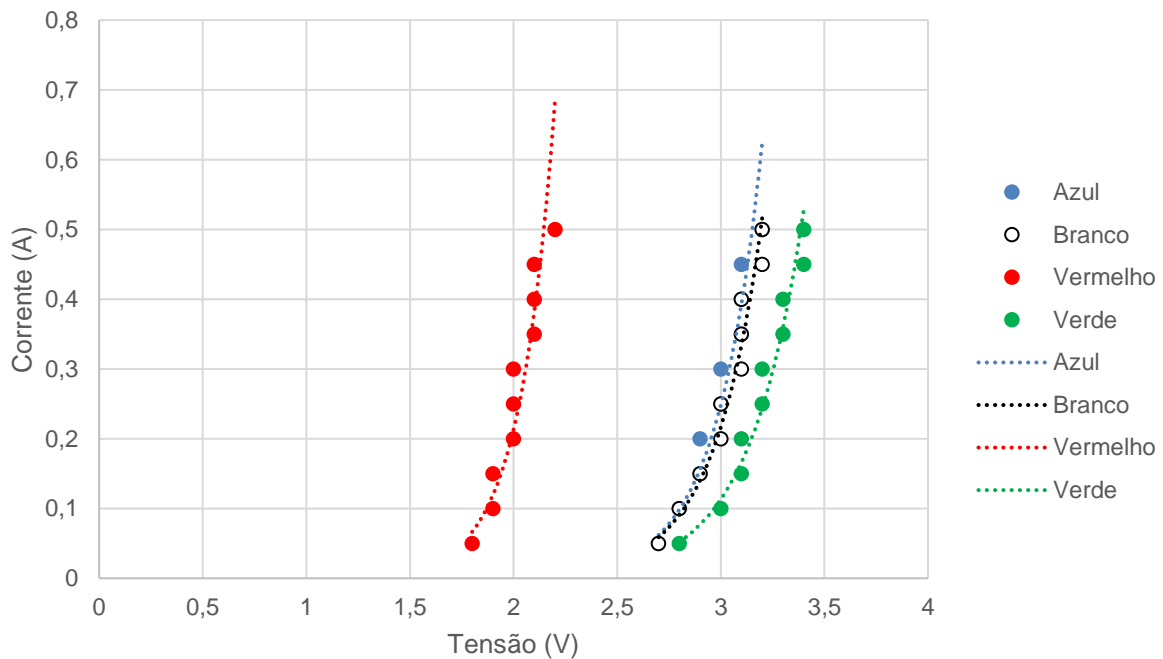


Figura 3.6 - Curvas de descrição do funcionamento dos LEDs vermelho, azul, branco e verde.

Na Figura 3.6, tal como esperado, à medida que a corrente aplicada aumenta, verifica-se também um aumento da tensão. Comparando os gráficos apresentados na Figura 3.6 com os dados disponibilizados no *Datasheet* (Figura 3.6) [26] do LED utilizado, verifica-se que ambos coincidem, sendo possível concluir que os valores obtidos se encontram corretos.

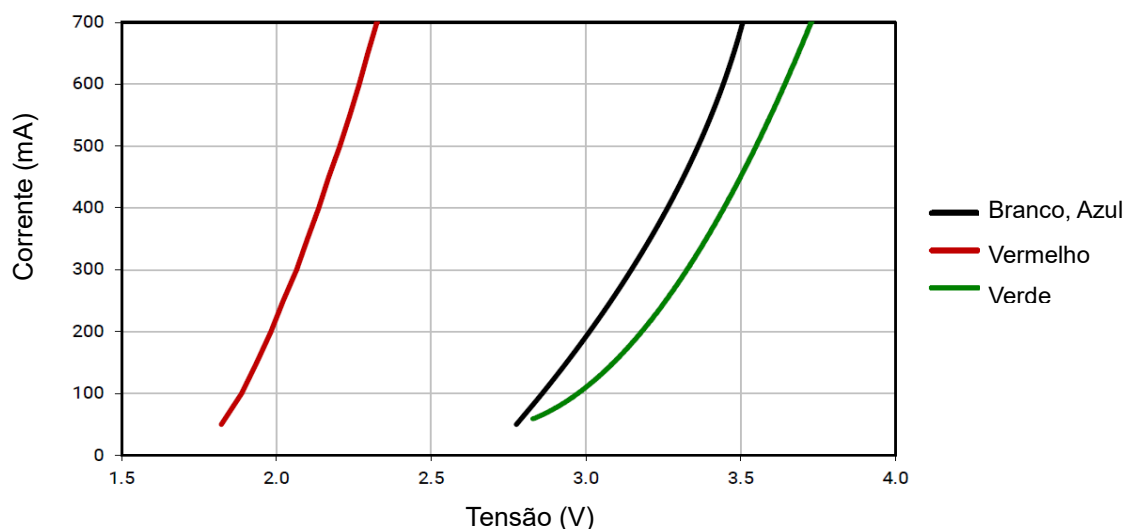


Figura 3.7 - Curvas que caracterizam o funcionamento do LED RGB *XLamp MC-E* presentes no *Datasheet* [26].

Analisando os gráficos da Figura 3.6, é possível verificar os pontos médios de funcionamento e para que valores de tensão e corrente os LEDs acendem. Os valores correspondentes apresentam-se sumarizados na tabela 3.4. O valor mínimo corresponde à tensão e corrente para o qual o LED respetivo acende, enquanto que o valor médio correspondente aos valores de tensão e corrente para o qual o LED funciona corretamente. Sabendo o ponto médio, torna-se possível variar a tensão e a corrente de forma a que o LED pisque sem que o utilizador consiga notar, possibilitando o envio de informação sem afetar a iluminação.

LED	Valores mínimos		Valores médio	
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
<b>Azul</b>	2.7 V	0.05 A	3 V	0.3 A
<b>Branco</b>	2.7 V	0.05 A	3 V	0.25 A
<b>Vermelho</b>	1.8 V	0.05 A	2 V	0.25 A
<b>Verde</b>	2.8 V	0.05 A	3.2 V	0.25 A

Tabela 3.4 - Valores de tensão característicos de cada um dos LEDs utilizados.

De modo a completar a análise do funcionamento de cada um dos LEDs utilizados, torna-se também importante analisar os comprimentos de onda e a respetiva distribuição espectral de potência. Assim, recorrendo ao espectrómetro S09500 da *OceanView* [45] foi possível analisar para cada uma das cores utilizadas o espectrograma correspondente. Este encontra-se apresentado na Figura 3.8. Comparando o resultado obtido com o apresentado na Figura 2.3 verifica-se que ambos apresentam a mesma forma, sendo que assim é possível confirmar a sua veracidade.

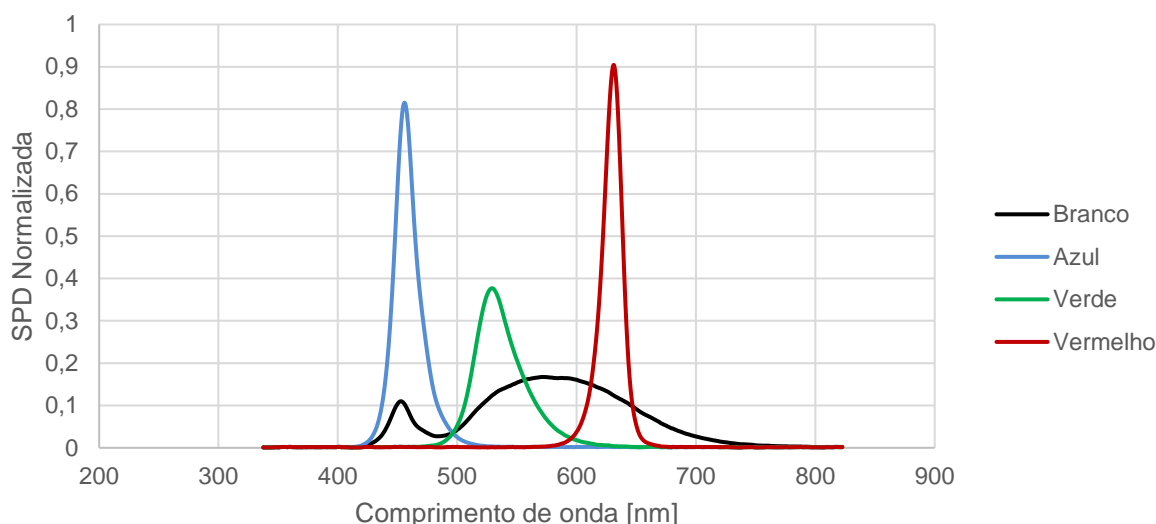


Figura 3.8 - Espectro obtido para o LED RGB *XLamp MC-E* analisado.

Analisando a Figura 3.8, é possível perceber que para o LED azul a densidade espectral de potência é máxima para o comprimento de onda de 460 nm, no caso do Vermelho 625 nm e no LED verde 525 nm. A luz branca corresponde a soma das três cores RGB e apresenta um espectro que abrange uma gama espectral maior.

### 3.4. Câmara do *smartphone* como recetor *Li-Fi*.

Um sistema *Li-Fi* consiste na utilização de iluminação para a transmissão de informação. Essa informação é depois recebida por um sensor ótico que permite um posterior processamento. A ideia neste caso passa por recorrer às capacidades da câmara de um *smartphone*, com o objetivo de captar o sinal emitido pelo LED, substituindo desta forma a necessidade de utilizar um Fotodíodo. O sistema estudado apresenta-se na Figura 3.9. O sinal é gerado no *Matlab*, com uma determinada frequência de amostragem, sendo depois enviado para o *Adalm1000* que permite colocar à saída de uma das suas portas uma determinada tensão, que fará ligar ou desligar o LED dependendo do sinal pretendido. A ligação final é feita recorrendo a um LED driver (modelo T-Cube LEDD18 *ThorLabs* [46]) que permite conduzir a corrente até ao LED. Este sinal é depois emitido e captado pela câmara do *smartphone*. A captação é feita recorrendo a uma aplicação que permite detetar a intensidade de luz que a câmara recebe, sendo desta forma possível perceber como é que a intensidade da luz recebida varia. A aplicação designa-se por *Luxímetro* [47] e permite no máximo aquisição de um valor a cada 0.1 s, estando a frequência de captação limitada pelas características da câmara. A aplicação permite exportar os dados adquiridos num ficheiro de texto (formato .txt) de forma a que seja possível processá-los posteriormente. Recorrendo ao *Matlab*, posteriormente descodifica-se o sinal recebido, obtendo o sinal transmitido pelo LED. A Figura 3.10 esquematiza o processo que é utilizado na desmodulação. Uma vez que se trata de uma modelação em intensidade OOK a sua desmodulação torna-se simples, bastando analisar os níveis médios captados e determinar se os valores de intensidade se encontram acima ou abaixo de um determinado valor limite. Assim analisando a amostra que corresponde a



metade da duração de cada um dos bits, combinando com o facto de se encontrar acima ou abaixo do limite estabelecido, é possível descodificar o sinal recebido. No caso de a amostra analisada apresentar um nível de intensidade superior ao valor médio, corresponde a um bit '1', caso seja inferior corresponde a um bit '0'. O processo repete-se para todos os conjuntos de amostras analisados e o sinal é descodificado.

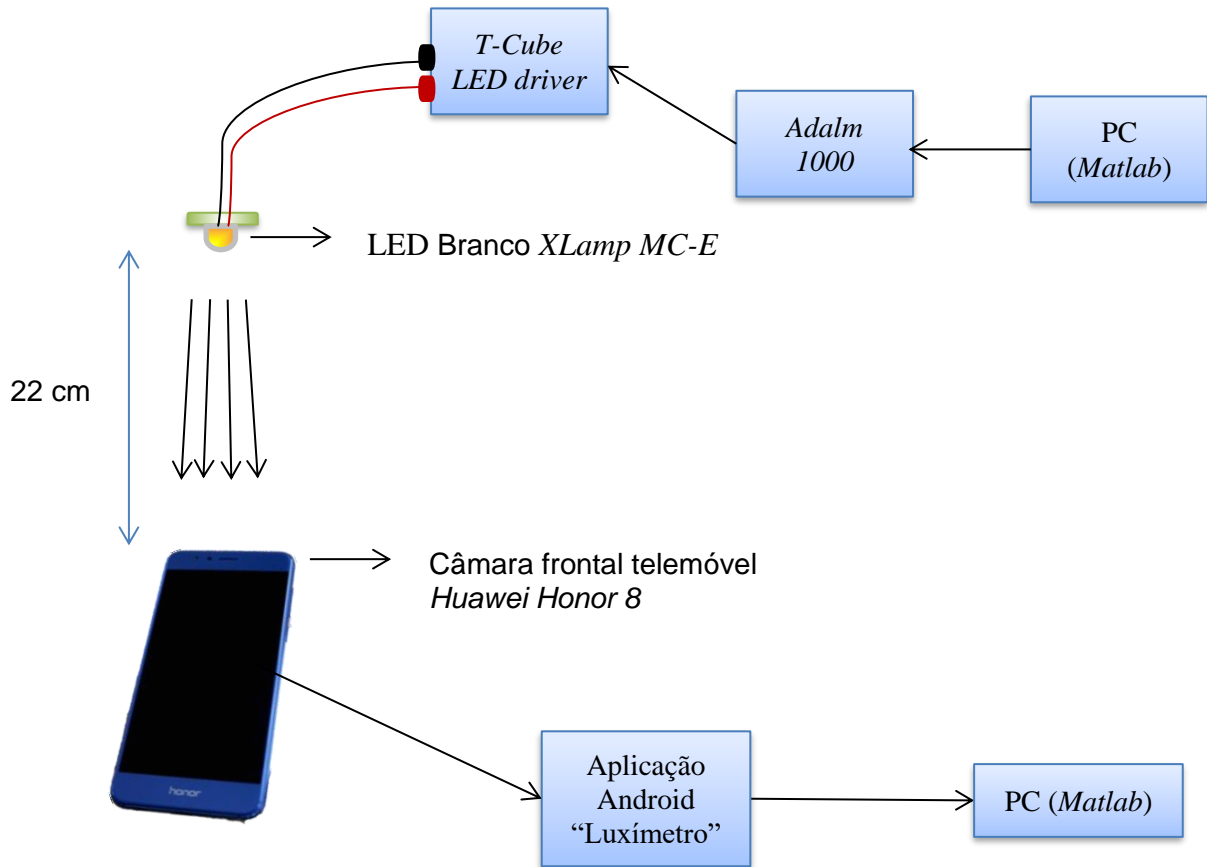


Figura 3.9 – Esquema do circuito utilizado para a situação em que se recorre à câmara frontal do *smartphone* como recetor.

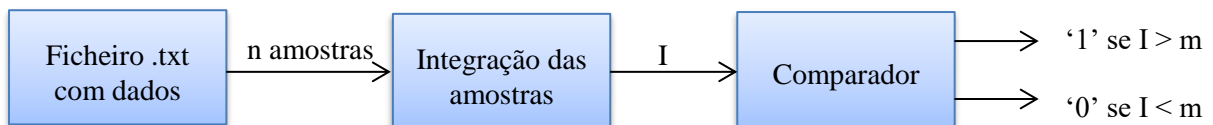


Figura 3.10 - Processo de desmodulação utilizado, quando recorremos à câmara frontal do *smartphone* como recetor.

A solução apresentada permite utilizar um *smartphone* como recetor Li-Fi, sem que seja necessário efetuar alterações ao seu *Hardware*. Por outro lado, a câmara utilizada apresenta algumas limitações, fazendo com que o ritmo de transmissão seja teoricamente mais reduzido.

### 3.5. Fotodíodo como recetor

De forma a eliminar as limitações impostas pela câmara utilizada, recorre-se a um fotodíodo para realizar a deteção do sinal que é transmitido pelo LED (XLamp MC-E). O fotodíodo permite transformar a luz em corrente elétrica fazendo com que, dependendo da sua área de captação, possibilite adquirir um valor consideravelmente superior de amostras, quando comparado a uma câmara que se encontra limitada pelo número de máximo de *frames* que consegue adquirir num segundo. O sistema proposto para esta situação é apresentado na Figura 3.11. Através do *Matlab*, é gerado um sinal com uma determinada frequência de amostragem. Uma vez que o conversor utilizado é o *Adalm1000*, o número máximo de amostras que é possível transmitir a cada segundo é fixo, correspondendo a frequência de amostragem de 100 kHz. O sinal enviado através do conversor é depois modulado no LED driver, que efetua a ligação entre o *Adalm1000* e o LED utilizado. Tendo em conta a análise feita anteriormente, na descrição do funcionamento do LED, a tensão aplicada varia consoante a cor que estamos a utilizar. O emissor termina com o LED que é responsável por transformar o sinal elétrico para o domínio ótico, que após percorrer uma determinada distância é recebido no fotodíodo (*ThorLabs PbS PDA30G* [48]). Este converte o sinal novamente para o domínio elétrico analógico, que depois recorrendo a um ADC é convertido num sinal digital, possível de analisar num computador com recurso ao *Matlab*, onde é descodificado posteriormente. A descodificação é feita através de uma análise de intensidade das amostras recebidas. Tal como no exemplo anterior, analisa-se a intensidade de cada conjunto de amostras recebido. Se o seu valor for superior ao valor médio, então corresponde ao valor lógico '1', no caso da intensidade apresentada ser inferior ao valor médio, na descodificação é atribuído o valor '0'. O processo de demodulação encontra-se apresentado na Figura 3.12. Este é repetido para todos os conjuntos de amostras que correspondem ao sinal recebido, até que este seja totalmente descodificado.

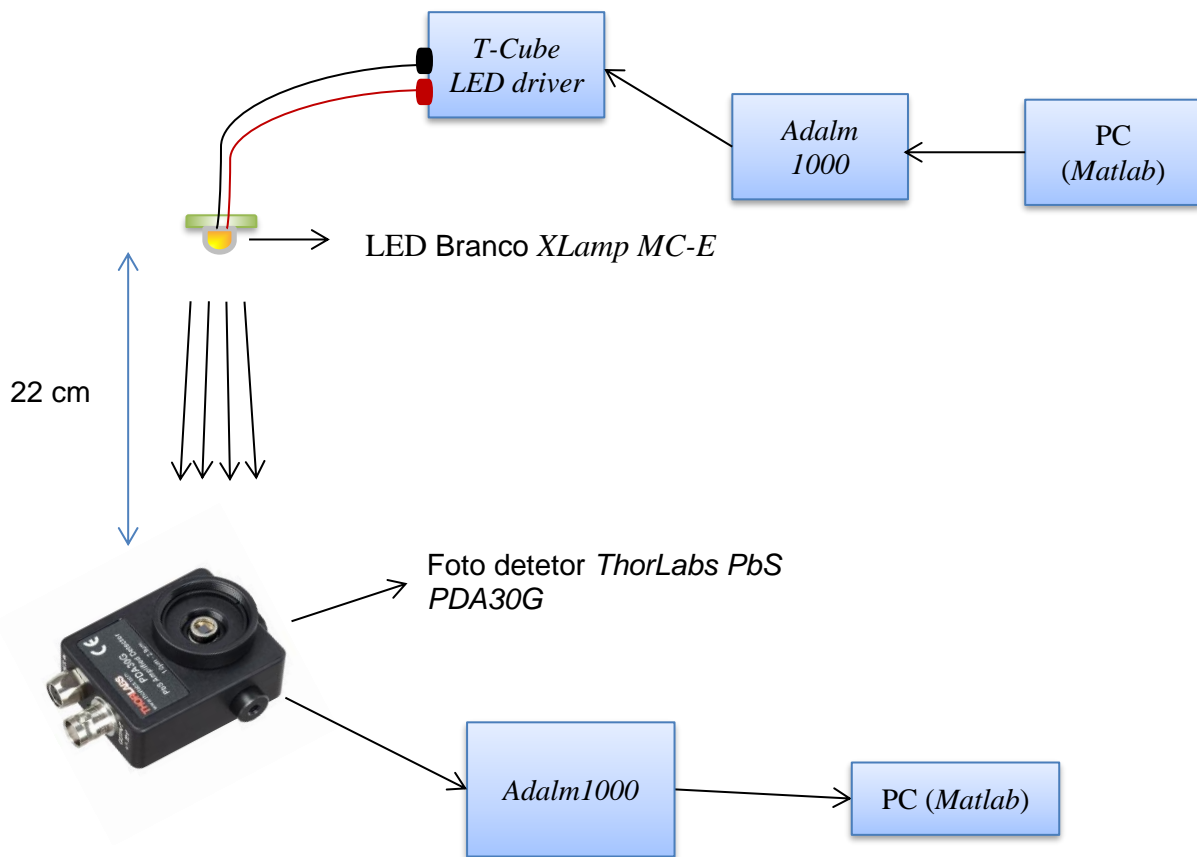


Figura 3.11 - Esquema do circuito utilizado para a situação em que se recorre ao fotodiodo como recetor.

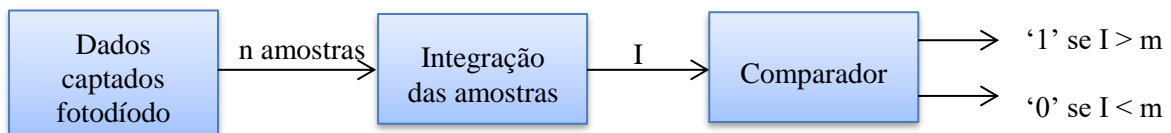


Figura 3.12 - Processo de desmodulação utilizado quando recorremos a um fotodiodo como recetor.

De forma a analisar os erros que ocorrem durante a transmissão, recorreu-se a uma função do *Matlab* designada por *biterr*. Esta permite comparar os bits recebidos com os bits que foram enviados, possibilitando a análise do BER. Esta análise pode ser feita através da variação da distância de transmissão, para uma distância fixa (variando o ritmo de transmissão) ou através da variação da potência que é colocada à entrada do emissor. O foto detetor utilizado apresenta uma área reduzida de apenas 9 mm<sup>2</sup>, apresentando-se como um bom exemplo do que seria um recetor inserido num telemóvel.

Num sistema *Li-Fi*, é importante que o utilizador possa recorrer ao LED com a dupla função de iluminação e transmissão de dados. Desta forma é essencial que não seja possível distinguir as variações que são utilizadas para realizar o envio da informação. Um conceito importante associado a

este fenómeno designa-se por razão de distinção, que analisa a diferença que existe entre a potência apresentada no bit '1' em relação ao bit '0'. Este encontra-se apresentado na equação 12.

$$ER = 10\log\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (12)$$

Na equação 12,  $P_1$  e  $P_0$  correspondem respetivamente a potência associada ao bit '1' e bit '0'. Desta forma torna-se possível perceber a diferença entre a potência máxima e mínima e fazer com que a razão de distinção seja a mínima possível.

### **3.6. Transmissão recorrendo à modulação *Color-Shift Keying*.**

De modo a triplicar a informação que pode ser transmitida, neste caso propõem-se a utilização simultânea das três cores disponibilizadas no LED RGB em questão. No exemplo anterior, recorrendo apenas à Luz branca mostrou-se que através das intensidades, é possível desmodular o sinal recorrendo ao *Matlab*. Neste caso gerando três sinais em simultâneo torna-se viável transmitir no mesmo intervalo de tempo o triplo das amostras. O sinal é depois recebido recorrendo novamente à câmara do telemóvel, mas uma vez que a utilização da câmara frontal apresenta algumas limitações, como é o caso da resolução e dos *frames* que podem ser captados por segundo, a alternativa passa por recorrer a câmara traseira do *Huawei Honor 8* utilizado. Esta possibilita uma resolução de 1920x1080 pixels (*Full HD*) a 60 *fps*, sendo o dobro dos *frames* captados no mesmo intervalo de tempo que a câmara frontal (30 *fps*). Na Figura 3.13 é possível visualizar o esquema do conceito apresentado. Nesta experiência, tal como na situação com apenas um único LED, o sinal que é colocado no LED de cor verde é gerado pelo código feito no *Matlab* e depois é transmitido para o emissor através do *Adalm1000*. Este dispositivo possui uma frequência de amostragem fixa de 100 kHz, possibilitando o envio de até 100000 amostras por segundo. O sinal por ele emitido é depois modulado através *T-Cube LED Driver* e enviado para o LED RGB, que através da cor verde emite o sinal pretendido. Uma vez que a ideia passa por testar o envio de três cores em simultâneo, recorre-se a dois geradores de sinais, cuja função consiste em gerar sinais retangulares com frequências diferentes para os LEDs vermelho e azul. O sinal transmitido é depois recebido no recetor, que para este caso em particular é uma câmara de telemóvel, que através de um vídeo permite captar as intensidades das respetivas cores recebidas. O processamento é feito posteriormente, recorrendo ao *Matlab*. A Figura 3.14 esquematiza o processo que é utilizado na desmodulação. Este consiste na análise individual de cada um dos *frames* recebidos, permitindo assim analisar os valores médios das intensidades de cada uma das cores. O processo permite perceber se num determinado *frame*, a intensidade de cada uma das cores analisadas corresponde ao bit '0' ou bit '1'. Para fazer esta distinção é analisado o valor médio de cada uma das cores ao longo de todo o vídeo. Se a intensidade média da cor analisada presente em cada *frame* for

superior a este nível, corresponde a um bit '1', caso seja inferior temos um bit '0'. O processo é repetido para todos os *frames* que compõem o vídeo e assim torna-se possível descodificar o sinal recebido correspondente a cada uma das cores.

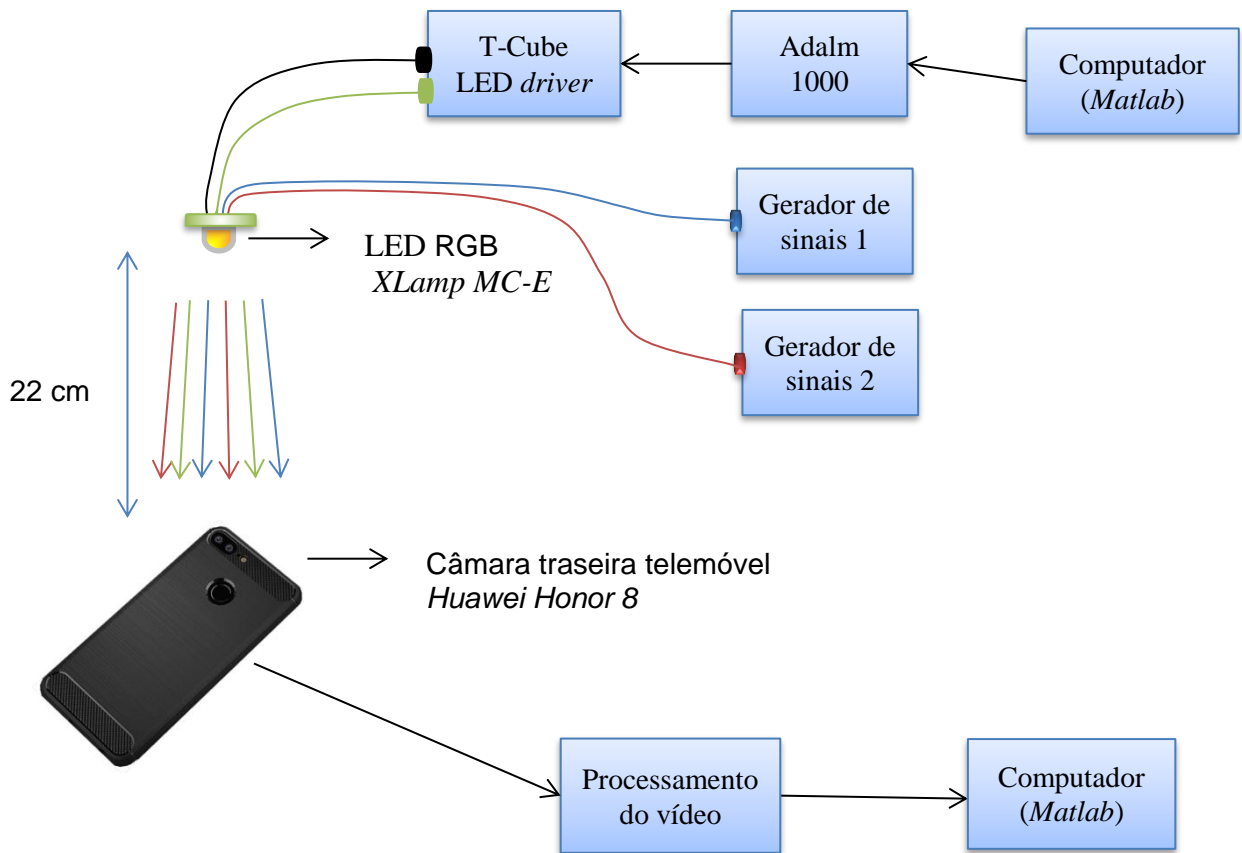


Figura 3.13 - Esquema do circuito utilizado para a situação em que se recorre à câmara traseira do *smartphone* como recetor e a um LED RGB como emissor.

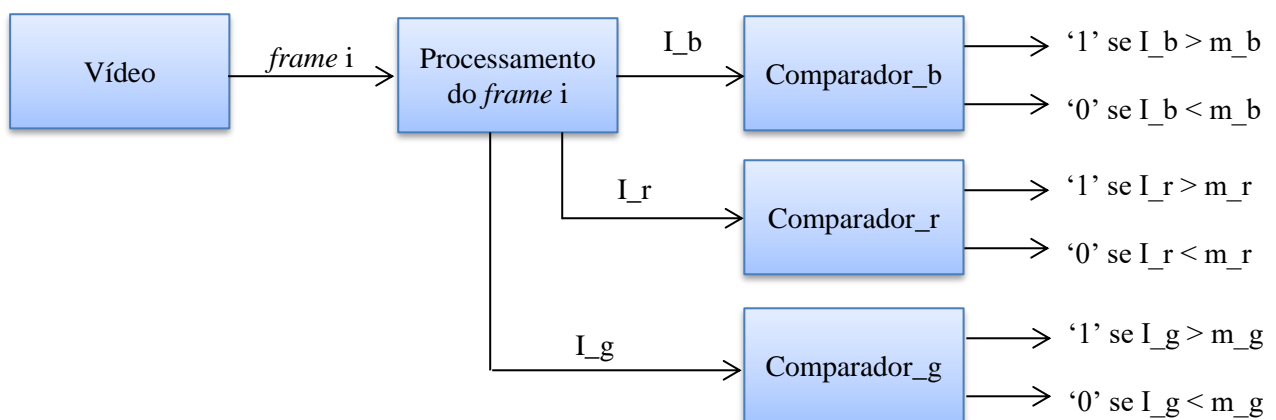


Figura 3.14 - Esquema do processo de desmodulação utilizado, quando recorremos a um LED RGB como emissor.

Analisando de forma independente os sinais com cores azul, verde e vermelho, conclui-se que existe uma componente de cada uma das cores RGB sempre presente. Assim torna-se possível obter a intensidade total de cor em cada LED analisado, separando cada uma das 3 cores. As componentes RGB presentes podem ser descritas pelas seguintes equações:

$$S_B = b_1\hat{B} + r_1\hat{R} + g_1\hat{G} \quad (13)$$

$$S_R = b_2\hat{B} + r_2\hat{R} + g_2\hat{G} \quad (134)$$

$$S_G = b_3\hat{B} + r_3\hat{R} + g_3\hat{G} \quad (15)$$

Recorrendo às equações 13, 14 e 15, torna-se possível construir um modelo matricial que permite analisar a componente RGB que se encontra presente em cada um dos LEDs estudados. Nestas equações,  $b_x$ ,  $r_x$  e  $g_x$  correspondem respetivamente a percentagem de cor azul, vermelha e verde presentes em cada um dos LEDs analisados individualmente. Os parâmetros  $\hat{B}$ ,  $\hat{R}$  e  $\hat{G}$  consistem na intensidade presente em cada uma das cores quando analisamos um sistema a transmitir as três cores RGB em simultâneo. Desta forma, para caracterizar um sistema que utiliza as cores RGB para transmissão podemos recorrer a matriz  $S$ , que se encontra apresentada na equação 16.

$$S = \begin{bmatrix} b_1 & r_1 & g_1 \\ b_2 & r_2 & g_2 \\ b_3 & r_3 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{B} \\ \hat{R} \\ \hat{G} \end{bmatrix} \quad (1614)$$

De forma a obter as diferentes componentes que compõem o sinal RGB enviado, é necessário calcular os parâmetros que permitem preencher a matriz apresentada na equação 16. Para isso, recorreu-se a um meio onde a interferência de luz externa fosse mínima, utilizando um meio escuro onde foram colocados os LEDs e o recetor. De seguida, atribui-se uma determinada tensão a cada um dos LEDs que correspondente ao mesmo valor de intensidade nas três cores presentes. Ao valor lógico '1' corresponde o valor de tensão  $V_1$  e ao valor lógico '0' atribui-se o valor de tensão  $V_0 = 0$  V. Uma vez que neste caso em particular o recetor corresponde a uma câmara de um telemóvel, a intensidade medida corresponde à média da intensidade de cor presente nos pixels de cada *frame*. Através do *Matlab* é possível, recorrendo a análise dos diversos *frames* que compõem o sinal recebido, analisar a intensidade de cada uma das cores e desta forma perceber a que percentagem corresponde no sinal que é captado. Para que esta análise, torna-se necessário realizar o teste para cada um dos LEDs RGB separadamente, de forma a poder preencher cada uma das linhas da matriz. Os sinais azul e vermelho são emitidos recorrendo a dois geradores de sinais, enquanto que o sinal verde é gerado pelo *Matlab*. De forma a evitar a saturação da câmara do telemóvel, o valor de intensidade definido para os três LEDs foi de 6.3 mW a uma distância de 22 cm. O esquema utilizado apresenta-se na Figura 3.15.

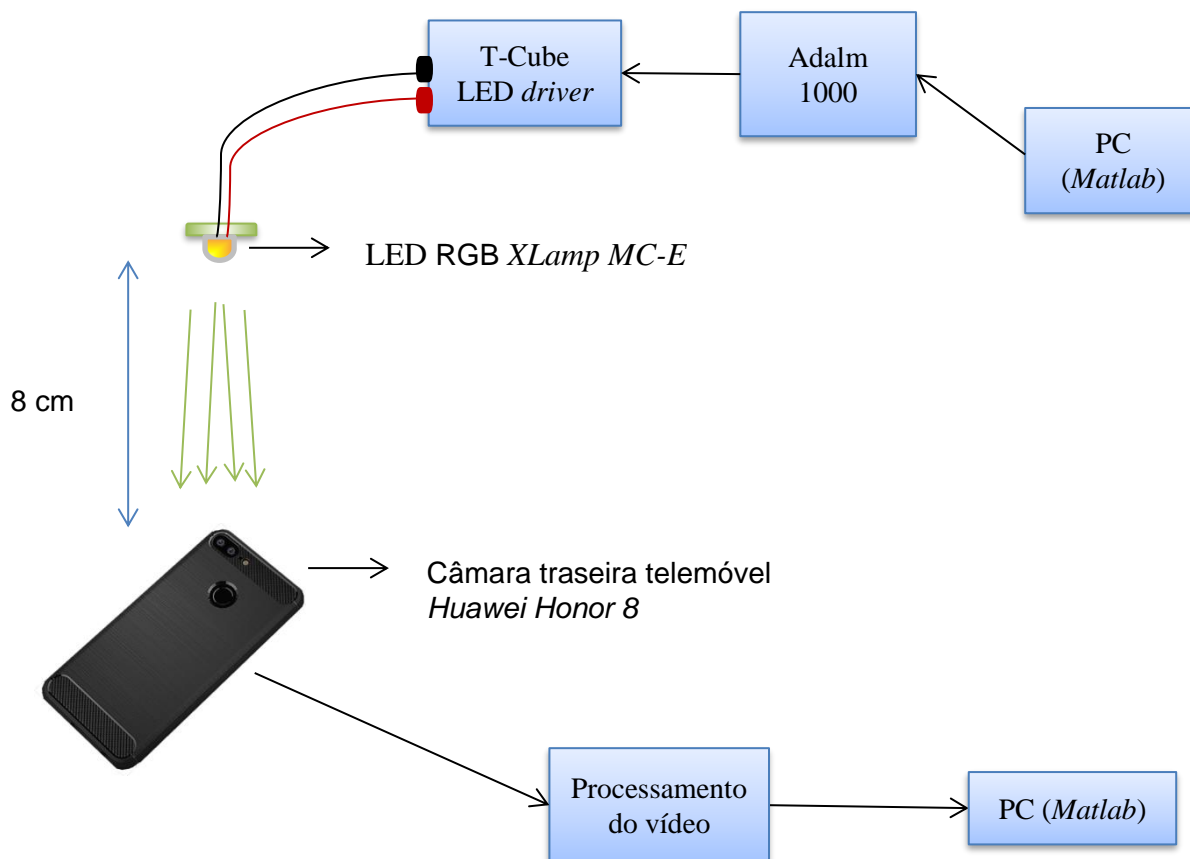


Figura 3.15 - Esquema do circuito utilizado para a situação em que se recorre à câmara traseira do *smartphone* como recetor, num meio escuro para determinar a Matriz RGB.

O esquema apresentado na Figura 3.15 foi utilizado para as três cores individualmente, sendo desta forma possível calcular os diferentes parâmetros da matriz de intensidade apresentada na equação 16. As tensões aplicadas a cada um dos LEDs encontram-se apresentadas na Tabela 3.5.

LED	$V_0$	$V_1$	Frequência
<b>Azul</b>	0 V	5.3 V	2 Hz
<b>Verde</b>	0 V	0.06 V	0.5 Hz
<b>Vermelho</b>	0 V	5.1 V	1.2 Hz

Tabela 3.5 - Tensões aplicadas a cada um dos LEDs para obter os parâmetros da Matriz S

Na tabela 3.5, verifica-se que a tensão aplicada ao LED verde é muito inferior à dos LEDs azul e vermelho. Este fenómeno pode explicar-se pelo facto de no caso do LED verde nos encontrarmos a utilizar o LED driver, que amplifica o sinal, fazendo com que a intensidade apresentada para esta tensão seja equivalente aos restantes LEDs. Para as tensões aplicadas em cada um dos casos apresentados na Tabela, foi possível obter um gráfico que descreve a intensidade de cada uma das cores ao longo do tempo no recetor. Estes apresentam-se na Figura 3.16.

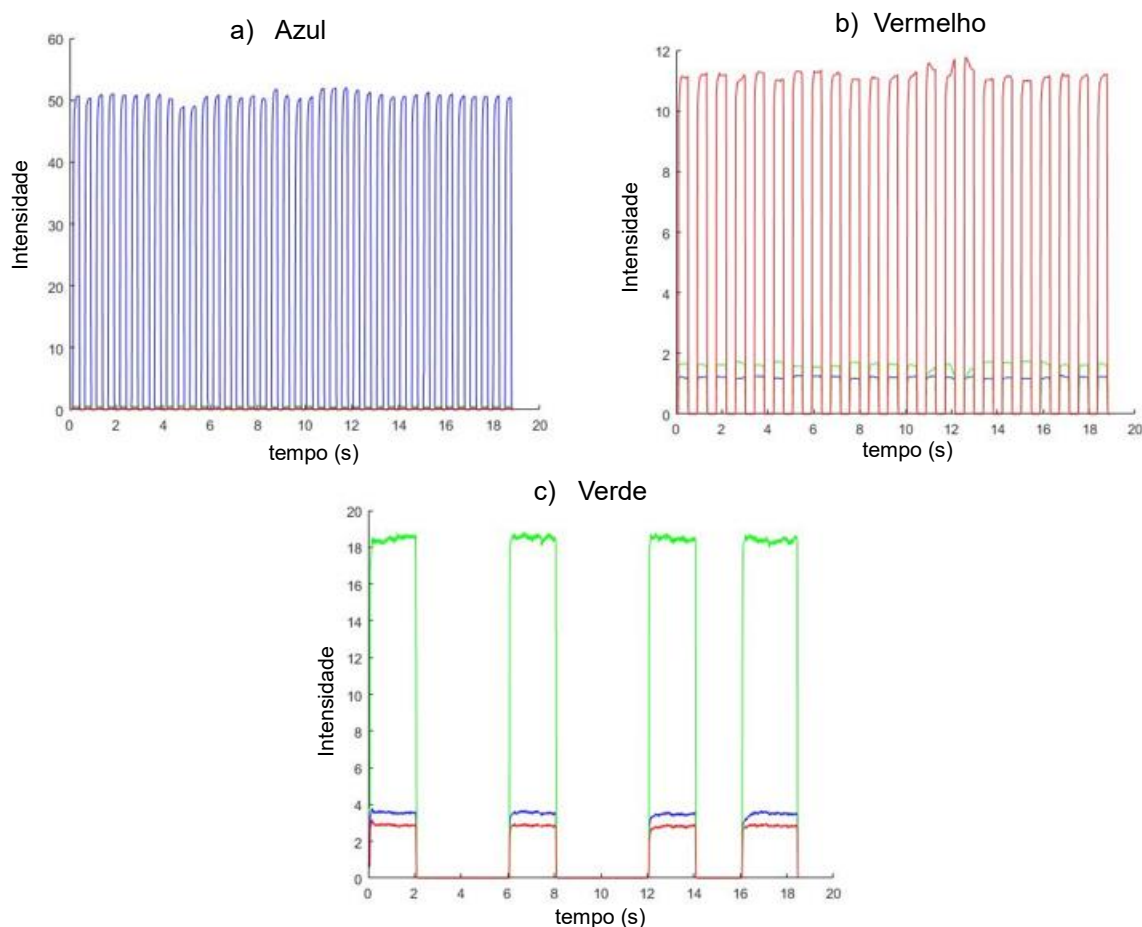


Figura 3.16 - Intensidade média recebida de cada uma das cores ao longo do tempo. a) Azul, b) Vermelho e c) Verde.

Na Figura 3.16, é possível analisar a intensidade de cor presente em cada *frame*, quando nos encontramos na presença de um LED azul, vermelho e verde respetivamente. Uma vez que apenas se torna relevante a situação em que a tensão aplicada é máxima, optou-se por interpretar o instante de tempo entre os 6 e os 8 segundos. Neste caso, é possível perceber que numa escala de 0 até 255, obtiveram-se os valores apresentados na tabela 3.6. Analisando o espectro de potência normalizado presente na Figura 2.3, é possível confirmar a existência de uma componente RGB em cada uma das três situações analisadas, que embora em dimensão reduzida, são visíveis nos gráficos.

LED	$b_x$	$r_x$	$g_x$
<b>Azul</b>	50.7	0.4	0.6
<b>Vermelho</b>	1.2	11.2	1.6
<b>Verde</b>	3.5	3	18.5

Tabela 3.6 - Valores de intensidade obtidos para as três cores: Azul, Vermelho e Verde.

Através dos valores da tabela 3.6, de modo a obter a fração de cor presente em cada um dos casos, normaliza-se os valores, dividindo o respetivo parâmetro pela intensidade total presente na cor do LED analisado. Assim obtém-se os valores apresentados na tabela 3.7Tabela , que correspondem às



entradas da matriz S (equação 17). Esta permite através da recepção de um sinal RGB, analisar a intensidade presente em cada uma das cores e desta forma perceber o sinal que foi recebido.

LED	$b_x$	$r_x$	$g_x$
<b>Azul</b>	0.98	0.01	0.01
<b>Vermelho</b>	0.09	0.82	0.09
<b>Verde</b>	0.14	0.12	0.74

Tabela 3.7 - Valores de intensidade normalizados, obtidos para as três cores: Azul, Vermelho e Verde.

$$S = \begin{bmatrix} 0.98 & 0.01 & 0.01 \\ 0.09 & 0.82 & 0.09 \\ 0.14 & 0.12 & 0.74 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{B} \\ \hat{R} \\ \hat{G} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Analisando a matriz S obtida, verifica-se a existência de uma percentagem significativamente superior no que toca à diagonal da matriz, sendo correspondentes às cores RGB visíveis. Embora em menor número, é possível perceber que existem também componentes correspondentes às duas cores restantes, podendo assim ser analisadas separadamente.

## 4. Resultados experimentais

### 4.1. Resultados com *Smartphone*

Recorrendo a aplicação “Luxímetro” (desenvolvida pela *Crunchy ByteBox*, encontrando-se disponível para dispositivos *Android* na *Google Play* [47]) e utilizando a câmara frontal como recetor, procedeu-se a realização da primeira experiência. Esta consiste no envio de um sinal simplificado, com uma frequência de amostragem que corresponde ao número máximo de amostras que o *Adalm1000* consegue transmitir a cada segundo, sendo esse valor de 100 kHz. Este sinal é gerado recorrendo ao *Matlab*, com uma tensão máxima de 3 V e mínima de 2.8 V, que corresponde ao nível lógico ‘1’ e ao nível lógico ‘0’ respetivamente. O sinal que é enviado diretamente para o *Adalm1000* apresenta-se na Figura 4.1, correspondendo à sequência de 9 bits 100100101. Cada bit tem uma duração  $T_b = 2$  s, sendo que para cada segundo são geradas 100k amostras.

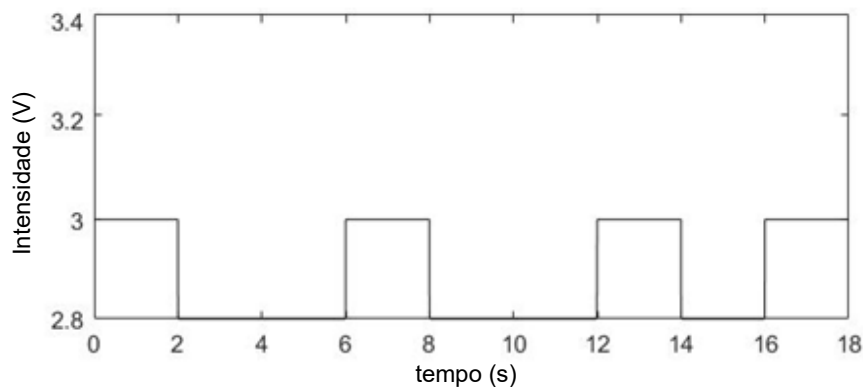


Figura 4.1 - Sinal enviado para o emissor através do *Adalm1000*.

Devido à limitação imposta pela câmara do telemóvel, a captação da aplicação encontra-se restringida a 10 amostras por segundo. Para este caso, decidiu-se por ajustar a captação para 3 amostras por segundo, uma vez que acima deste valor a aplicação apresentou algumas falhas. Para uma distância  $d = 22$  cm, foi possível obter uma taxa de amostragem constante no recetor, facilitando desta forma a desmodulação. As amostras recebidas ao longo do tempo apresentam-se na Figura 4.2. Recorrendo ao método apresentado na secção 3.4, numa primeira análise optou-se por normalizar as amostras recebidas, simplificando a sua interpretação. Estas apresentam-se na Figura 4.3, onde embora se encontrem em número reduzido é possível perceber a forma do sinal enviado. Analisando os sinais da Figura 4.2 e Figura 4.3, verifica-se que existem alguns símbolos ligeiramente sobrepostos. Este fenómeno ocorre devido à aplicação utilizada que em alguns casos não efetua uma captação e correspondente leitura em intervalos de tempo constantes. Neste caso apenas se verifica uma ligeira alteração nos intervalos, não ocorrendo qualquer erro durante a transmissão, uma vez que se utilizou uma taxa de amostragem reduzida. Assim torna-se possível descodificar o sinal recebido que se apresenta na Figura 4.4, sendo correspondente ao sinal transmitido pelo LED.

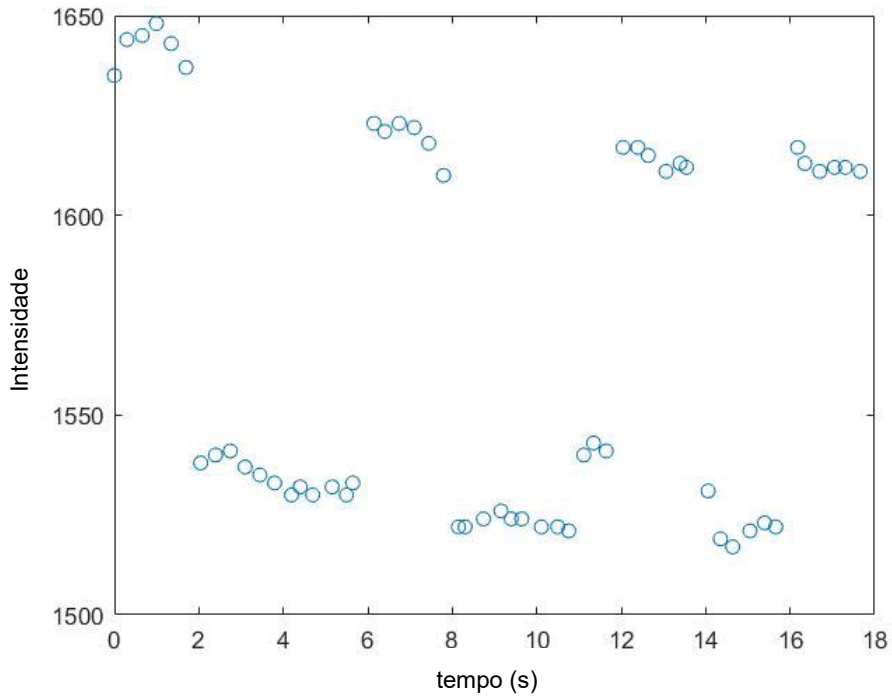


Figura 4.2 - Amostras captadas através da câmara frontal do smartphone e aplicação "Luxímetro".

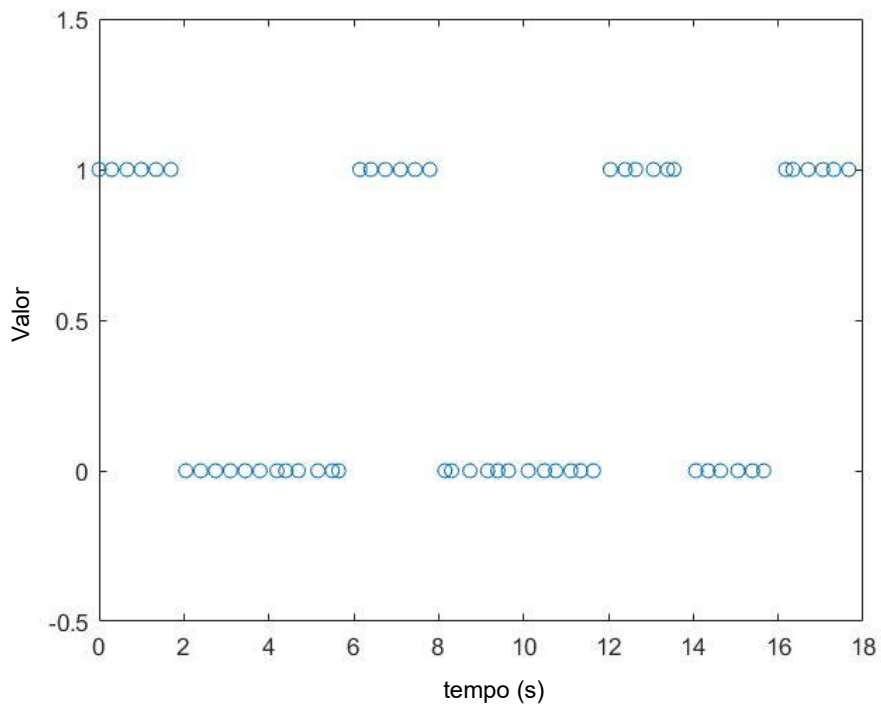


Figura 4.3 - Amostras normalizadas após análise e comparação de intensidades.

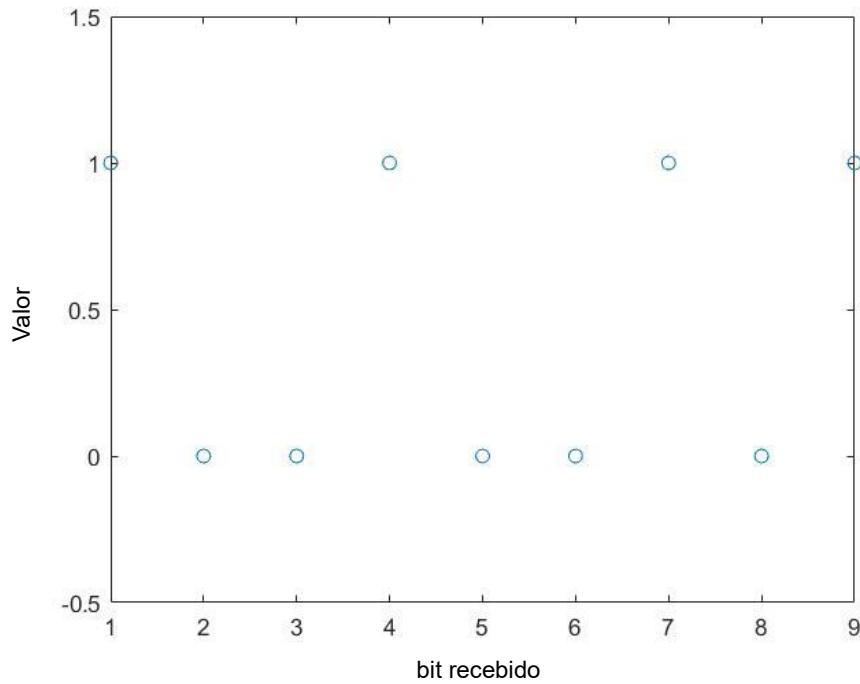


Figura 4.4 – Mensagem binária recebida após desmodulação.

Analisando o resultado obtido na Figura 4.4, verifica-se que o número de amostras é reduzido, sendo apenas possível de utilizar em situações muito simplificadas em que são apenas necessários poucos bits. Por outro lado, esta limitação acontece devido aos recursos que se encontravam disponíveis para a realização deste teste, uma vez que tanto a aplicação utilizada para medir as intensidades, como a câmara do *smartphone*, limitam de forma significativa o ritmo de transmissão máximo.

## 4.2. Resultados com Fotodíodo

A câmara utilizada durante os testes da aplicação apresenta algumas limitações, desta forma com o objetivo de aumentar o ritmo de transmissão e analisar diferentes situações associadas a uma transmissão *Li-Fi*, recorre-se a um Fotodíodo (*ThorLabs PbS PDA30G* [48]). Para as simulações apresentadas nesta secção, recorre-se ao LED branco, uma vez que é o tipo de iluminação mais utilizada habitualmente. Analisando a curva da resposta do LED correspondente apresentado na secção 3.3, torna-se possível perceber que para uma gama de tensão aplicada de 3-4 V existe um bom funcionamento por parte do emissor. Para estas tensões, de modo a calcular a potência recebida a uma distância de 21 cm, recorreu-se a um foto detetor (IF-PM200 [44]), que possui uma área de receção de 1 cm<sup>2</sup>. Desta forma, analisando a potência recebida, obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 4.1.

Parâmetro	Tensão Aplicada	Potência Recebida (1 cm <sup>2</sup> )
V <sub>1</sub>	4 V	2.76 mW
V <sub>0</sub>	3 V	2.18 mW

Tabela 4.1 - Potência recebida correspondente a tensão aplicada nos para os bits '0' e '1' para um recetor com 1 cm<sup>2</sup>.

Recorrendo aos dados presentes na Tabela , uma vez que o fotómetro apresenta uma área de receção de 1 cm<sup>2</sup>, torna-se possível estimar a potência que é aplicada ao fotodíodo utilizado. A área do recetor neste caso é de 9 mm<sup>2</sup>, que calculando o valor correspondente a esta dimensão permite-nos obter os resultados apresentados na tabela 4.2.

Parâmetro	Tensão Aplicada	Potência Recebida (9 mm <sup>2</sup> )
V <sub>1</sub>	4 V	0.2484 mW
V <sub>0</sub>	3 V	0.1962 mW

Tabela 4.2 - Potência recebida correspondente a tensão aplicada nos para os bits '0' e '1' para um recetor com 9 mm<sup>2</sup>.

Para os valores apresentados na tabela 4.2 é possível calcular a razão de distinção. Para que um sistema Li-Fi funcione corretamente co a sua dupla função, é importante que este parâmetro apresente um valor reduzido. Recorrendo a equação 12, sendo  $P_1 = 0.2484$  mW e  $P_0 = 0.1962$  mW, obtém-se assim  $ER = 1.025$ , sendo um valor aceitável para a razão de distinção, tendo em conta do o sistema utilizado.

De forma a avaliar o comportamento do sistema proposto, torna-se importante analisar a evolução dos erros na transmissão, à medida que o ritmo de transmissão aumenta. Para esta situação, para o esquema apresentado na Figura 3.11, fixou-se a distância em 21 cm, fazendo variar o ritmo de transmissão que era enviado pelo emissor. Aumentando gradualmente o ritmo de transmissão, obteve-se o gráfico apresentado na Figura 4.5.

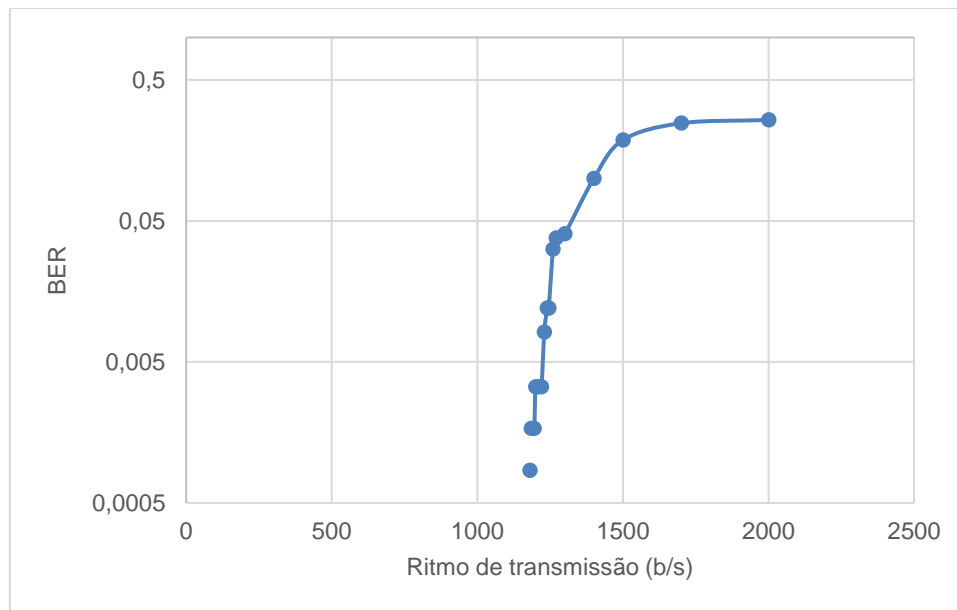


Figura 4.5 - Evolução do BER em função do aumento do ritmo de transmissão, para uma distância de 21 cm.

Na Figura 4.5, verifica-se que até 1175 bit/s é possível efetuar uma transmissão com um BER inferior a  $1/1175$ . Após este valor, à medida que o ritmo de transmissão aumenta, o BER associado cresce também, estando dentro de valores considerados aceitáveis ( $< 10^{-3}$ ) até 1185 bit/s. Para valores superiores, a taxa de erros cresce de forma significativa torna-se demasiado elevada para a distância analisada de 21 cm.

Na situação anterior optou-se por fixar o fotodíodo, desta forma seria importante também analisar a variação da taxa de erros com a distância e assim perceber como é que a potência recebida influencia na qualidade do sinal recebido. No que toca ao ritmo de transmissão optou-se por fixar nos 2 kbit/s, uma vez que na análise anterior os valores considerados aceitáveis se aproximavam deste limite. No estudo realizado verificou-se que para uma distância inferior a 6 cm, o fotodíodo apresenta alguma saturação, pelo que se optou pela análise apenas para valores entre os 6 e os 21 cm. Variando a distância do fotodíodo entre estes valores, em intervalos de 1 cm foi possível obter o gráfico apresentado na Figura 4.6, que mostra a variação do BER com a potência recebida.

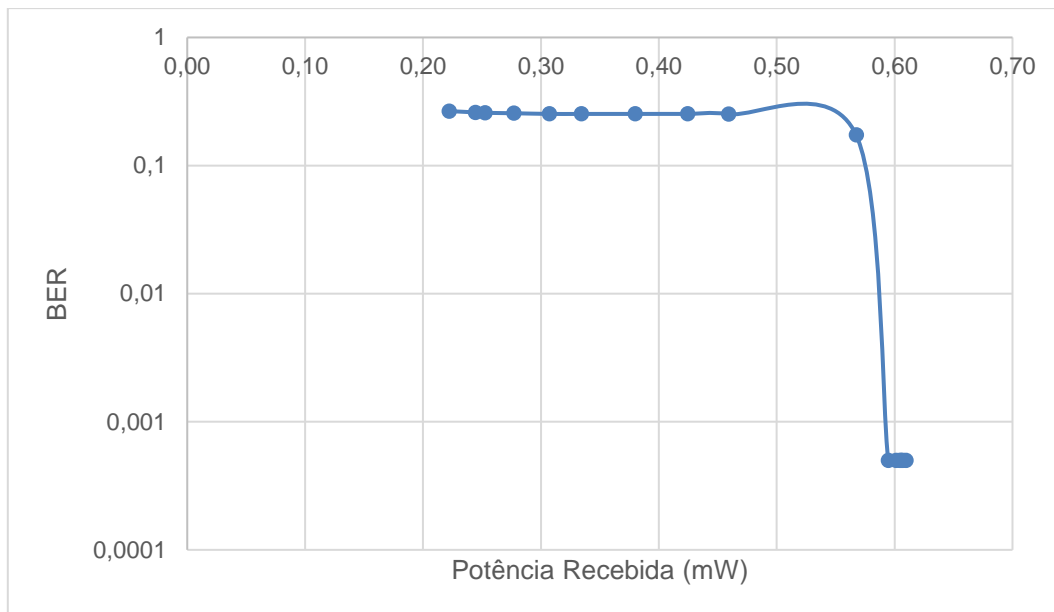


Figura 4.6 - Evolução do BER com o aumento da potência recebida no recetor.

Como esperado, Figura 4.6 verifica-se que à medida que a distância aumenta, o valor potência recebida no fotodíodo diminui, fazendo com que acima dos 11 cm tenhamos um aumento significativo do BER. A partir desta distância, o número de bits errados torna-se demasiado elevado, fazendo com que o BER seja superior ao valor considerado aceitável para uma transmissão ( $10^{-3}$ ).

Uma vez que para uma distância de 6 cm o fotodíodo deixa de saturar, optou-se por dar uma margem de 1 cm e escolher a distância de 7 cm de modo a analisar o maior ritmo de transmissão que seria possível alcançar com o fotodíodo utilizado. Tendo em conta que nos resultados apresentados na Figura 4.6, optou-se neste caso por iniciar o teste nos 2 kbit/s, uma vez que para a distância o BER apresenta um valor inferior a 0.0005. Desta forma, aumentando de forma gradual o ritmo de transmissão, obteve-se o gráfico apresentado Figura 4.7.

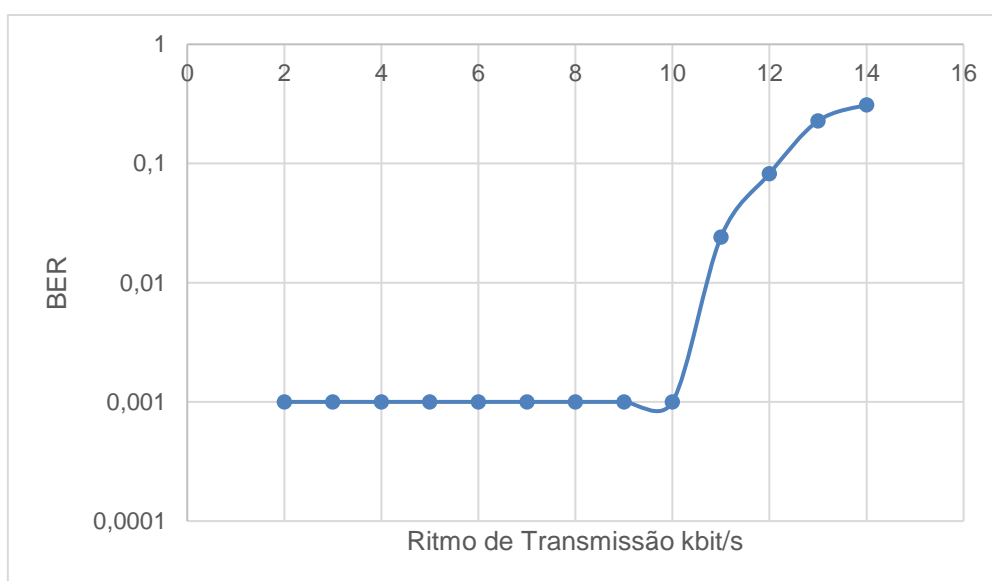


Figura 4.7 - Evolução do BER com o aumento do ritmo de transmissão, para uma distância fixa de 7 cm.

Analisando o resultado apresentado Figura 4.7, torna-se possível notar que até 10 kbit/s, o BER apresenta um valor abaixo de 0.0001. Tendo em conta que o *Adalm1000* apresenta uma taxa de amostragem de 100 kHz, este valor é considerado bastante satisfatório, já que nos encontramos a efetuar uma modulação em intensidade. A partir dos 10 kbit/s, o número de erros aumenta de forma exponencial, tornando inviável a sua utilização para uma transmissão bem-sucedida.

De forma a avaliar a qualidade do sinal que é recebido a 10 kbit/s, obteve-se o diagrama de olho correspondente à transmissão apresentada na Figura 4.7. Este define-se como a superposição sincronizada de todas as realizações possíveis do sinal de interesse, visto dentro de um determinado intervalo de sinalização [49]. Recorrendo à função *eyediagram(x,n)*, disponibilizada pelo *Matlab*, torna-se possível obter o diagrama de olho correspondente, encontrando-se apresentado na Figura 4.8. Na função o *x* corresponde ao sinal recebido, enquanto que *n* é o número de amostras em cada traço. Este valor foi ajustado de forma a que o sinal fosse facilmente visualizável na forma apresentado, utilizando-se um valor de *n* = 400.

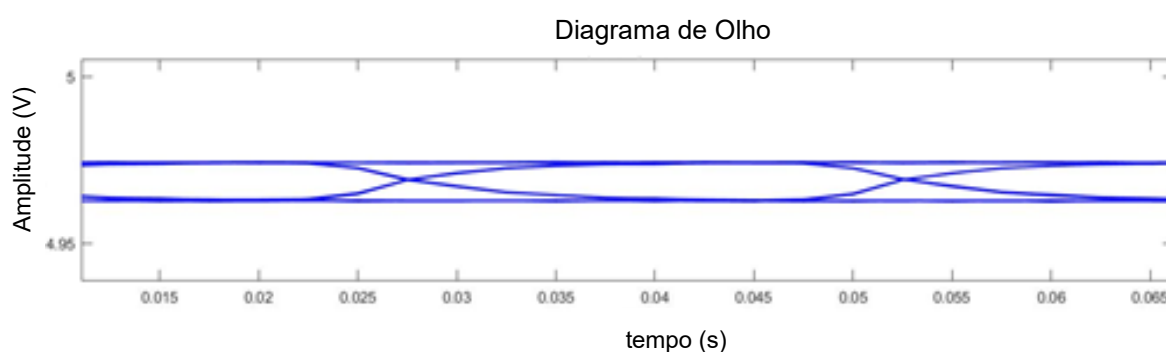


Figura 4.8 - Diagrama de olho correspondente à transmissão a 10 kbit/s, a uma distância de 7 cm, com *n* = 400.

Avaliando o diagrama de olho apresentado na Figura 4.8, verifica-se que apresenta uma largura de aproximadamente 0.025 s. Este valor corresponde ao intervalo de tempo para o qual o sinal recebido pode ser amostrado sem erros causados por interferência intersimbólica. A margem de ruído do sistema pode também ser analisada através da Figura 4.8, correspondendo à altura da abertura do olho, num determinado tempo de amostragem. Esta define-se como a altura que vai desde o centro do olho até à parte superior. Neste caso, a cerca de 0.04 s temos uma altura aproximada de 0.00625 V, que corresponde à margem de ruído do sistema. Por fim, analisando a forma do diagrama de olho, o sinal aparenta não apresentar distorção, verificando-se assim a boa qualidade do sinal recebido.



### 4.3. Resultado utilizando um LED RGB como emissor

De forma a poder aumentar o número de bits que são transmitidos, optou-se pela utilização de um sistema RGB. Desta forma recorrendo a três cores, torna-se possível triplicar o número de amostras que é transmitido. A primeira experiência consiste no envio do mesmo sinal que foi utilizado no teste da aplicação “Luxímetro”, mas neste caso em conjunto com outros dois sinais gerados por dois geradores independentes. O sinal transferido pela luz verde é gerado pelo Adalm1000, que possui uma frequência de amostragem de 100 kHz. De forma a poder analisar a sua influência e distinguir melhor os sinais que são enviados nesta experiência, optou-se por utilizar frequências de trabalho diferentes para os três LEDs. As tensões aplicadas variam consoante o LED utilizado, uma vez que a partir de um certo nível de intensidade, a câmara do telemóvel satura. Desta forma, para um ambiente onde se minimizou a interferência de luz externa (ambiente escuro), ajustou-se as tensões dos três LEDs utilizados, de modo a obter uma intensidade máxima de 7.2 mW. O nível mínimo de tensão aplicado corresponde a uma intensidade de 5.9 mW. Os dados utilizados para este caso apresentam-se na tabela 4.3. De notar que existe uma diferença significativa entre a tensão que é aplicada aos LEDs vermelho e azul quando comparada à aplicada ao LED verde. Esta diferença resulta do facto de no caso do LED verde estar ligado ao modulador, que recebe este valor de tensão, amplificando de modo a que o LED de cor verde apresente uma intensidade semelhante aos restantes.

LED	$V_0$	$V_1$	Frequência
<b>Azul</b>	0.78 V	0.86 V	2 Hz
<b>Vermelho</b>	0.78 V	0.86 V	1.2 Hz
<b>Verde</b>	0.06 V	0.08 V	0.5 Hz

Tabela 4.3 - Valores de tensão colocados à entrada. No caso dos LEDs vermelho e azul à entrada dos respetivos LEDs e no caso do verde à entrada do modulador.

De forma a perceber a influência que a luz externa teria na experiência, foram realizados dois testes. O primeiro teste consistiu na utilização de um ambiente escuro. Desta forma minimizaram-se as reflexões e a interferência que poderia surgir das diversas fontes de luz existentes no meio utilizado. O segundo teste consistiu em efetuar a transmissão normalmente, com as interferências normais de luz que se encontravam presentes na sala. Em ambas as situações foram utilizados os dados apresentados anteriormente na tabela 4.3. Recorrendo ao esquema da Figura 3.13 apresentado na secção 3.6, para a primeira situação em que foi utilizado um ambiente escuro, o sinal recebido é apresentado na Figura 4.9.

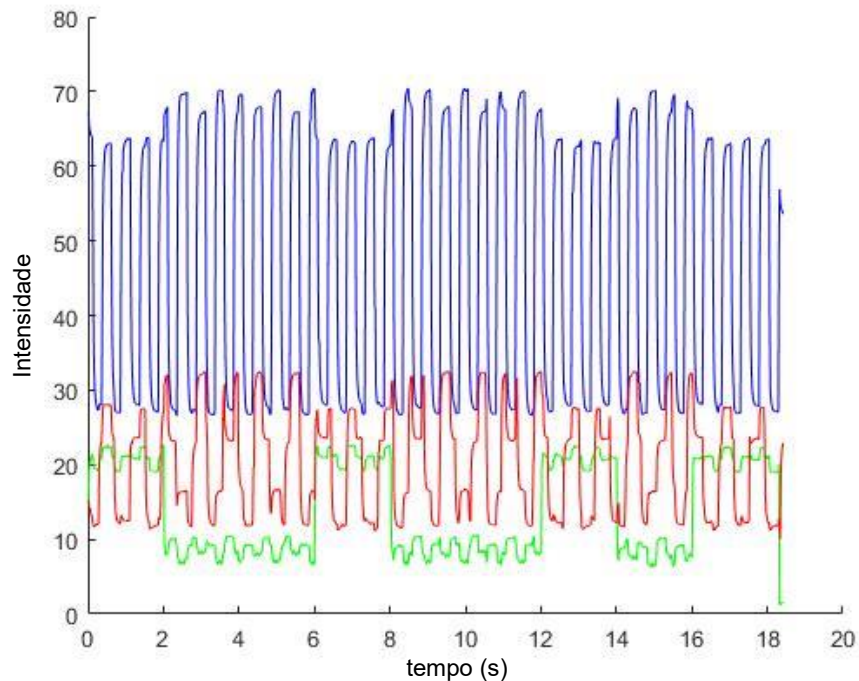


Figura 4.9 - Sinal recebido pelos três LEDs RGB em simultâneo quando recorremos a um ambiente escuro para eliminar a interferência da luz exterior.

Analisando a Figura 4.9, tal como esperado, existe uma influência visível entre as três cores. Uma vez que os três sinais são enviados com frequências diferentes, torna-se possível distinguir facilmente os três sinais recebidos. No sinal azul recebido existe uma oscilação visível na intensidade. Este fator deve-se à frequência da corrente elétrica, que faz com que a intensidade do sinal que é colocado à saída do gerador não seja constante. Nos restantes sinais recebidos este fator não é tão visível. Através de uma análise individual, recorrendo aos métodos apresentados na secção 3.6, torna-se possível decodificar cada um dos sinais das três cores recebidas. Os sinais desmodulados correspondentes à cor vermelha, azul e verde apresentam-se na Figura 4.10. Uma vez que neste caso se recorre a uma caixa para eliminar a luz envolvente, os níveis de intensidade recebidos correspondem quase na totalidade apenas à luz enviada.

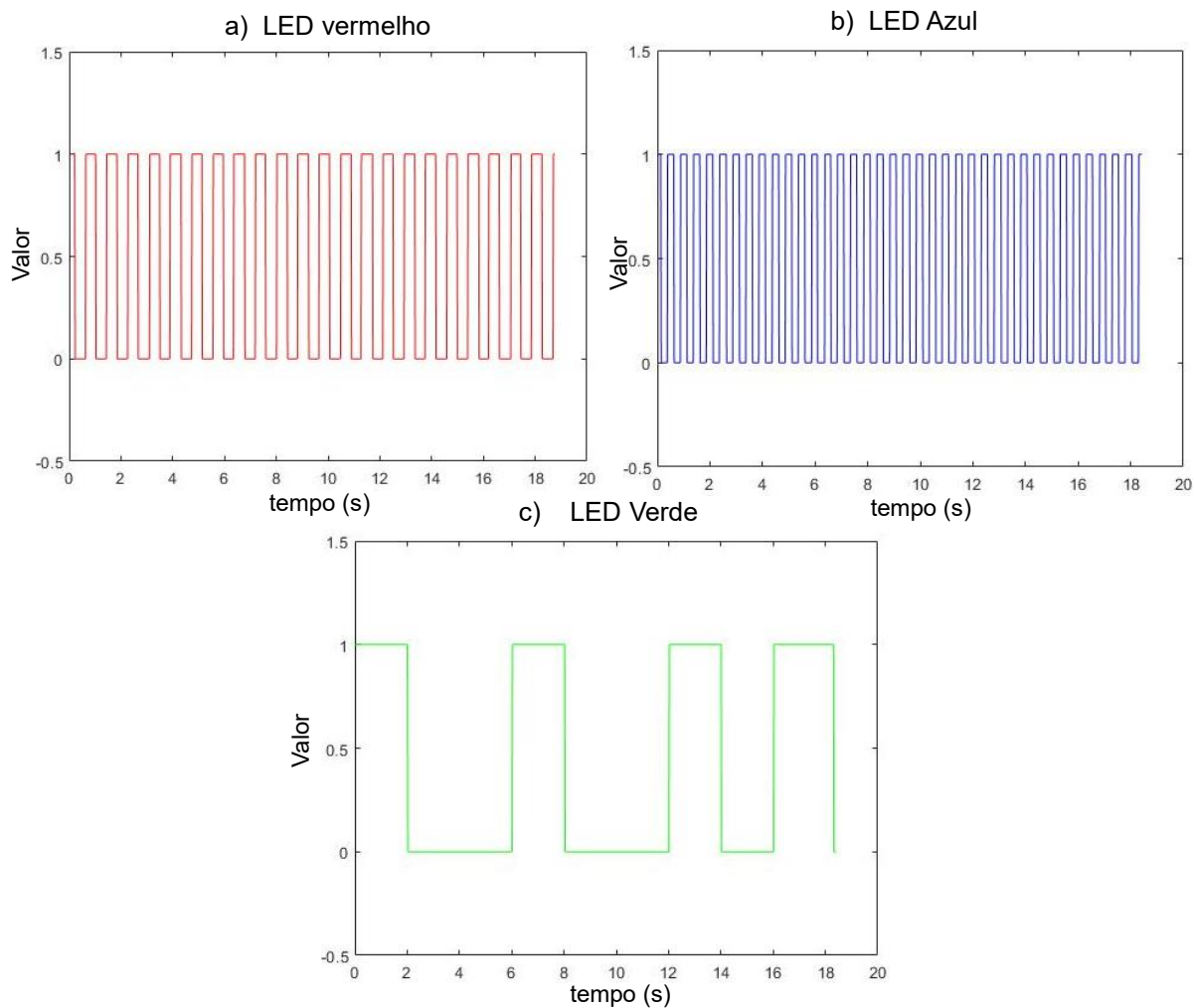


Figura 4.10 - Sinais desmodulados na ausência de luz exterior, correspondentes aos sinais recebidos pelas cores: a) Vermelho, b) Azul e c) Verde.

De modo a comparar com a situação apresentada na Figura 4.9 e perceber de que forma a luz do meio em que estamos a testar iria influenciar nos resultados, procedeu-se a realização de um teste sem recorrer ao ambiente escuro, havendo assim interferência da luz exterior. Neste caso o meio utilizado corresponde à sala com luz natural, não existindo luz artificial ligada próximo do sistema em questão. Para esta situação utilizaram-se os mesmos valores presentes na Tabela . O sinal recebido é apresentado na Figura 4.11.

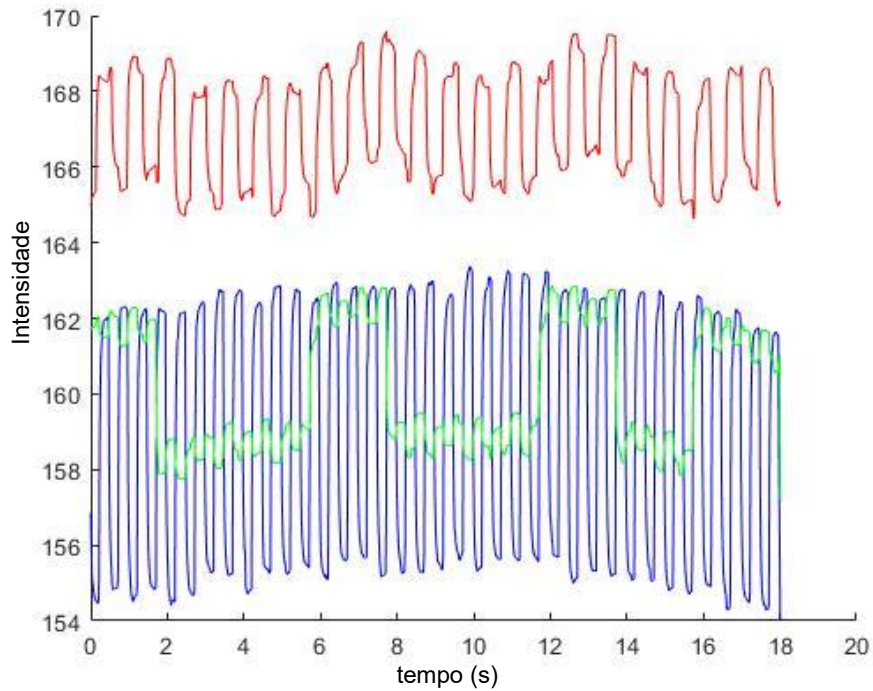


Figura 4.11 - Sinal recebido pelos três LEDs RGB em simultâneo quando recorremos a um ambiente com interferência da luz ambiente.

Na Figura 4.11, é possível perceber que o sinal recebido apresenta níveis de intensidade muito superiores aos apresentados na primeira situação. Este facto deve-se ao acréscimo da presença da luz exterior, que faz com que os níveis de intensidade recebida sejam superiores. Apesar desta diferença, é perfeitamente possível analisar e perceber que sinais estamos a receber em cada uma das cores utilizadas, tornando desta forma possível desmodular o sinal recebido. Neste exemplo, a oscilação causada pela corrente elétrica é bem visível nas cores vermelha e azul. Aplicando os métodos apresentados na secção 3.6, procedeu-se a desmodulação do sinal recebido. Os sinais descodificados correspondentes a cor vermelha, azul e verde apresentam-se na Figura 4.12.

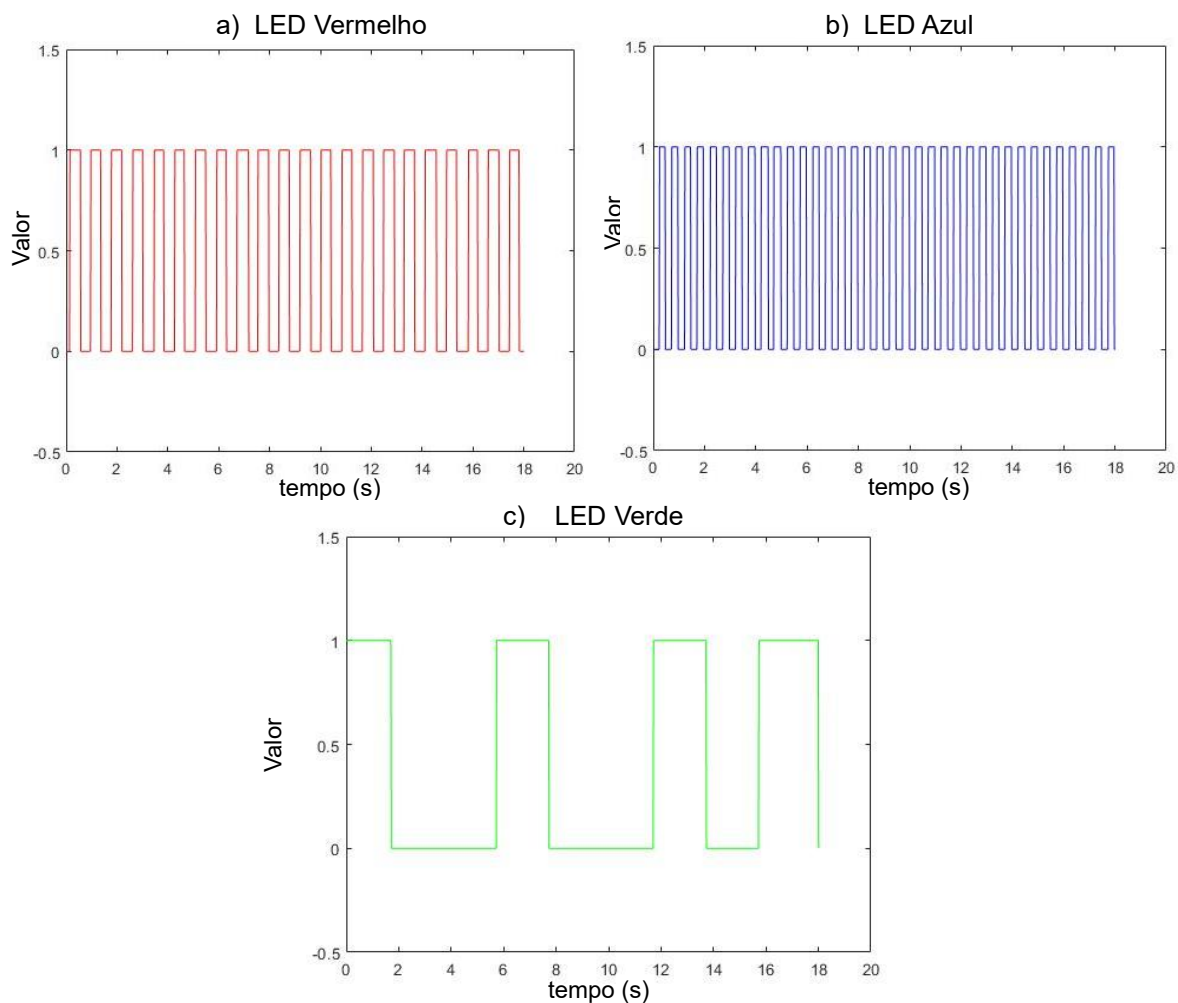


Figura 4.12 - Sinais desmodulados na presença de luz exterior, correspondentes aos sinais recebidos pelas cores: a) Vermelho, b) Azul e c) Verde.

Analisando a Figura 4.12, verifica-se que tal como na situação anterior, o sinal enviado é totalmente recebido. Embora exista presença da luz exterior, uma vez que apenas estamos a considerar que esta é constante, só se torna visível uma variação na intensidade de cores recebida. Assim, a forma do sinal recebido não sofre qualquer alteração, tornando possível desmodular o sinal que é recebido e obter o sinal que foi transmitido na totalidade.

De modo a analisar a matriz apresentada na equação 16, realizaram-se algumas simulações de sinais emitidos, recorrendo ao *Matlab*. Esta matriz permite perceber qual seria o comportamento que o sinal recebido apresentaria, tendo em conta os componentes que apresentam as três cores utilizadas. Tendo como objetivo comparar com o sinal recebido apresentado na Figura 4.9, simulou-se 3 sinais, correspondentes a cada uma das cores utilizadas, com as mesmas frequências apresentadas na Tabela 4.4. Uma vez que se trata de uma simulação e neste caso não existe o problema do recetor saturar, optou-se por aplicar a mesma tensão às três cores utilizadas. Os valores utilizados para esta simulação apresentam-se na tabela 4.4.

LED	$V_0$	$V_1$	Frequência
<b>Azul</b>	2.8 V	3 V	2 Hz
<b>Vermelho</b>	2.8 V	3 V	1.2 Hz
<b>Verde</b>	2.8 V	3 V	0.5 Hz

Tabela 4.4 – Valores de tensão e frequências atribuídos ao bit '0' e bit '1' para as cores Azul, Vermelho e Verde.

Utilizando os dados da tabela 4.4, e recorrendo a matriz apresentada na equação 16, torna-se possível simular o sinal recebido. Ao substituir os valores na matriz S, obtêm-se uma sequência de valores que permitem prever o sinal que seria recebido no caso de ser efetuada uma transmissão *Li-Fi*. A combinação das três cores recebidas é apresentada na Figura 4.13.

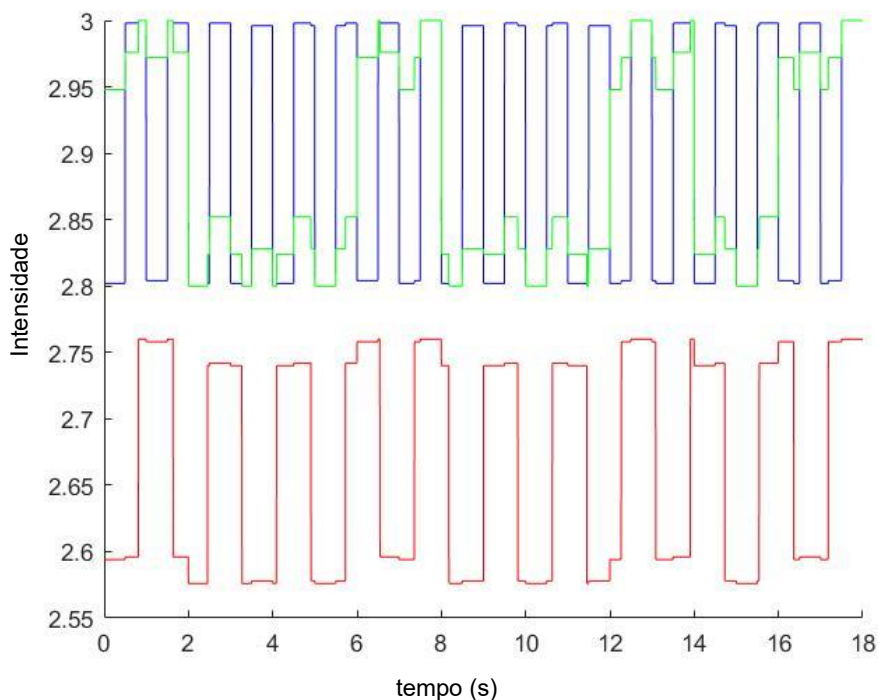


Figura 4.13 - Sinais obtidos recorrendo à simulação através da Matriz S.

Analisando a Figura 4.13, torna-se possível perceber a influência que as três cores têm entre si, havendo uma componente somada em cada uma delas. Comparando com o sinal apresentado na Figura 4.11, embora o sinal vermelho apresente uma intensidade menor, é possível perceber que os

três sinais recebidos correspondentes as diferentes cores utilizadas, apresentam a mesma forma. Isto indica que o modelo apresentado na equação 17 consegue prever a forma que o sinal irá apresentar após ser recebido no recetor. Este sinal após recorrer ao método de desmodulação apresentado na secção 3.6, apresenta exatamente a forma do sinal que é enviado inicialmente. Uma vez que neste caso encontramos-nos na presença de uma simulação no *Matlab*, a intensidade apresentada da cor vermelha é diferente do resultado experimental da Figura 4.11. Esta situação pode ser explicada devido a presença da luz ambiente, que influenciou os níveis de intensidade. No que toca aos sinais emitidos pelos LEDs verde e azul aparecem sobrepostos, tal como acontece na Figura 4.13. Este aumento não afeta a forma do sinal recebido em nenhuma das cores, possibilitando sempre a desmodulação e consequente recuperação integral do sinal enviado, como é possível visualizar na Figura 4.14 .

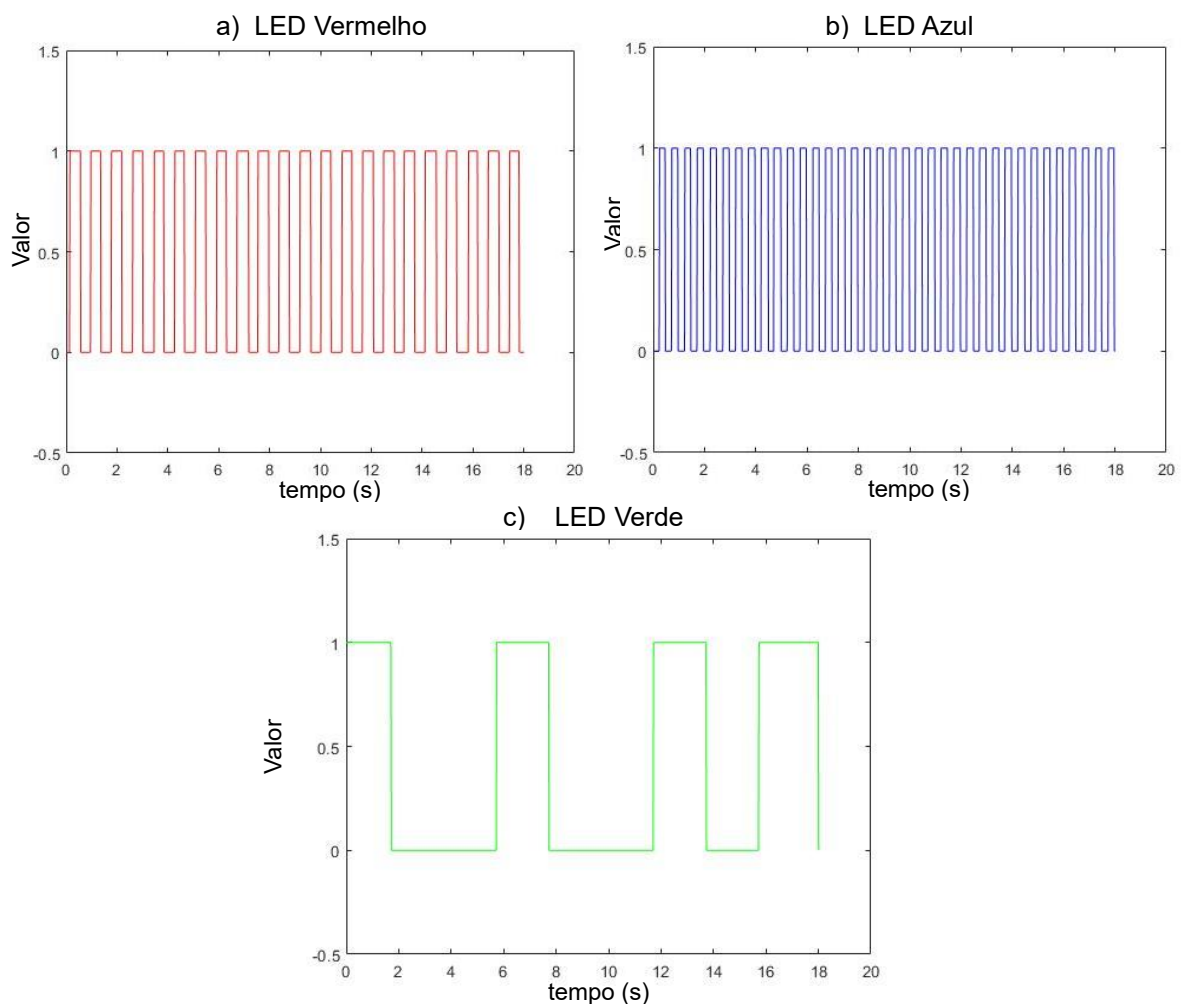


Figura 4.14 - Sinal desmodulado resultante da simulação recorrendo a matriz S.

# 5. Conclusões e Trabalho Futuro

## 5.1. Conclusões

Os sistemas VLC apresentam-se como uma alternativa às tecnologias que utilizamos atualmente para transmissão. Dos vários sistemas disponíveis nesta tecnologia analisou-se o Li-Fi, considerando-se ser uma tecnologia emergente e que irá ajudar a complementar os sistemas já existentes, como é o exemplo do Wi-Fi. Para o funcionamento do Li-Fi torna-se necessário a utilização de três sistemas: emissor, meio de transmissão e um recetor.

A primeira análise realizada teve como base uma experiência teórica. Esta permitiu-nos analisar qual seria o comportamento do sistema ao longo do meio de transmissão, não considerando as fontes de luz externas como interferências. Conclui-se que à medida que aumentamos a distância entre o emissor e o recetor a potência recebida decresce com  $e^{-\alpha L}$ . A área do fotodíodo é outro aspeto a ter em consideração no que toca a potência recebida, uma vez que quanto maior for a área do recetor maior será a potência recebida. Considerando o diagrama de radiação do LED emissor, conclui-se também que para à medida que o ângulo de emissão aumenta, a intensidade recebida diminui, sendo reduzida para metade para ângulos superiores a  $60^\circ$ .

O emissor tem um papel fundamental na qualidade da transmissão. A descrição do funcionamento do LED utilizado (XLamp MC-E LED [26]), permitiu-nos concluir que as diferentes cores apresentam comportamentos distintos quando se aplica uma determinada potência. Este facto torna-se importante, uma vez que a intensidade apresentada pelo emissor depende da tensão que lhe é aplicada, fazendo com que neste caso fosse possível ajustar individualmente cada um dos LEDs.

Uma das dificuldades encontradas na implementação do Li-Fi consiste na adaptação dos sistemas que são atualmente utilizados, uma vez que a grande parte não possui um sensor ótico que possibilite receber os sinais emitidos por um LED. Na primeiro sistema testado, recorrendo a uma câmara frontal de um telemóvel (*Huawei Honor 8* [50]) tornou-se possível analisar como seria a transmissão através deste recetor. Conclui-se que recorrendo a uma aplicação para determinar a intensidade de luz recebida, através de uma modulação em intensidade é possível efetuar uma transmissão de dados. A câmara utilizada, assim como a aplicação que analisa a intensidade impuseram algumas limitações à transmissão, restringindo o número de amostras recebidas a três por segundo. Embora este número seja reduzido, provou-se ser possível realizar uma transmissão com este sistema, sem erros a um ritmo de transmissão de 3 bit/s.

De forma a receber o sinal torna-se possível recorrer a um fotodíodo, que embora implique uma alteração nos sistemas atuais, permite ritmos de transmissão muito superiores. Neste sistema recorrendo a um fotodíodo com uma área de apenas  $9 \text{ mm}^2$ , concluiu-se que seria possível avaliar a transmissão para várias situações. Fixando a distância de transmissão em 21 cm, obteve-se um ritmo de transmissão de 1185 bit/s, valor limite para o qual a transmissão não apresentou erros. Variando a



potência recebida no fotodíodo, concluiu-se que é para poder obter uma taxa de erros menor do que  $10^{-3}$ , a potência recebida para esta situação teria de ser superior a 0,6 mW. Mostrou-se ainda ser possível a uma distância de 7 cm efetuar uma transmissão a um ritmo binário de 10 kbit/s. Uma vez que se utilizou uma modulação em intensidade, conclui-se que este valor é considerado aceitável, uma vez que o *Adalm1000* se encontra limitado a 100kHz.

O terceiro sistema testado consistiu na utilização de três cores em simultâneo para o envio de informação. Concluiu-se ser possível transmitir e desmodular a informação transmitida pelos três LEDs em simultâneo, recorrendo à câmara traseira do *smartphone* utilizado. Mostrou-se que, embora os sinais apresentassem frequências distintas, no recetor os sinais eram facilmente identificáveis, possibilitando a sua análise e desmodulação sem erros de transmissão. Para esta situação mostrou-se ainda ser possível obter um modelo matricial que prevê-se o sinal que recebido, através da análise das três cores e respetivas intensidades. Através de uma simulação o sinal obtido correspondeu na íntegra ao sinal que tinha sido enviado nos testes anteriores. Conclui-se que a utilização de três LEDs em simultâneo permitem transmitir com sucesso o triplo da informação, além de poderem ser utilizados simultaneamente como iluminação, uma vez que a soma das cores permite obter a cor branca. A câmara traseira do telemóvel mostrou-se ser uma alternativa válida a funcionar como recetor, embora com algumas limitações, como é caso dos *frames* captados por segundo e da saturação do sensor quando exposto a intensidades elevadas. Uma vez que foram realizados dois testes, recorrendo a uma caixa para eliminar a luz exterior, foi possível concluir que a luz natural presente na sala apenas influencia no aumento da intensidade de luz recebida em cada uma das cores, não afetando o sinal que é recebido.

Em conclusão, os três sistemas apresentados possibilitaram o funcionamento do sistema Li-Fi analisado, embora neste caso não se tenha considerado a influência da luz artificial e do efeito multicaminho. Nas situações em que se recorreu às câmaras existentes como recetores concluiu-se que embora com ritmos de transmissão reduzidos, a transmissão de dados é possível sem alterar os sistemas já existentes. O fotodíodo possibilitou um ritmo de transmissão muito superior, mas exige a instalação e adaptação nos sistemas que pretendam a sua utilização.

## 5.2. Trabalho futuro

Os sistemas analisados encontram-se ainda numa fase muito inicial, podendo ser melhorados em vários aspetos. Tratando-se de um sistema Li-Fi, o principal objetivo passa por reduzir a interferência causada por luzes presentes no ambiente utilizado, aumentar o ritmo de transmissão, de forma a que a ligação seja feita rapidamente e a realização de um sistema de comunicação bidirecional. As sugestões apresentadas focam-se principalmente nestes três aspetos. As sugestões apresentadas são as seguintes:

- Ter em consideração nos estudos futuros o efeito multicaminho existente durante a transmissão;

- Recorrer a filtros óticos de forma a reduzir a interferência causada pela luz presente no meio utilizado;
- Utilização de LEDs com potências de funcionamento e dimensões distintas, de forma a que seja possível testar um ambiente mais realista.
- Criação de uma aplicação que permita adquirir um número superior de valores de intensidade e de forma mais precisa.
- Utilização de *smartphones* com câmaras que permitam ultrapassar as limitações apresentadas neste trabalho, nomeadamente o número de *frames* possíveis de captar por segundo e o limite de saturação do sensor.
- Recorrer a um controlador que possibilite uma taxa de amostragem superior a do *Adalm1000*, que se encontra limitado a 100 kHz.
- Implementação do sistema com recurso ao fotodíodo utilizando esquemas de modulação mais eficientes, como é o caso da modulação OFDM que permite uma poupança significativa de largura de banda.
- Teste de uma ligação bidirecional que permita avançar para um sistema Li-Fi capaz de funcionar como uma alternativa ao Wi-Fi.
- Criação e teste de um sistema que utilize vários LEDs em simultâneo.

Todas as sugestões apresentadas nos tópicos anteriores iriam permitir aumentar a fiabilidade dos sistemas Li-Fi apresentados, melhorando a sua eficiência e aumentando assim o ritmo de transmissão, fator que é considerado essencial para a utilização em grande escala do sistema apresentado.

## 6. Referências

- [1] M.-A. K. Zabik Ghassemlooy, Luis Nero Alves, Stanislava Zvánovec, *Visible light communications Theory and Applications*. CRC Press - Taylor & Francis Group, 2017.
- [2] CISCO, “The Zettabyte Era: Trends and Analysis,” *Cisco*, no. May 2015, pp. 1–29, 2015.
- [3] L. U. Khan, “Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges,” *Digit. Commun. Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 78–88, 2017.
- [4] C. Ball and K. Tien, “Design and Development of a Visible Light Communications Link,” *Cooper Union Adv. Sci. Art*, pp. 1–8, 2012.
- [5] A. O. Vlc, “A power analysis model for outdoor long-distance visible light communication,” pp. 131–136, *IEEE explore*, 2017.
- [6] N. Kumar, N. Lourenco, M. Spiez, and R. Aguiar, “Visible Light Communication Systems Conception and VIDAS,” *IETE Tech. Rev.*, vol. 25, no. January 2015, p. 359, 2008.
- [7] R. Sagotra and R. Aggarwal, “Visible Light Communication,” *Int. J. Comput. Trends Technol.*, vol. 4, no. April, pp. 906–910, 2013.
- [8] L. Grobe and A. Paraskevopoulos, “High-speed visible light communication systems,” *Commun. ...*, no. December, pp. 60–66, 2013.
- [9] VLCC, ““Lighthouse Sub Project,”” 2012. [Online]. Available: [http://www.vlcc.net/modules/xpage2/index.php?id=3&ml\\_lang=en](http://www.vlcc.net/modules/xpage2/index.php?id=3&ml_lang=en). [Accessed: 01-Nov-2017].
- [10] O. Communications, “A 10 . 7 Km Visible Light Communications Experiment,” no. 2, pp. 231–234, 2016.
- [11] K. Cui, G. Chen, Z. Xu, and R. D. Roberts, “Traffic light to vehicle visible light communication channel characterization,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 27, p. 6594, 2012.
- [12] N. Farr, N. Farr, A. Bowen, J. Ware, and C. Pontbriand, “An integrated , underwater optical / acoustic communications system An integrated , underwater optical / acoustic communications system,” *IEEE Xplore*, no. June, 2010.
- [13] “Ambalux High Bandwidth Underwater Transceivers.” [Online]. Available: <http://www.ambalux.com/underwater-transceivers.html>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [14] “Sonardyne Product: BlueComm Underwater Optical Modem.” [Online]. Available: <https://www.sonardyne.com/product/bluecomm-underwater-optical-communication-system/>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [15] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, “What is LiFi ?,” *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, 2015.
- [16] pureLiFi, “LiFi-XC.” [Online]. Available: <https://purelifi.com/lifi-products/>. [Accessed: 28-Mar-2018].
- [17] Philips, “LuxSpace.” [Online]. Available: <http://www.lighting.philips.pt/prof/luminarias-de-interior/downlights/luxspace/luxspace-poe#>. [Accessed: 29-Mar-2018].
- [18] Philips, “PowerBalance gen2.” [Online]. Available: <http://www.lighting.philips.com/main/prof/indoor-luminaires/recessed/powerbalance-gen2#p-image-4>. [Accessed: 29-Mar-2018].
- [19] Lux, “Philips: ‘We’ll take Li-Fi mainstream’,” 2018. [Online]. Available: <http://luxreview.com/article/2018/03/philips-we-ll-take-li-fi-mainstream->. [Accessed: 29-Mar-2018].
- [20] oledcomm, “MyLifi,” 2018. [Online]. Available: <http://www.oledcomm.com/solution/mylifi@>. [Accessed: 31-Mar-2018].

- [21] Dean Takahashi, "MyLiFi is a smart lamp that beams broadband to your laptop," Jan-2018. [Online]. Available: <https://venturebeat.com/2018/01/07/mylifi-is-a-smart-lamp-that-beams-broadband-to-your-laptop/>. [Accessed: 31-Mar-2018].
- [22] Y. Chen, S. Wen, Y. Wu, Y. Ren, W. Guan, and Y. Zhou, "Long-range visible light communication system based on LED collimating lens," *Opt. Commun.*, vol. 377, pp. 83–88, 2016.
- [23] Z. Ghassemlooy and H. Le-Minh, "Free space optics ( Optical Wireless Communications )." School of Computing, Engineering and Information Sciences, Northumbria University.
- [24] C. Ghiu Lee, "Visible light communication," *Adv. Trends Wirel. Commun. Dr. Mutamed Khatib (Ed.), ISBN 978-953-307-183-1, InTech*, 2011.
- [25] CREE, "LED Components." [Online]. Available: <http://www.cree.com/>. [Accessed: 20-Mar-2018].
- [26] CREE, "Cree® XLamp® MC-E LED." [Online]. Available: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampMCE.pdf>.
- [27] OSRAM Opto Semiconductors, "OSLON® LX ECE, LUW CVBP.CE." [Online]. Available: [https://www.osram.com/os/ecat/OSLON® LX ECE LUW CVBP.CE/com/en/class\\_pim\\_web\\_catalog\\_103489/global/prd\\_pim\\_device\\_2190858/](https://www.osram.com/os/ecat/OSLON® LX ECE LUW CVBP.CE/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190858/). [Accessed: 12-Mar-2018].
- [28] Ka. Asadzadeh and B. S. Kasra Asadzadeh, "Efficient OFDM Signaling Schemes For Visible Light Communication Systems," MCMaster University, 2011.
- [29] M. Wolf, "ICT-213311 OMEGA : Physical Layer Design and Specification - Demonstrator 1 -," no. January, 2010.
- [30] J. Armstrong, "OFDM for optical communications," *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 189–204, 2009.
- [31] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications, and Design*, vol. 4. 2007.
- [32] P. André, "Optoelectronics Photometric , radiometric and regulations," *Integr. Master Electr. Comput. Eng. Optoelectron. Slides*, 2017.
- [33] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes, Second Edition, Cambridge*. 2006.
- [34] K. Sindhubala and B. Vijayalakshmi, "Design and implementation of visible light communication system in indoor environment," *ARPJ J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 7, pp. 2882–2886, 2015.
- [35] M. Singh, "Performance Comparison between PIN and APD Photodiodes for use in Free Space Optical Communication Link," *Ijirae*, vol. 2, no. 8, pp. 25–28, 2015.
- [36] L. F. Mesquita and L. Nero Alves, "High Gain and Bandwidth Current-Mode Amplifiers: Study and Implementation," Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2008.
- [37] L. Nero Alves and R. L. Aguiar, "Design Techniques for High Performance Optical Wireless Front-Ends," *Proc. Conf. Telecommun. 2003*, no. Aveiro, Portugal, 2003.
- [38] J. Y. Joo, S. K. Lee, C. S. Kang, and S. S. Park, "Design of an ultra thin secondary lens for visible light communication based on a white LED," *ISOT 2009 - Int. Symp. Optomechatronic Technol.*, pp. 140–145, 2009.
- [39] "ThorLabs." [Online]. Available: [https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9\\_PF.cfm?ObjectGroup\\_ID=2940](https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9_PF.cfm?ObjectGroup_ID=2940). [Accessed: 15-Dec-2017].
- [40] Y. H. Chung and S. Bin Oh, "Efficient optical filtering for outdoor visible light communications in the presence of sunlight or artificial light," *ISPACS 2013 - 2013 Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst.*, pp. 749–752, 2013.
- [41] R. W. Fenn *et al.*, "Optical and Infrared Properties of the Atmosphere," *Handb. Geophys. Sp. Environ.*, pp. 1–80, 1985.

- [42] Everlight, "Silicon Planar PIN Photodiode PD70-01B/TR7." [Online]. Available: <http://www.everlight.com/file/ProductFile/PD70-01B-TR7.pdf>.
- [43] Velleman, "PS613 Power Supply." [Online]. Available: <https://www.velleman.eu/products/view/?id=13882>. [Accessed: 27-Apr-2018].
- [44] I. F. Optics, "Photometer IF-PM200." [Online]. Available: [http://i-fiberoptics.com/laser\\_detail.php?id=1018](http://i-fiberoptics.com/laser_detail.php?id=1018). [Accessed: 27-Apr-2018].
- [45] O. View, "Spectrometer S09500." [Online]. Available: <https://oceanoptics.com/>. [Accessed: 13-Aug-2018].
- [46] ThorLabs, "T-Cube LED Driver LEDD18." [Online]. Available: [https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup\\_ID=2616](https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=2616).
- [47] C. ByteBox, "Luxímetro." [Online]. Available: [https://play.google.com/store/apps/details?id=crunchybytebox.lightmeter&hl=pt\\_PT](https://play.google.com/store/apps/details?id=crunchybytebox.lightmeter&hl=pt_PT).
- [48] ThorLabs, "PDA30G-EC - PbS Fixed Gain photodetector." [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA30G-EC>. [Accessed: 03-Jun-2018].
- [49] S. Haykin, *Communication Systems*. Wiley & Sons, 2001.
- [50] G. Arena, "Huawei Honor 8." [Online]. Available: [https://www.gsmarena.com/huawei\\_honor\\_8-8195.php](https://www.gsmarena.com/huawei_honor_8-8195.php). [Accessed: 10-Jul-2018].