



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores



Li-Fi: Navegação Assistida por LEDs

João Pedro Pessegueiro Rodrigues
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Eletrónica e Telecomunicações na Área de Especialização em
Telecomunicações

Júri:

Presidente - Doutor António Serrador

Vogal (Arguente) - Doutor Pedro Vieira

Vogal (Orientador) - Doutora Paula Louro

Orientadores:

Doutora Manuela Vieira e Doutora Paula Louro

Fevereiro 2022

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi uma longa jornada constituída por desafios. A sua superação não seria possível sem o apoio, intelectual e emocional, das seguintes pessoas, a quem gostaria de expressar a minha gratidão.

Primeiramente, gostaria de agradecer às doutoras Paula Louro e Manuela Vieira, que me transmitiram confiança, guiaram e contribuíram, com grande dedicação e de forma exemplar, para enriquecer a presente dissertação.

Também gostaria de agradecer, ao projeto de investigação, IPL/IDICA/2020/Geo_Loc/ISEL, no qual esta tese se enquadra, que forneceu as ferramentas para a realização da mesma.

E por fim, mas não menos importante, à minha família e amigos, em especial aos meus pais, Maria Rodrigues e Maximino Rodrigues, à minha irmã, Rita Rodrigues, e à minha carometade, Cláudia Guedes, que me ajudaram e apoiaram, em todos os sentidos, para chegar a esta fase final da minha vida académica.

Resumo

A integração de dispositivos de *Internet of Things* (IoT) e *Light Fidelity* (Li-Fi) revela-se um campo promissor na evolução tecnológica, associada à tendência atual de incorporação de serviços de localização, em equipamentos inteligentes.

Apesar do Sistema de Posicionamento Global (GPS) funcionar bem em ambientes exteriores, o mesmo não acontece em ambientes fechados, como edifícios ou locais subterrâneos, em que o sinal é atenuado ou refletido pelos materiais que os constituem, levando à falha de serviço ou imprecisão no posicionamento.

Atualmente existem diferentes tecnologias de navegação, para uso em ambientes interiores. Grande parte é baseada em sinais de Radiofrequência (RF), como é o caso do *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), que tem uma precisão baixa para posicionamento, quando é mais acessível. No entanto o espectro RF está cada vez mais limitado, devido ao aumento de tráfego. Nem mesmo com a eficiência espectral e reutilização de frequência, se consegue resolver esta questão. Por outro lado, o espectro do visível, no qual o Li-Fi se baseia, encontra-se totalmente livre. A grande vantagem de usar Li-Fi em vez de Wi-Fi, para localização em ambientes interiores, é a obtenção de melhor desempenho a um preço menor. Isto porque, num edifício, existem dez vezes mais Díodos Emissores de Luz (LEDs), em comparação com os Pontos de Acesso (APs) Wi-Fi. Assim, os LEDs permitem uma triangulação mais rápida e precisa, do dispositivo móvel e a reutilização dos mesmos para comunicação torna-os na opção mais sustentável. Por estas razões, a tecnologia de Comunicação por Luz Visível (VLC), no qual o Li-Fi se baseia, estará na vanguarda dos futuros serviços baseados em localização *indoor* e constitui uma das tecnologias que a Sexta Geração (6G) das telecomunicações irá incluir.

Nesta tese descreve-se a caracterização de um sistema de comunicação através de luz visível, em que os dados são transmitidos através de uma lâmpada tetracromática de LEDs (RGBV-LED). Os LEDs permitem comutar diferentes níveis de intensidade de luz, a uma taxa elevada e impercetível pelo olho humano. Esta funcionalidade pode ser usada para comunicação, onde os dados são codificados na luz emitida, permitindo que os LEDs possam ser utilizados para fornecer iluminação e também para comunicação. Assim, a lâmpada de iluminação, envia dados (incorporados no sinal ótico emitido), que são transmitidos e recebidos por um fotodetector, baseado em ligas de Silício Amorfo Hidrogenado (a-SiC:H) com propriedades de filtragem e de desmultiplexagem.

A caracterização do canal de comunicação por luz visível, estabelecido entre a infraestrutura de iluminação e comunicação e o utilizador móvel, em condições de linha de vista, é discutida neste trabalho. Recorreu-se ao modelo *Lambertiano* para caracterizar a distribuição de sinal ótico do LED. O ganho do canal foi calculado, assumindo uma configuração quadrangular dos LEDs tetracromáticos, em que os dados a transmitir, juntamente com os identificadores, atribuídos à localização física dos transmissores, foram enviados usando um esquema com modulação *On-Off Keying* (OOK). Foi determinada a cobertura do sinal e as respetivas regiões *footprint*, dentro de cada célula unitária, o que permitiu estimar o sinal multiplexado recebido pelo fotodetector. Este modelo foi calibrado com os dados experimentais obtidos no protótipo laboratorial. A descodificação do sinal multiplexado ocorreu, numa primeira fase, a uma curva de calibração e, posteriormente, foi otimizada através da metodologia de *bits* de controlo de paridade, o que permitiu melhorar significativamente a Taxa de Erro de Bits (BER) do sistema. O sistema de navegação por Li-Fi foi analisado através da simulação de demonstrações de localização *indoor* de elevada resolução.

Palavras-chave:

Li-Fi; VLC; LED-RGBV; Fotodetector; Posicionamento; Navegação.

Abstract

The integration of Internet of Things (IoT) and Light Fidelity (Li-Fi) devices is a promising field in technological evolution, associated with the current trend of incorporating location services in smart devices.

Although the Global Positioning System (GPS) works well outdoors, the same does not happen indoors, such as in buildings or underground locations, where the signal is attenuated or reflected by the materials that constitute them, leading to service failure or inaccuracy in positioning.

Today there are different navigation technologies for indoor use. Most are based on Radio Frequency (RF) signals, such as Wireless Fidelity (Wi-Fi), which has a low accuracy for positioning when it is more accessible. However, the RF spectrum is increasingly limited due to increased traffic, and even with spectral efficiency and frequency reuse, this cannot be solved. On the other hand, the visible spectrum, on which Li-Fi is based, is completely free. The big advantage of using Li-Fi, instead of Wi-Fi, for indoor location is that you get better performance at a lower price. That's because in a building there are ten times more Light Emitting Diodes (LEDs), compared to Wi-Fi Access Points (APs). So, LEDs enable faster and more accurate triangulation of the mobile device and reusing them for communication makes them the most sustainable option. For these reasons, Visible Light Communication (VLC) technology, on which Li-Fi is based, will be at the forefront of future indoor location-based services and is one of the technologies that the Sixth Generation (6G) of telecommunications will include.

This thesis describes the characterization of a communication system using visible light, in which data is transmitted through a tetrachromatic LED lamp (RGBV-LED). LEDs allow switching different levels of light intensity at a high rate, that is imperceptible to the human eye. This functionality can be used for communication where data is encoded in the emitted light, allowing the LEDs to be used to provide illumination as well as for communication. Thus, the illumination lamp, sends data (embedded in the emitted optical signal), which is transmitted and received by a photodetector based on Hydrogenated Amorphous Silicon (a-SiC:H) alloys with filtering and demultiplexing properties.

The characterization of the visible light communication channel, established between the lighting and communication infrastructure and the mobile user, under line-of-sight conditions, is discussed in this work. The Lambertian model was used to characterize the optical signal distribution of the LED. The channel gain was calculated assuming a quadrangular configuration of the tetrachromatic LEDs, where the data to be transmitted along with identifiers, assigned to the physical location of the transmitters, were sent using an On-Off Keying (OOK) modulated scheme. The signal coverage and the respective footprint regions within each unit cell were determined, which allowed estimation of the multiplexed signal, received by the photodetector. This model was calibrated with experimental data, obtained from the laboratory prototype. The decoding of the multiplexed signal first occurred to a calibration curve and was subsequently optimized using the parity control bit methodology, which allowed the Bit Error Rate (BER) of the system to be significantly improved. The Li-Fi navigation system was analyzed by simulating high-resolution indoor localization demonstrations.

Keywords:

Li-Fi; VLC; LED-RGBV; Photodetector; Positioning; Navigation.

Tabela de conteúdos

Agradecimentos	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas	xix
Lista de acrónimos	xxi
Lista de símbolos	xxv
1º Capítulo – Introdução	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura do documento	3
1.4 Artigos publicados.....	4
2º Capítulo – Tecnologia VLC	5
2.1 Introdução.....	6
2.2 Tecnologia RF <i>versus</i> VLC para localização em ambientes fechados	6
2.3 Transmissor VLC	8
2.4 Recetor VLC.....	8
2.5 Características de propagação	9
2.6 Ruído Recebido e SNR	10
2.7 <i>Shadowing</i>	11
2.8 Métodos de modulação para um sistema VLC.....	12
2.8.1 <i>Dimming</i> e <i>Flickering</i>	12
2.8.2 Modulações.....	13
2.9 <i>Medium Access Control (MAC)</i>	17
2.10 Coordenação das células.....	18
3º Capítulo – Implementação VLC para navegação	19
3.1 Introdução.....	20
3.2 Sistema de navegação guiada utilizando a topologia quadrangular.....	20
3.2.1 Cenário VLC proposto.....	20
3.2.2 Regiões <i>Footprint</i> da topologia quadrangular	21
3.2.3 Transmissor e Recetor VLC.....	22
3.2.4 Técnicas de codificação e decodificação	23
3.2.5 Resultados experimentais	25
3.3 Sistema de navegação guiada utilizando as topologias quadrangular e hexagonal ...	27

3.3.1	Cenário VLC proposto.....	27
3.3.2	Regiões <i>Footprint</i> das topologias quadrangular e hexagonal	28
3.3.3	Resultados experimentais	29
4º	Capítulo – Caracterização da comunicação do canal VLC	33
4.1	Introdução.....	34
4.2	Processo de obtenção das curvas de calibração ideal	34
4.2.1	Cenário de simulação ideal	34
4.2.2	Cobertura prevista em <i>downlink</i>	35
4.2.3	Curva de calibração ideal com ganho.....	42
4.3	Curva de calibração “real” com ganho.....	44
4.4	Processo de representação ideal do sinal MUX recebido (<i>Standard</i> e Paridade).....	46
4.5	Codificação	48
4.6	Representação ideal dos sinais transmitidos e sinal MUX recebido (<i>Standard</i> e Paridade)	49
4.7	Descodificação do sinal recebido ideal	50
4.8	Aplicação que simula uma navegação assistida por LEDs num sistema Li-Fi.....	52
5º	Capítulo – Validação do modelo VLC.....	55
5.1	Introdução	56
5.2	Comunicação unidirecional.....	57
5.3	Comunicação bidirecional	62
5.3.1	Utilizador 7261	62
5.3.2	Controlador local (CM).....	70
5.3.3	Utilizador 3009	74
6º	Capítulo – Descodificação e controlo de erros.....	79
6.1	Introdução.....	80
6.2	Obtenção das curvas de calibração <i>standard</i> e paridade	80
6.3	Cenário de teste de uma comunicação bidirecional	84
6.4	Restruturação do bloco de informação codificada	84
6.5	Utilizador 7261 em t_0 - Resultados obtidos a nível prático	85
6.6	Utilizador 7261 em t_0 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação	86
6.7	Processo de descodificação e controlo de erros do sinal recebido “real”	87
6.8	Utilizador 7261 em t_0 - Obtenção dos sinais transmitidos após a descodificação.....	89
6.9	Utilizador 7261 em t_1 - Resultados obtidos a nível prático	92
6.10	Utilizador 7261 em t_1 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação e obtenção dos sinais transmitidos depois da descodificação	93
6.11	Utilizador 7261 em t_2 - Resultados obtidos a nível prático	94

6.12	Utilizador 7261 em t_2 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação e obtenção dos sinais recebidos depois da descodificação	95
6.13	Utilizador 7261 em t_3 - Resultados obtidos a nível prático	96
6.14	Utilizador 7261 em t_3 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação e obtenção dos sinais recebidos depois da descodificação	97
6.15	Utilizador 3009 em t_0 - Resultados obtidos a nível prático	98
6.16	Utilizador 3009 em t_0 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação e obtenção dos sinais recebidos depois da descodificação	99
6.17	Resumo do desempenho da descodificação, com e sem controlo de erros	100
7 ^o	Capítulo – Conclusão e trabalho futuro.....	103
7.1	Conclusão	104
7.2	Trabalho Futuro.....	109
	Bibliografia	111
	Referências.....	112

Índice de figuras

Figura 1 - Distribuição, em frequência e comprimento de onda, do espectro eletromagnético, com destaque para a zona do visível (430 THz - 790 THz), [14].....	7
Figura 2 - Dois tipos de LEDs que produzem luz branca. (a) LED azul revestido com fosforo, (b) LED RGB, baseada em [22].	8
Figura 3 - Posição relativa de um transmissor e recetor em linha de vista (LOS), baseada em [25].	9
Figura 4 - Impacto da distância transmissor-recetor D (a), ângulos de incidência α (b) e irradiação β (c), na potência recebida, baseado em [24].	10
Figura 5 - Recetor VLC obscurecido pelo corpo humano, baseada em [28].	11
Figura 6 - Variação da luz persentida pelo olho humano consoante diferentes intensidades de iluminação, medidas num determinado ambiente, devido à capacidade de contração dos músculos da pupila, baseada em [14].	12
Figura 7 - Representação do diagrama de cromaticidade definido pela CIE em 1931 e dos sete códigos de cores, correspondentes aos sete centros das bandas, que dividem o espectro da luz visível, [14].	15
Figura 8 - Constelação triangular RGB (110, 010, 000), [14].	16
Figura 9 - Modulação CSK utilizando 4 símbolos (a), 8 símbolos (b) e 16 símbolos (c), representada numa constelação triangular RGB (110, 010, 000), [14].	16
Figura 10 - Implementação da técnica de WDM, utilizando um LED RGB, como transmissor, e um fotodíodo, implementado num smartphone, ou utilizando as câmaras do mesmo, como recetor.	17
Figura 11 - Topologias das camadas de ligação VLC, [19].	17
Figura 12 - Ligação de um controlador local a 3 LEDs transmissores. A mobilidade dos dispositivos pode ser gerida pelo controlador local, que coordena as operações das células VLC, [19].	18
Figura 13 - Infraestrutura ótica e esboço indoor, [40]. (a) Planta, 3D virtual, com a informação do número de pisos e a localização respetiva dos LEDs. (b) Planta 2D da localização de cada LED do piso 1.	20
Figura 14 - Representação do cenário proposto, [40]. (a) Planta mais abrangente, para o conjunto de LEDs presentes na ilustração 3D do centro comercial, constituído por 4 andares (RGBV são as cores moduladas para transmitir a informação em cada piso do edifício). (b) Planta 2D da região de footprints de cada quadrado do piso 1.....	21
Figura 15 - Implementação da técnica de WDM, utilizando um LED RGBV como transmissor de luz branca e informação em downlink e um fotodíodo PIN/PIN como recetor da mesma, [42].	23
Figura 16 - Representação da codificação de informação, no mesmo intervalo de tempo, transmitida pelos LEDs (a) e pelo controlador local (b), [40].	24
Figura 17 - Descodificação de um sinal multiplexado (MUX) e recebido pelo fotodíodo do utilizador, que se localiza na footprint #6 do AP $C_{(4,3,1)}$, [40].	25
Figura 18 - Descodificação de um sinal MUX recebido pelo utilizador, que se localiza inicialmente na footprint #7 do AP $C_{(4,1,1)}$ do piso 1 e acaba na célula $C_{(5,2,1)}$ ou $C_{(3,2,1)}$, também do piso 1, [40].	26
Figura 19 - Representação do cenário VLC proposto que usa a topologias quadrangular e hexagonal, [13].	27
Figura 20 - Representação do cenário proposto, constituído pela localização dos LEDs e as respetivas regiões footprint de cada topologia. (a) Representação da zona do corredor, que	

utiliza a topologia quadrangular. (b) Representação da zona de restauração, do terminal C, que utiliza a tipologia hexagonal, [13].	28
Figura 21 - Representação do AP $C_{(2,3)}$ do corredor central. Posição inicial do recetor, em t_0 , quando este se encontra na footprint #1, baseada em [13].	29
Figura 22 - Localização indoor através de VLC em instantes sucessivos (t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 e t_6), [13]. (a) Aquisição do sinal em direção ao terminal A. (b) Aquisição do sinal em direção ao terminal B. (c) Aquisição do sinal em direção ao terminal C. (d) Aquisição do sinal na zona de restauração.	30
Figura 23 - Cenário de teste e raio de transmissão de cada LED.	34
Figura 24 - Geometria da posição relativa do transmissor e recetor, [43].	36
Figura 25 - Assumindo uma posição fixa do transmissor, em xt e yt , a distância entre o transmissor e o recetor, em qualquer ponto xr e yr , é calculada através do teorema de Pitágoras, dentro da área de transmissão.	37
Figura 26 - Representação em mapa de cores da potência recebida pelo fotodetector em dBm.	39
Figura 27 - Frequência da Função Densidade de Probabilidade (PDF), em função da potência recebida em downlink.	40
Figura 28 - Probabilidade da Função Distribuição Cumulativa (CDF), em função da potência recebida em downlink.	41
Figura 29 - Representação dos 16 níveis de potência recebida pelo fotodíodo, em mapa de cores.	42
Figura 30 - Representação dos 9 níveis de potência e das 9 footprints de uma célula unitária, com os 4 LEDs RGBV ligados.	43
Figura 31 - Representação teórica da curva de calibração standard, com ganho de receção. ..	44
Figura 32 - Cenário do protótipo laboratorial.	45
Figura 33 - Representação prática da curva de níveis de calibração standard, com ganho.	46
Figura 34 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os LEDs RGBV transmitem o conjunto de sinais S_1 e P_1 para o fotodíodo. Seguidamente, o receptor multiplexa os sinais transmitidos, de forma a originar os sinais recebidos S_{STD} , provenientes do conjunto S_1 , e o sinal S_p , proveniente do conjunto P_1 .	49
Figura 35 – Descodificação “ideal” do sinal transmitido pelos LEDs brancos RGBV.	50
Figura 36 - Representação da localização do utilizador, que se situa na região footprint #1 da célula unitária $C_{(4,3,1)}$ do piso 1.	51
Figura 37 - Aplicação que simula uma navegação assistida por LEDs num sistema Li-Fi. (a) obtenção da curva de calibração standard. (b) simulação do sinal transmitido pelos LEDs brancos RGBV e recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, através da curva de calibração obtida idealmente, em (a), e no laboratório. (c) realização da descodificação do sinal recebido pelo fotodíodo, obtido a nível laboratorial.	52
Figura 38 - Representação 3D e 2D de um cenário indoor, em que os recetores se situam nas células $C_{(4,3,1)}$ e $C_{(4,4,1)}$ do piso 1.	56
Figura 39 - Representação do percurso do recetor pelas footprints #1, #4 e #4, nos instantes t_0 , t_1 e t_2 .	57
Figura 40 - Representação teórica de uma comunicação unidirecional. Os sinais $R_{S1}, G_{S1}, B_{S1}, V_{S1}; R_{S2}, G_{S2}, B_{S2}, V_{S2}$ e $R_{S3}, G_{S3}, B_{S3}, V_{S3}$ são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1, S_2 e S_3 , nos instantes t_0, t_1 e t_2 .	58
Figura 41 - Descodificação “ideal” dos sinais (S_1, S_2 e S_3), recebidos e multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN e transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, nos instantes t_0, t_1 e t_2 .	59

Figura 42 - Representação prática de uma comunicação unidirecional, com ruído. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} ; R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} e R_{S3} , G_{S3} , B_{S3} , V_{S3} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e posteriormente multiplexados pelo mesmo, em S_1 , S_2 e S_3 , nos instantes t_0 , t_1 e t_2	60
Figura 43 - Representação prática de uma comunicação unidirecional, sem ruído. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} ; R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} e R_{S3} , G_{S3} , B_{S3} , V_{S3} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e posteriormente multiplexados, em S_1 , S_2 e S_3 , nos instantes t_0 , t_1 e t_2	61
Figura 44 - Representação da localização inicial dos recetores 7261 e 3009, que se encontram, respetivamente, nas regiões footprint #1 e #6.	62
Figura 45 - Representação da deslocação do utilizador 7261 pelo percurso mais curto (ilustrado a vermelho), passando pelas regiões footprint #1, #3, #1 e #6, nos instantes t_0 , t_1 , t_2 e t_3 , respetivamente, e pelo suposto percurso mais longo (ilustrado a azul), passando pelas regiões footprint #1, #4, #4, #5 e #6.	62
Figura 46 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1 e S_2 , nos instantes t_0 e t_1	64
Figura 47 - Descodificação “ideal” dos sinais (S_1 e S_2), recebidos e multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN e transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, nos instantes t_0 e t_1	65
Figura 48 - Representação prática de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e posteriormente multiplexados, sem ruído, em S_1 e S_2 , nos instantes t_0 e t_1	66
Figura 49 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1 e S_2 , nos instantes t_2 e t_3	67
Figura 50 – Descodificação “ideal” dos sinais (S_1 e S_2), recebidos e multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN e transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, nos instantes t_2 e t_3	68
Figura 51 - Representação prática de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados, sem ruído, em S_1 e S_2 , nos instantes t_2 e t_3	69
Figura 52 - Representação da intervenção do controlador local no percurso do utilizador 7261, nos instante t_0 e t_2 em que o mesmo se encontra, respetivamente, nas regiões footprint #1 das células $C_{(4,3,1)}$ e $C_{(4,4,1)}$, do piso 1.	70
Figura 53 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais codificados, CM (R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2}), são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV do controlador local, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1 e S_2 , nos instantes t_0 e t_2	71
Figura 54 - Descodificação “ideal” dos sinais, CM (S_1 e S_2), recebidos e multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN, e transmitidos pelos LEDs brancos RGBV do controlador local, nos instantes t_0 e t_2	72
Figura 55 - Representação prática de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais, codificados, CM (R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2}), são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV do controlador local, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados, em S_1 e S_2 , nos instantes t_0 e t_2	73

Figura 56 - Representação da posição inicial, do utilizador 3009, que se situa na região footprint #6 da célula $C_{(4,4,1)}$, no instante t_0	74
Figura 57 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 3009. Os sinais codificados, R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} e V_{S1} , são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1 , no instante t_0 . 75	75
Figura 58 - Descodificação “ideal” do sinal (S_1), recebido e multiplexado pelo fotodíodo PIN/PIN, e transmitido pelos LEDs brancos RGBV, nos instantes t_0	76
Figura 59 - Representação prática de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 3009. Os sinais codificados, R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} e V_{S1} , são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados sem ruído, em S_1 , no instante t_0	76
Figura 60 - Representação prática (obtida através de simulações no laboratório) da intensidade normalizada das curvas de calibração standard (a azul) e paridade (a vermelho).....	80
Figura 61 - Ilustração da intensidade normalizada dos 16 níveis da média da curva de calibração standard (a azul) e da média +/- desvio padrão da curva de paridade (a vermelho), representadas na Figura 60.....	81
Figura 62 - Ilustração da intensidade normalizada dos 16 níveis da curva de calibração standard (a azul) e dos 8 níveis da curva de paridade (a vermelho) mais próximos dos 8 níveis pares da curva standard.....	82
Figura 63 - Representação da intensidade normalizada do desnível entre os 8 níveis pares, da curva de calibração standard, com os 8 níveis da curva de paridade.....	83
Figura 64 - Representação dos percursos e direções dos utilizadores 7261 e 3009, ilustrados, respetivamente, pelas setas e retângulos a vermelho e a verde. O primeiro desloca-se pelas regiões footprint #1, #3, #1 e #6 nos instantes t_0 , t_1 , t_2 e t_3 . O segundo permanece sempre na mesma região, footprint #6.	84
Figura 65 - Representações obtidas a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 7261 no instante t_0 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são obtidos, respetivamente, através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t0} e P_{t0} , e pré-calibrados com as curvas standard e paridade, da Figura 60.....	85
Figura 66 - Representações obtidas, antes da descodificação, relativas ao utilizador 7261 no instante t_0 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são obtidos através da média +/- desvio padrão dos sinais recebidos, da Figura 65.	86
Figura 67 - Processo de descodificação e controlo de erros.....	87
Figura 68 - Representações obtidas depois da realização da descodificação, relativas ao utilizador 7261 no instante t_0 . Os sinais transmitidos pelos LEDs, P_{t0} e S_{t0} , são obtidos, respetivamente, através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN (Figura 66), S_P e S_{STD} , com as curvas de calibração, da paridade e standard (Figura 62). O sinal S_{t0} contém controlo de erros. Já o S_{t0}' , é obtido com alguns bits errados.	89
Figura 69 - Descodificação, sem a intervenção do controlo de erros (paridade), do sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, quando o utilizador 7261 se encontra no instante t_0 . Número de bits errados e BER, por canal e total dos 4 canais.	90
Figura 70 - Descodificação, com a intervenção do controlo de erros, do sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN e a sua paridade, quando o utilizador 7261 se encontra no instante t_0 . Número de bits errados e BER, por canal e total dos 4 canais.	91
Figura 71 - Representações obtidas, a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 7261, no instante t_1 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são obtidos, respetivamente, através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos	

pelos LEDs brancos RGBV), S_{t1} e P_{t1} , e pré-calibrados com as curvas standard e paridade, da Figura 60.....	92
Figura 72 - Representações obtidas, antes e depois da descodificação, relativas ao utilizador 7261 no instante t_1 . O sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} , é obtido através da média +/- desvio padrão do sinal recebido, ilustrado pela cor azul, na Figura 71. O sinal transmitido pelos LEDs, S_{t1} , é obtido através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo com a curva de calibração standard, da Figura 62. O sinal S_{t1} contém controlo de erros. Já o S_{t1}' , é obtido com alguns bits errados.	93
Figura 73 - Representações obtidas, a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 7261, no instante t_2 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são obtidos, respetivamente, através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t2} e P_{t2} , e pré-calibrados com as curvas standard e paridade da Figura 60.....	94
Figura 74 - Representações obtidas, antes e depois da descodificação, relativas ao utilizador 7261 no instante t_2 . O sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} , é obtido através da média +/- desvio padrão do sinal recebido, ilustrado pela cor azul, na Figura 73. O sinal transmitido pelos LEDs, S_{t2} , é obtido através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo com a curva de calibração standard, da Figura 62. O sinal S_{t2} contém controlo de erros. Já o S_{t2}' é obtido com alguns bits errados.	95
Figura 75 - Representações obtidas, a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 7261, no instante t_3 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são obtidos, respetivamente, através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t3} e P_{t3} , e pré-calibrados com as curvas standard e paridade, da Figura 60.....	96
Figura 76 - Representações obtidas, antes e depois da descodificação, relativas ao utilizador 7261, no instante t_3 . O sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} , é obtido através da média +/- desvio padrão do sinal recebido, ilustrado pela cor azul, na Figura 75. O sinal transmitido pelos LEDs, S_{t3} , é obtido através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo com a curva de calibração standard, da Figura 62. O sinal S_{t3} contém controlo de erros. Já o S_{t3}' é obtido com alguns bits errados.	97
Figura 77 - Representações obtidas a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 3009 no instante t_0 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são, respetivamente, obtidos através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t0} e P_{t0} , e pré-calibrados com as curvas standard e paridade da Figura 60.....	98
Figura 78 - Representações obtidas, antes e depois da descodificação, relativas ao utilizador 3009, no instante t_0 . O sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} , é obtido através da média +/- desvio padrão do sinal recebido, ilustrado pela cor azul, na Figura 77. O sinal transmitido pelos LEDs, S_{t0} , é obtido através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo com a curva de calibração standard, da Figura 62. O sinal S_{t0} contém controlo de erros. Já o S_{t0}' é obtido com alguns bits errados.	99

Índice de tabelas

Tabela 1 - Principais modulações num sistema VLC e as suas características, [14].....	13
Tabela 2 - Os sete códigos de cores, correspondentes aos sete centros das bandas, que dividem o espectro da luz visível, [37].	15
Tabela 3 - Regiões Footprint da topologia quadrangular, baseada em [41].....	22
Tabela 4 - Representação dos bits de 5 e 6 sub-blocos dos 2 blocos de 64 bits de informação codificada, baseada em [40].	24
Tabela 5 - Regiões Footprint da topologia quadrangular e hexagonal, baseada em [41].	29
Tabela 6 - Valores dos principais parâmetros da simulação VLC.	38
Tabela 7 - Regiões <i>footprint</i> de uma célula unitária constituída por 4 LEDs RGBV simultaneamente ligados, situados em cada vértice da mesma.	43
Tabela 8 - Constituição dos 6 sub-blocos do bloco de 64 <i>bits</i> de informação codificada.....	48
Tabela 9 - Códigos e sectores respetivos aos 8 ângulos possíveis do recetor se direccionar.	51
Tabela 10 - Constituição dos 7 sub-blocos do bloco de 64 <i>bits</i> de informação codificada do controlador local.	70
Tabela 11 - Constituição dos 6 sub-blocos do bloco de 32 bits de informação codificada.	84
Tabela 12 - Resumo do número de bits errados e BER, provenientes da descodificação, sem e com a intervenção do controlo de erros (paridade) do sinal recebido, pelo fotodíodo PIN/PIN, quando o utilizador 7261 se encontra nas regiões footprint #1 (t_0), #3 (t_1), #1 (t_2) e #6 (t_3). ..	100
Tabela 13 - Resumo do número de bits errados e BER, provenientes da descodificação sem e com a intervenção do controlo de erros (paridade) do sinal recebido, pelo fotodíodo PIN/PIN, quando o utilizador 3009 se encontra na região footprint #6 (t_0).	101

Lista de acrónimos

APs	<i>Access Points</i> (Pontos de Acesso)
A-GPS	<i>Assisted - Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global Assistido)
BER	<i>Bit Error Rate</i> (Taxa de Erro de Bits)
CSK	<i>Color Shift Keying</i>
CIE	<i>International Commission on Illumination</i> Comissão Internacional de Iluminação (CIE)
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> (Função Distribuição Cumulativa)
CM	<i>Control Manager</i> (Controlador Local)
DL	<i>Downlink</i> (Ligação Descendente)
FOV	<i>Field of View</i> (Campo de Visão)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
a-SiC:H	<i>Hydrogenated Amorphous Silicon</i> (Carboneto de Silício Amorfo Hidrogenado)
IR	<i>Infrared</i> (Infravermelho)
IoT	<i>Internet of Things</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos)
IPS	<i>Indoor Positioning System</i> (Sistemas de Posicionamento em ambientes interiores)
Li-Fi	<i>Light Fidelity</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (Díodo Emissor de Luz)

MAC	<i>Medium Access Control</i> (Controlo de Acesso Médio)
MIMO	<i>Multiple Input and Multiple Output</i> (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas)
NRZ-OOK	<i>Non Return to Zero</i> (Não Retorna a Zero)
NFC	<i>Near Field Communication</i> (Comunicação por Campo de Proximidade)
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (Multiplexação por Divisão Frequências Ortogonais)
OOK	<i>On-Off Keying</i>
P2P	<i>Peer-to-peer</i> (Ponto a Ponto)
PDF	<i>Probability Density Function</i> (Função Densidade de Probabilidade)
PIN	<i>p-type/intrinsic/n-type semiconductor photodiode</i> (Fotodiodo semiconductor tipo-p/intrínseco/tipo-n)
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> (Modulação de Amplitude em Quadratura)
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> (Indicador da Intensidade do Sinal Recebido)
RF	<i>Radio Frequency</i> (Radiofrequência)
RFID	<i>Radio Frequency IDentification</i> (Identificação por Radiofrequência)
RGB	<i>Red, Green and Blue</i> (Vermelho, Verde e Azul)
RGBV	<i>Red, Green, Blue and Violet</i> (Vermelho, Verde, Azul e Violeta)
6G	<i>Sixth Generation</i> (Sexta Geração)
SiC	<i>Silicon Carbide</i> (Carboneto de Silício)

SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> (Relação Sinal-Ruído)
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> (Relação Sinal Interferência mais Ruído)
TOA	<i>Time Of Arrival</i> (Tempo de Chegada)
UL	<i>Uplink</i> (Ligação Ascendente)
UWB	<i>Ultra-Wide Band</i> (Banda Ultralarga)
VLC	<i>Visible Light Communication</i> (Comunicação por Luz Visível)
VLL	<i>Visible Light Localization</i> (Localização através da Luz Visível)
WLANS	<i>Wireless Local Area Networks</i> (Rede de Área Local Sem Fios)
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> (Multiplexação por Divisão de Comprimento de onda)

Lista de símbolos

h_{PH}	Altura do recetor (fotodetector)
h_{LED}	Altura do transmissor (LED)
h	Altura entre o transmissor e recetor
A, θ	Ângulo de incidência
B, ϕ	Ângulo de irradiação
A	Área do fotodetector
L_p	Atenuação de propagação
W	Atenuação provocada pelas paredes
$C_{y,x,z}$	Célula localizada na posição relativa x, y, z
R_C, G_C, B_C, V_C	Coeficientes (C) dos canais vermelho (R), verde (G), azul (B) e violeta (V)
$\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B, \lambda_V$	Comprimentos de onda (λ) da cor vermelha (R), verde (G), azul (B) e violeta (V)
D, d_{t-r}	Distância entre o transmissor e recetor
R, G, B, V	Fontes LED que transmitem, ao olho humano, a percepção de cor Vermelha (<i>Red</i>), Verde (<i>Green</i>), Azul (<i>Blue</i>) e Violeta (<i>Violet</i>)
Gr_R, Gr_G, Gr_B, Gr_V	Ganho de receção (G_r) pelos canais vermelho (R), verde (G), azul (B) e violeta (V)
G_t	Ganho de transmissão
m	Índice <i>Lambertiano</i>
I_N	Intensidade máxima transmitida pelo LED
nW	Número de paredes
\oplus	Operação lógica XOR
$MUX_{(S_P)}$	Paridade do sinal recebido
$N_{MUX (S_P)}$	Paridade do sinal recebido normalizado
S_P	
R_P, G_P, B_P, V_P	Paridade dos sinais transmitidos pelos canais vermelho (R), verde (G), azul (B) e violeta (V)
$x_r y_r$	Posição relativa do recetor
$x_t y_t$	Posição relativa do transmissor
P_r	Potência recebida
Pt_R, Pt_G, Pt_B, Pt_V	Potências transmitidas (P_t) pelos canais vermelho (R), verde (G), azul (B) e violeta (V)

r'	Raio da fonte LED
σ_{shot}	Ruído de <i>Poisson</i>
$\sigma_{thermal}$	Ruído térmico
R_S, G_S, B_S, V_S	Sinais transmitidos (S) pelos canais vermelho (R), verde (G), azul (B) e violeta (V)
R_S', G_S', B_S', V_S'	Sinais transmitidos (S'), sem controlo de erros, pelos canais vermelho (R), verde (G), azul (B) e violeta (V)
MAX_{MUX}	Sinal máximo recebido
MIN_{MUX}	Sinal mínimo recebido
$MUX_{(S_{STD})}$	Sinal recebido
$N_{MUX (S_{STD})}$	Sinal recebido normalizado
S_{STD}	
T_{bit}	Tempo de <i>bit</i>

1.º Capítulo

Introdução

1.1 Motivação

Segundo [1], as estatísticas da *Strategy Analytics* revelam que as pessoas passam 80 a 90% do seu tempo em ambientes interiores (*indoor*), como supermercados, bibliotecas, aeroportos ou universidades e que 70% e 80% das comunicações, por voz e dados, respetivamente, são provenientes desses mesmos ambientes. Devido ao aumento rápido da tecnologia, a evolução dos serviços baseados na localização *indoor* foi notória.

O Sistema de Posicionamento Global (GPS), é o mais conhecido para encontrar a localização e posição de um objeto. Apesar, do sistema funcionar bem em ambientes exteriores (*outdoor*), o mesmo não acontece em ambientes interiores, uma vez que o sinal não se consegue propagar neste tipo de ambientes [2]. Por esta razão existem Sistemas de Posicionamento *Indoor* (IPS), que fornecem informação para a navegação em ambiente fechados e os requisitos básicos de um sistema de navegação, com alta precisão, sustentabilidade e custos reduzidos [3].

Existem diferentes tecnologias de navegação, que foram desenvolvidas para o uso em ambientes interiores, mas grande parte é baseada em sinais do espectro de Radiofrequência (RF).

Na atualidade, os métodos de posicionamento *indoor* baseados em *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), usam sinais RF e são dispendiosos, uma vez que precisam de uma densa cobertura de pontos de acesso Wi-Fi e sensores de alto desempenho para garantir uma localização com exatidão. A tecnologia *Light Fidelity* (Li-Fi) veio preencher esta lacuna. Esta comunica através de luz visível (VLC), ao utilizar a proveniente de díodos emissores de luz (LEDs) existentes no meio, para iluminar o meio ambiente e comunicar sem fios (*wireless*) com dispositivos providos de fotodetetores, transmitindo a informação e a posição exata dos mesmos. Já as existentes técnicas RF, como o Wi-Fi e o *Bluetooth*, no que diz respeito à localização em ambientes fechados, têm geralmente menor precisão, segurança e eficiência energética, comparativamente com a Localização através da Luz Visível (VLL) [4].

Na tecnologia RF o espectro é limitado e restrito, devido ao controlo das entidades reguladoras. Por outro lado, o espectro do visível, no qual o VLC se baseia, encontra-se totalmente livre, sem quaisquer licenças adquiridas pelas operadoras de telecomunicações. Isto deve-se ao facto de a comunicação através da luz visível ainda não estar implementada, prevendo-se que seja incluída, apenas nas redes 6G [5].

As comunicações através da luz visível não interferem com as comunicações RF, já existentes. Por essa razão, as comunicações VLC e RF podem-se complementar para integrar uma rede móvel mais resiliente e de alta capacidade. Desta forma, a rede baseada em VLC, devido à sua alta frequência e às suas células de pequena dimensão, possibilita ligações com um débito binário elevado e não permite comunicações através de obstáculos opacos, tornando-a numa rede mais segura e com menos interferências, principalmente, entre as células de outras partições.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação pretende-se implementar um sistema de transmissão de dados através de luz visível (VLC), em que os dados são fornecidos através de uma lâmpada tetracromática de LEDs (RGBV-LED [6]). Uma vez que os LEDs têm a capacidade de fornecer, em simultâneo, iluminação e comunicação, estes enviam dados, incorporados no sinal ótico emitido, a alta velocidade, para um fotodetector [7, 8] baseado em ligas de silício amorfo

hidrogenado cuja sensibilidade espectral pode ser modificada externamente. As mudanças rápidas de intensidade das lâmpadas LED são então convertidas, pelo recetor, num sinal elétrico. O fotodetector recebe os sinais modulados e descodifica os dados.

Na realização desta tese, ambiciona-se transportar os conhecimentos já adquiridos, das comunicações RF, para as comunicações através da luz visível, fazendo as devidas adaptações. Deste modo, numa fase inicial, é fundamental desenvolver um modelo de propagação, contabilizando os vários efeitos óticos, para se simular uma comunicação em *downlink* entre os transmissores (LEDs RGBV) e o recetor (fotodíodo), num cenário *indoor* simples. Assim, é necessário desenvolver o modelo de propagação ótico, de modo a calcular a potência recebida no fotodetector. Esta irá depender da potência transmitida, da distribuição de sinal de cada LED, da atenuação devido à distância entre o transmissor e o recetor, da geometria (área, FOV) e da sensibilidade espectral do fotodíodo.

Por fim, será desenvolvido um sistema de navegação por Li-Fi. Os dados a transmitir, juntamente com os identificadores atribuídos à localização física dos transmissores, serão enviados usando um esquema com modulação *On-Off Keying* (OOK). Serão analisadas técnicas de multiplexação codificadas para suportar comunicações e navegação no mesmo canal e serão simuladas demonstrações de localização *indoor* de elevada resolução, por Li-Fi.

Os objetivos desta tese enquadram-se nas atividades de investigação do projeto IPL/IDICA/2020/Geo-Loc/ISEL.

1.3 Estrutura do documento

O presente documento encontra-se organizado nos capítulos 1 a 7.

No capítulo 1, apresenta-se uma introdução à dissertação, na qual é explicado o enquadramento, os objetivos, a organização do relatório e os artigos publicados.

No capítulo 2, é comparada a tecnologia RF com a VLC, para localização em ambiente fechados, com referência a transmissores e recetores VLC; características de propagação que influenciam a potência recebida pelo fotodetector, fontes de ruído, o efeito de *flickering*, e métodos de modulação.

No capítulo 3, são apresentadas algumas implementações de um sistema VLC, já desenvolvidas pelas orientadoras desta tese, inicialmente, utilizando apenas uma topologia, quadrangular. Será, ainda, apresentado um sistema VLC, utilizando duas topologias, quadrangular e hexagonal, a operar com LEDs brancos RGBV [6], como transmissores, e um fotodíodo semiconductor [7, 8], como recetor, usando a modulação OOK.

No capítulo 4, descreve-se, o processo de obtenção da curva de calibração, a nível teórico e prático. A curva de calibração teórica, é obtida a partir do modelo de propagação utilizado para caracterizar o canal VLC, com recurso à estimativa de perdas e ganhos do modelo *Lambertiano* para modular a distribuição de luz do transmissor ótico (LED). Os modelos foram implementados com recurso ao *software MatLab*. A curva de calibração prática foi medida no laboratório.

É, também, apresentado o processo de obtenção dos sinais recebidos pelo fotodetector (fotodíodo PIN/PIN), através da multiplexação dos sinais transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, previamente calibrados pelas curvas, obtidas a nível prático e teórico. Por fim, demonstra-se a codificação do sinal transmitido pelos LEDs, a descodificação ideal de um sinal recebido pelo fotodíodo, obtido a nível teórico, e uma aplicação que simula tudo o que foi descrito, de forma a facilitar a reprodução de uma navegação assistida por LEDs num sistema Li-Fi.

No capítulo 5, são apresentados possíveis trajetos, de modo a simular e validar a codificação e decodificação, num ambiente interior, em comunicações unidirecional e bidirecional, tanto a nível prático como teórico. Assim, são apresentadas e comparadas, as simulações produzidas através da aplicação, dada a conhecer no capítulo 4, e as obtidas laboratorialmente.

No capítulo 6, simula-se, com a ajuda do laboratório e *MatLab*, um caso mais próximo da realidade, em que o utilizador da aplicação, desconhecedor do sinal transmitido pelos LEDs brancos RGBV, consegue determinar a localização do recetor a partir dos sinais multiplexados no fotodiodo, da curva de calibração e da respetiva paridade.

No capítulo 7, são apresentadas as conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho e algumas sugestões para trabalho futuro, com o intuito de colmatar alguns aspetos que não foram abordados neste documento e para abordar linhas futuras de investigação.

1.4 Artigos publicados

Este trabalho foi apresentado no âmbito do projeto IPL/IDICA/2020/Geo_Loc/ISEL. Os resultados obtidos nas diversas atividades desenvolvidas ao longo da realização da tese foram apresentadas em conferencias da especialidade indexadas na *Web of Science* (SPIE Europe 2021, SENSORDEVICES 2021 e SPIE West 2022) e publicados nas respetivas atas:

- P. Louro, M. Vieira, P. Vieira, **J. Rodrigues**, M. de Lima, “Geo-localization using indoor visible light communication”, Proc. SPIE 11772, Optical Sensors 2021, 117720J (18 April 2021); doi: 10.1117/12.2589477 (conferência SPIE Europe 2021, fórum digital).
- M. Vieira, M. A. Vieira, P. Louro, **J. Rodrigues**, P. Vieira, “Indoor Self-localization and Wayfinding Services using Visible Light Communication: A model”, SENSORDEVICES 2021, Atenas, 14-19 Novembro 2021.
- P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. de Lima, **J. Rodrigues**, P. Vieira, “Footprint model in a navigation system based on Visible Light Communication”, SENSORDEVICES 2021, Atenas, 14-19 Novembro 2021.
- P. Louro, **J. Rodrigues**, M. Vieira, M. A. Vieira, P. Vieira, “VLC-based geo-localization for automated logistics control using AVGs”, SPIE WEST 2022, S. Francisco, USA, 22-27 Janeiro 2022 (em publicação).

O código desenvolvido em *MatLab* está disponível no repositório GitHub alojado no departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Computadores do ISEL.

2 º Capítulo

Tecnologia VLC

2.1 Introdução

Neste capítulo, será comparada a tecnologia RF com a VLC, para localização em ambientes fechados. Vão ser apresentados, entre outros, alguns transmissores e receptores VLC, características de propagação que influenciam a potência recebida pelo fotodetector, fontes de ruído num sistema VLC e o efeito de *flickering*, presente no modelo em linha de vista e ausente no modelo sem linha de vista. Também vão ser exemplificados métodos de modulação que permitam suportar o *dimming*, reduzir o efeito de *flickering* e débitos binários elevados, enquanto o LED ilumina um dado ambiente interior. No fim do capítulo, serão denotadas diferentes topologias da camada de ligação, que precisam de ser suportadas pelos protocolos MAC, e uma forma de coordenar as operações nos diversos LEDs.

2.2 Tecnologia RF *versus* VLC para localização em ambientes fechados

Apesar do GPS funcionar bem em ambientes exteriores, o mesmo não acontece em ambientes fechados, como edifícios ou locais subterrâneos, em que o sinal é atenuado ou refletido pelos materiais que os constituem, levando à falha de serviço ou imprecisão no posicionamento [2]. Isto acontece, uma vez que o sinal eletromagnético é incapaz de se propagar através destes obstáculos, devido à elevada interferência e ruído adicionado. Por esta razão, é necessário recorrer a outros sistemas de posicionamento para operar em ambientes interiores, que forneçam a informação necessária para permitir a navegação, cumprindo os requisitos básicos de um sistema de navegação: precisão, confiabilidade e custo reduzido [3].

Existem diferentes tecnologias de navegação, segundo [2, 9], que foram desenvolvidas para uso em ambientes interiores como os sensores, Infravermelho (IR), Ultra-sons (Ultrasonic), Banda Ultralarga (UWB), Rede de Área Local Sem Fios (WLANs), Wi-Fi, *Bluetooth*, RFID, Sistema de Posicionamento Global Assistido (A-GPS), Comunicação por Campo de Proximidade (NFC) [10], RADAR, entre outros. Todos eles constituem diferentes abordagens para posicionar, localizar e acompanhar um objeto, em ambientes fechados, mas grande parte é baseada em sinais do espectro de Radiofrequência. Geralmente, as tecnologias RF (UWB, WLANs, Wi-Fi, *Bluetooth*, RFID, A-GPS, NFC e RADAR), Ultra-sons e Infravermelha usam técnicas de localização [11], como o indicador da intensidade do sinal recebido (RSSI), triangulação/trilateração e o tempo de chegada (TOA) [12].

Na atualidade, o método de posicionamento *indoor* baseado em Wi-Fi torna-se numa opção dispendiosa, uma vez que precisa de uma densa cobertura de pontos de acesso Wi-Fi e sensores de alto desempenho, para garantir uma localização com exatidão [13]. A tecnologia Li-Fi veio preencher esta lacuna. Esta comunica através VLC, utilizando a luz proveniente de LEDs, existentes no meio, para iluminar o ambiente e com dispositivos providos de fotodetetores, transmitindo a informação e a posição exata dos mesmos [13]. Já as existentes técnicas RF, como o Wi-Fi e o *Bluetooth*, para localização em ambientes fechados, geralmente têm menor precisão, segurança e eficiência energética, comparativamente com a localização através da luz visível [4].

Nas soluções atuais de iluminação, as lâmpadas incandescentes e fluorescentes estão a ser substituídas, rapidamente, por LEDs. Estudos mencionados em, indicam que as lâmpadas incandescentes, mais modernas, convertem, no máximo, 10% da energia fornecida em luz

emitida [14]. Para além da eficiência energética (mais *lumens* por potência fornecida), os LEDs têm outras vantagens como um formato compacto, a redução de materiais nocivos para o ambiente e a produção de menos calor, mesmo em longos períodos de tempo, o que leva a uma maior vida útil. Por fim, mas não menos importante, a grande vantagem da utilização de LEDs, em vez das lâmpadas tradicionais, é que suportam VLC, permitindo o fornecimento de luz e, ao mesmo tempo, comunicação com um dispositivo recetor, o fotodetetor. Os LEDs permitem comutar diferentes níveis de intensidade a uma taxa elevada e impercetível pelo olho humano, o que não acontece com as outras fontes de luz [15]. Desta forma, a luz visível emitida pelos dispositivos LED pode ser modulada e codificada em informação que se pretende transmitir, a um débito binário elevado. Devido a estas vantagens, no ano 2035, é espectável que 84% da iluminação, dos Estados Unidos, seja proveniente de fontes LED [16].

Mesmo com as soluções como a eficiência espectral e a reutilização de frequência, o espectro RF (3 *kHz* - 300 *MHz*) começa a ficar reduzido, perante o aumento de tráfego, cada vez mais exigido. Em contraste, o espectro do visível (430 *THz* - 790 *THz*) inclui centenas de *TeraHertz* de largura de banda livre, como se observa na Figura 1 [14].

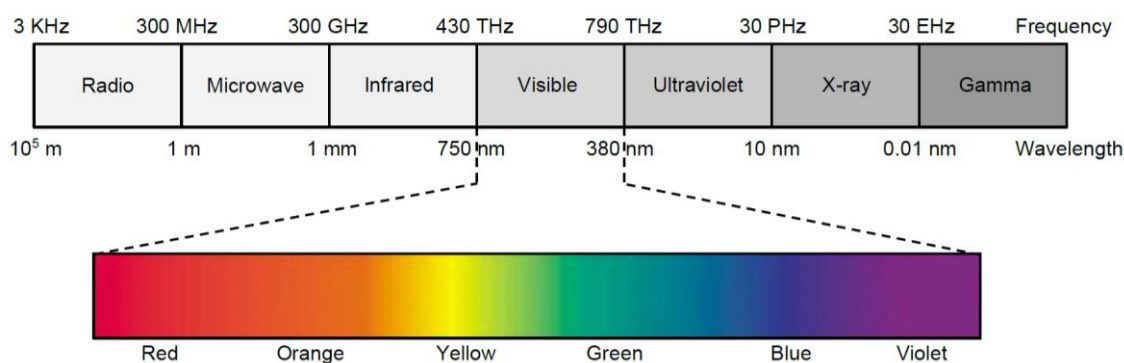


Figura 1 - Distribuição, em frequência e comprimento de onda, do espectro eletromagnético, com destaque para a zona do visível (430 *THz* - 790 *THz*), [14].

As comunicações, através da luz visível, não interferem com as comunicações RF, já existentes. Por essa razão, as comunicações VLC e RF podem-se complementar para integrar uma rede móvel de alta capacidade e mais resiliente. Desta forma, devido à sua alta frequência e às suas células de pequena dimensão, a rede baseada em VLC possibilita, ligações que superam os 1 *Gbps* [17] e não permite comunicações através de obstáculos opacos, tornando-a mais segura e com menos interferências, principalmente, entre as células de outras partições. Por outro lado, as infraestruturas (cabos *Ethernet*, fibra, etc..) já existentes para as comunicações RF, são agora reutilizadas para VLC, uma vez que a conexão de um grande número de LEDs seria economicamente insustentável, eliminando, os benefícios da reutilização dos mesmos para comunicação.

A primeira comunicação através da luz visível foi proposta no ano 2000 [18], em que foram atingidos débitos binários de aproximadamente 1 *Gbps*, e oficialmente em 2011, pelo grupo 802.15.7 do Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos (IEEE) [19].

Nos anos mais recentes, a localização em ambientes fechados, usando técnicas baseadas em comunicação por luz visível, foi proposta e desenvolvida [20, 21], no entanto, prevê-se que a sua implementação seja, apenas, incluída nas redes 6G [5].

2.3 Transmissor VLC

O LED é o transmissor utilizado no sistema de comunicação através de luz visível. Um dos requisitos cruciais para o bom funcionamento de um sistema VLC é a não alteração da iluminação proveniente do LED, devido ao uso em simultâneo com a comunicação [14].

A luz branca é a mais utilizada, uma vez que permite ver os objetos como seriam observados com luz natural. Segundo [14, 22], luz branca é produzida utilizando dois tipos de LEDs, azul com revestimento de fósforo ou tri-cromáticos, normalmente RGB, como se ilustra na Figura 2. Em LEDs de maior desempenho poderão ser usadas configurações tetracromáticas.

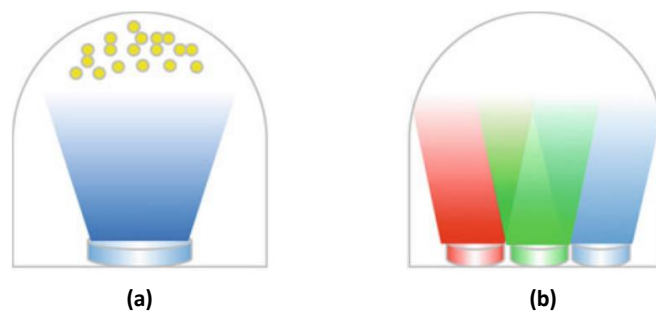


Figura 2 - Dois tipos de LEDs que produzem luz branca. (a) LED azul revestido com fosforo, (b) LED RGB, baseada em [22].

O primeiro tipo, representado na Figura 2 (a), utiliza um LED azul que é revestido por fósforo. Esta combinação produz luz branca quando a luz azul emitida pela junção do LED atravessa o revestimento de fósforo. O fósforo passa para estado excitado decaindo depois para o estado fundamental através de várias transições radiativas de menor energia, que ocorrem dentro do espectro do visível e que são percebidas pelo olho humano como luz branca. Também é possível obter diferentes tipos de cor branca, ou seja, diferentes temperaturas de cor, modificando a espessura do revestimento de fósforo. Já o segundo tipo de LED, ilustrado na Figura 2 (b), combina a radiação de cor vermelha, verde e azul para produzir a luz branca. Este tipo de LED, permite modular informação utilizando três diferentes comprimentos de onda, o que se traduz em termos de comunicação por um acréscimo de largura de banda. Esta última opção é mais cara que a primeira, uma vez que utiliza três LEDs separados. No entanto, é preferível para o uso num sistema VLC, visto que permite variar o nível de intensidade de iluminação a uma taxa mais rápida que o LED com revestimento de fósforo, aumentando a velocidade de comunicação e reduzindo eventuais efeitos *flickering*, que vão ser explicados na secção mais abaixo.

2.4 Recetor VLC

Existem dois tipos de recetores VLC que podem ser usados para receber o sinal transmitido por um LED, utilizando um fotodetector ou um sensor de imagem. O fotodetector usualmente utilizado é o fotodiodo, um dispositivo semiconductor que converte a luz recebida num sinal elétrico (tensão ou corrente). Já o sensor de imagem, constituído por vários fotodiodos, é introduzido nos *smartphones* para capturar vídeos/imagens e tem o potencial de

converter os dispositivos móveis em recetores VLC, tornando-se assim a opção mais económica. No entanto, o fotodetector permite receber comunicações através de luz visível a um ritmo mais rápido (centenas de *Mbps*) [14] do que o sensor de imagem, visto que a velocidade dos sensores das câmaras está limitada de forma a proporcionar imagens de alta resolução (alguns *kpbs*) [23].

Para além disso, o recetor deve consumir pouca energia, para poder ser alimentado pela bateria de um dispositivo móvel e, ao mesmo tempo, permitir comunicações através de luz visível, a velocidades elevadas.

2.5 Características de propagação

Segundo [24], num sistema VLC, a potência recebida pelo fotodetector depende de três fatores, a distância entre o transmissor e o recetor (D), o ângulo de incidência (α) e o ângulo de irradiação (β), conforme se mostra na Figura 3, baseada em [25].

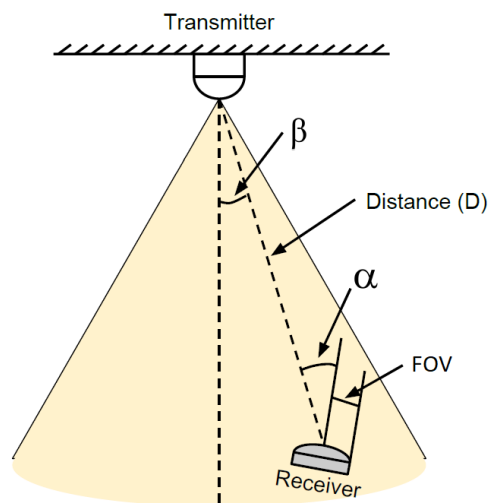


Figura 3 - Posição relativa de um transmissor e recetor em linha de vista (LOS), baseada em [25].

Através da Figura 3 verifica-se que os três fatores dependem do movimento e da orientação do recetor VLC. Deste modo, quando o ângulo de incidência é maior que o campo de visão (FOV) do recetor, a potência recebida é igual a zero.

Na Figura 4, baseada em [24], mostra-se a dependência entre a potência recebida pelo recetor com a distância emissor-recetor, e os ângulos de incidências e irradiação.

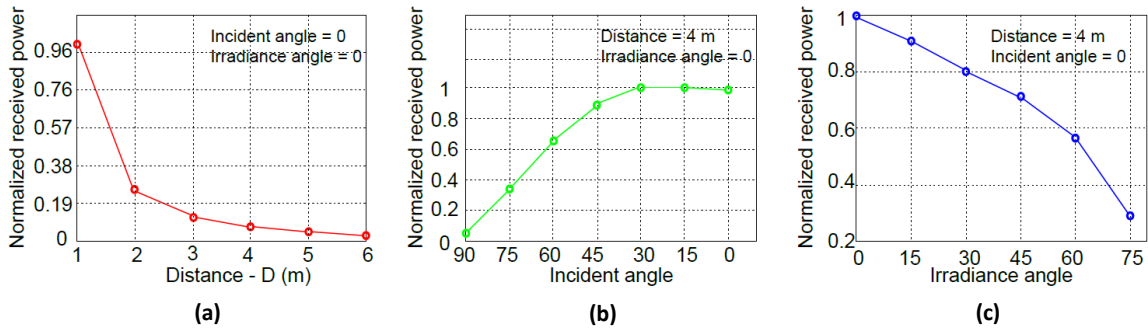


Figura 4 - Impacto da distância transmissor-recetor D (a), ângulos de incidência α (b) e irradiação β (c), na potência recebida, baseado em [24].

Dos resultados mostrados na Figura 4 verifica-se que à medida que a distância entre o emissor e o recetor aumenta, a potência recebida diminui (Figura 4 (a)). O ângulo de incidência muda consoante a orientação do *smartphone*. Por exemplo, se o ângulo de incidência for igual a 0° , significa que o fotodíodo está direccionado de frente para o LED. À medida que o ângulo de incidência aumenta, a energia, a que os fotões atuam no recetor, diminui, o que resulta numa menor potência recebida (Figura 4 (b)). O mesmo acontece, se for aumentado o ângulo de irradiação, uma vez que o FOV diminui (Figura 4 (c)). Estes fatores têm impacto importante, na garantia de uma alta relação sinal-ruído (SNR), no acesso da rede VLC e no controlo das interferências entre as células.

2.6 Ruído Recebido e SNR

Segundo [14], existem três grandes fontes de ruído num sistema VLC, em ambientes interiores, nomeadamente, o ruído proveniente do ambiente, ruído de *Poisson* (*shot noise*) e ruído térmico (*thermal noise*). O ruído do ambiente em questão está relacionado com a radiação solar (provenientes das janelas e portas etc..) e com outras fontes de luz como lâmpadas incandescentes ou fluorescentes, que não são utilizadas no sistema VLC. O ruído de *Poisson*, é devido à flutuação estatística do número de fotões captados pelo fotodetetor. Por fim, o ruído térmico é devido à pré-amplificação do ruído elétrico do fotodetetor.

O ruído proveniente do ambiente, que se traduz numa interferência DC, pode ser mitigado através da utilização de um filtro passa alto no recetor. Assim que os ruídos causados pela luz solar e fontes artificiais de luz forem filtrados, a relação sinal-ruído (SNR), pode ser calculada através da potência recebida no fotodetetor (P_r), do ruído de *Poisson* (σ_{shot}) e do ruído térmico ($\sigma_{thermal}$), como se verifica na Equação 2.1 representada abaixo.

$$SNR_{(dB)} = \frac{P_r^2}{(\sigma_{shot})^2 + (\sigma_{thermal})^2} \quad (2.1)$$

SNR : Relação Sinal- Ruído, em dB ;

P_r : Potência recebida, em dBm ;

σ_{shot} : *Shot noise*, em dB ;

$\sigma_{thermal}$: *Thermal noise*, em dB .

Tanto o ruído de *Poisson*, como o ruído térmico são calculados de acordo com [26, 27] e estão dependentes da área do recetor, da temperatura e da luz do ambiente fechado em questão. Desta forma, qualquer um destes ruídos pode influenciar o desempenho global do recetor VLC.

2.7 Shadowing

O recetor VLC, num espaço fechado, pode ser obscurecido por diferentes objetos, como se ilustra na Figura 5, baseada em [28]. O descrito pode causar descontinuidades na iluminação e, conseqüentemente, interrupção na comunicação. Assim, segundo [29], uma das formas de ultrapassar este problema é ter vários LEDs separados, especialmente, no ambiente em questão.

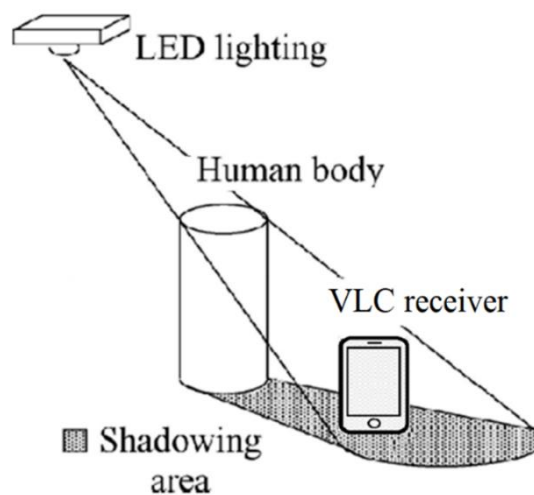


Figura 5 - Recetor VLC obscurecido pelo corpo humano, baseada em [28].

Analisando a Figura 5, é possível observar uma área de sombra (*shadowing area*) resultante da obstrução da iluminação e comunicação entre uma fonte LED (*LED lighting*) e um recetor VLC (*VLC receiver*), fotodetector, proveniente de um obstáculo. Este obstáculo, pode ser simplesmente o tronco de uma pessoa (*human body*), um objeto, entre outros.

De acordo com [30], dos dois modelos mais usados num sistema VLC, com linha de vista (LOS) e sem linha de vista (NLOS), apenas o LOS sofre desta perturbação na comunicação entre o transmissor e o recetor. No primeiro modelo, a transmissão da comunicação e iluminação é realizada através de uma linha de vista direta, sem obstáculos, com um feixe mais diretivo, onde as paredes e as múltiplas reflexões não são consideradas. Conclui-se que o modelo LOS sofre de *shadowing* na transmissão, sendo usado para canais que precisam de atingir altos valores de débito binário. Já no NLOS, que representa um modelo mais prático e real do ambiente envolvente, não existe uma linha de vista, direta entre o transmissor e o recetor, devido à contabilização de obstáculos. Desta forma, este modelo não sofre de *shadowing*, mas devido à contabilização das múltiplas reflexões, quando o feixe do transmissor incide sobre os obstáculos e reafecta para múltiplas direções, sofre claramente o efeito de múltiplos caminhos (*multipath effect*).

2.8 Métodos de modulação para um sistema VLC

2.8.1 *Dimming e Flickering*

Uma diferença importante entre um sistema VLC e RF consiste no facto de a comunicação através de luz visível não poder ser codificada em fase, nem em amplitude [29]. Deste modo, as técnicas de modulação em amplitude e em fase não podem ser usadas, uma vez que a informação tem de ser codificada, variando a intensidade da luz emitida.

Num sistema VLC, ao contrário de outras comunicações, não basta que a modulação atinja valores altos de transferência de informação, tem que cumprir os requisitos de preservação da luz para os utilizadores. Estes requisitos, podem ser caracterizados segundo a informação de duas propriedades, *dimming e flickering*.

Relativamente ao escurecimento (*dimming*), com o avanço da tecnologia é possível escurecer o LED para níveis arbitrários, diminuindo a intensidade do mesmo. Na Figura 6, baseada em [14], mostra-se a variação da luz sentida pelo olho humano consoante diferentes intensidades de iluminação, medidas num determinado ambiente, devido à capacidade de contração dos músculos da pupila.

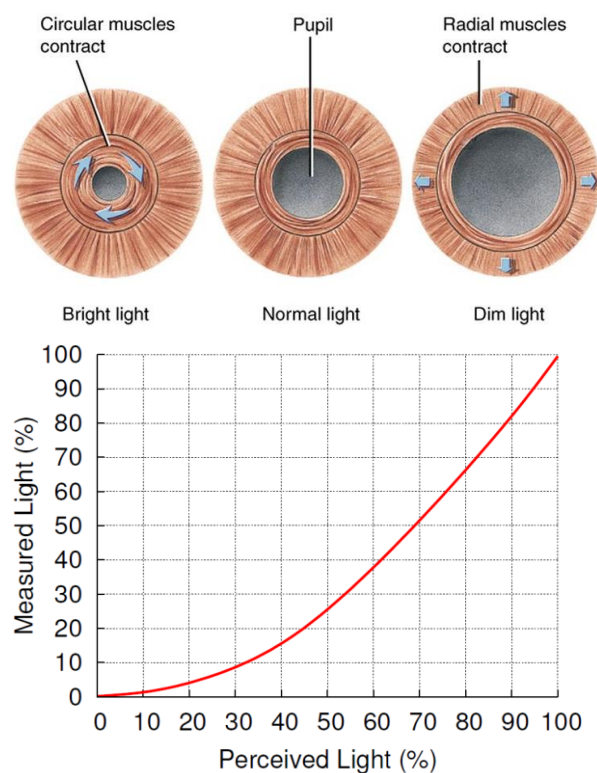


Figura 6 - Variação da luz sentida pelo olho humano consoante diferentes intensidades de iluminação, medidas num determinado ambiente, devido à capacidade de contração dos músculos da pupila, baseada em [14].

Olhando para a Figura 6, pode-se verificar que a luz regulada a 1%, para o olho humano é perceptível 10 %, devido à capacidade de se adaptar em ambientes com pouca iluminação, através da contração dos músculos da pupila, permitindo assim entrar mais ou menos luz para o seu interior. Isto é importante num sistema VLC uma vez que o utilizador pode escolher o nível

arbitrário de escurecimento, dependendo da aplicação, ou se deseja poupar energia. No entanto, as comunicações não podem ser afetadas pelo *dimming* [14].

Assim, a informação deve ser modulada de uma forma que suporte um nível desejado de *dimming* pelo utilizador.

Por outro lado, a luz intermitente (*flickering*), é incómoda e pode causar graves mudanças psicológicas nos humanos [31]. Por estas razões, é necessário que as mudanças de intensidade da luz ocorram a uma taxa mais rápida do que o olho humano consegue perceber, maior que 200 Hz [19].

Resumindo, qualquer modulação deve mitigar o efeito indesejado de *flickering*, fornecendo informação a uma taxa elevada.

2.8.2 Modulações

Existem três principais modulações que podem ser usadas num sistema baseado em comunicação através de luz visível: *On-Off Keying* (OOK), *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) e *Color Shift Keying* (CSK). Na Tabela 1 [14], resumem-se as principais características destas modulações.

Tabela 1 - Principais modulações num sistema VLC e as suas características, [14].

Modulação	Débito binário	Suporte de <i>Dimming</i>	Problema do <i>Flickering</i>	Comentários
OOK	Baixo a Moderado	Sim	Alta	Complexidade de implementação baixa, tanto no transmissor, como no recetor
OFDM	Alto	Não	Baixa	Complexidade alta, devido ao LED não ser linear; suporte de MIMO
CSK	Alto	Sim	Baixa	Requer um <i>tri</i> -LED (RGB); melhora o acesso de multiutilizador

2.8.2.1 *On-Off Keying* (OOK)

Na modulação OOK, a informação 1 e 0 é transmitida, desligando e ligando o LED, respetivamente. Contudo, no estado *OFF*, o LED não está completamente desligado, mas a intensidade da luz é reduzida. Se for utilizada esta modulação com um transmissor LED azul com fósforo para produzir luz branca, a resposta lenta a fósforo limita a largura de banda a alguns MHz.

Recentemente, a maior disponibilidade dos LEDs tricromáticos (RGB), que combinam os três comprimentos de onda da luz vermelha, verde e azul para produzir luz branca, permitiu obter tempos de resposta mais rápidos que o LED azul revestido com fósforo. No entanto, são necessários três *drivers* para controlar os circuitos distintos para as diferentes cores.

De acordo com [32], foi feita uma abordagem, em que só a luz vermelha do LED RGB era modulada e usada para transferência de dados, enquanto as outras duas cores eram usadas para fornecer uma corrente constante para a iluminação. Aplicando esta abordagem com uma modulação (*Non-Return-to-Zero*) NRZ-OOK e um recetor fotodiodo PIN, conseguiu-se atingir um débito binário de 477 Mbps [32].

Para além de um bom débito binário, é necessário fornecer suporte *dimming*, utilizando a modulação OOK. Portanto, pode-se fazê-lo redefinindo os níveis de ON e OFF, ou utilizando períodos de compensação. Em relação ao primeiro, para alcançar diferentes níveis de *dimming*, os níveis ON e OFF podem corresponder a diferentes intensidades de luz. A vantagem desta técnica é que permite obter diferentes níveis de *dimming*, sem qualquer subcarga adicional na comunicação. No entanto, para níveis de *dimming* elevados, a distância de comunicação fica reduzida. Outro problema que surge quando se usam níveis ON/OFF de intensidade baixas, está relacionado com os baixos níveis de corrente usados para baixar a intensidade emitida e que são suscetíveis de alterar a percepção das cores, o que manifestamente afeta o bom funcionamento dos LEDs, ao baixar os níveis de corrente a que operam. Em consequência, a renderização das cores é afetada, mudando a cor de emissão dos mesmos [33].

Segundo [34], para suportar diferentes níveis *dimming* também se pode, mantendo os níveis de ON e OFF da modulação, adicionar períodos de compensação, quando a fonte LED está totalmente ligada (períodos ON) ou desligada (períodos OFF). A duração dos períodos depende dos níveis desejados de *dimming*. Por exemplo, se o nível desejado for superior a 50%, vão ser adicionados períodos ON, e se o nível desejado de *dimming* for inferior a 50 %, são adicionados períodos OFF. Contudo, o suporte de *dimming* através desta técnica, reduz as velocidades de transferência de dados, mas a distância de comunicação permanece a mesma, uma vez que as intensidades dos sinais ON/OFF da modulação também não se alteram.

Apesar de se conseguir, através destas técnicas, utilizar a modulação OOK com suporte a diferentes níveis de *dimming*, ainda não foi implementada uma maneira de resolver o problema de *flickering* ao usar esta modulação.

2.8.2.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

A multiplexação por divisão de frequências ortogonais tem sido muito adotada nas comunicações RF, devido à vantagem de resolver problemas de interferência entre símbolos diferentes (inter-simbólica) e o desvanecimento de multipercurso.

A utilização da modulação OFDM para um sistema VLC reduz as interferências inter-simbólicas e não requer um equalizador complexo. No entanto, o suporte de *dimming* é limitado e, devido à falta de linearidade, entre a corrente e a luz emitida pelo LED, a implementação desta modulação torna-se difícil [35]. Contudo, apesar destes problemas, a modulação OFDM para VLC tem um grande potencial, uma vez que permite atingir um débito binário até 3 Gbps [17], usando apenas um único LED como transmissor, e oferece suporte para *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

De maneira a fornecer iluminação suficiente, é necessário usar vários LEDs que podem ser considerados como múltiplos transmissores, que permitem a comunicação MIMO, utilizando luz visível. Estes múltiplos *inputs* e múltiplos *outputs*, num sistema VLC, podem ser usados para aumentar a eficiência espectral. Contudo, devido à falta de diversidade espacial¹, em ambientes fechados, entre o transmissor e o recetor, limitam-se os ganhos de transferência.

¹Existência de múltiplos caminhos diferentes, devido à diversidade da natureza.

2.8.2.3 Color Shift Keying (CSK)

A modulação CSK, proposta pelo grupo IEEE 802.15.7 [19], especificamente desenhada para o uso em sistemas VLC, veio superar os problemas de baixo débito binário e garantir uma potência luminosa constante, ao longo do tempo, reduzindo o efeito indesejado de *flickering*. Também suporta o *dimming*, através da variação da corrente do LED. Esta modulação, usa a intensidade das três cores, do LED branco tricromático (RGB), para modular o sinal transmitido, e depende do diagrama de cromaticidade (Figura 7 [14]), definido pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), em 1931 [36].

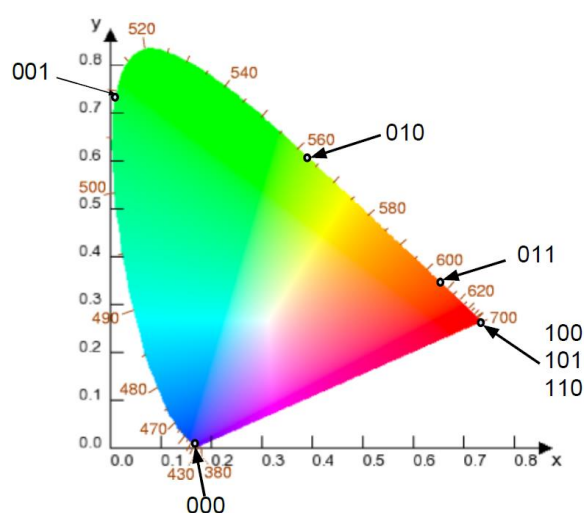


Figura 7 - Representação do diagrama de cromaticidade definido pela CIE em 1931 e dos sete códigos de cores, correspondentes aos sete centros das bandas, que dividem o espectro da luz visível, [14].

Para melhor percepção da constituição do diagrama de cromaticidade da Figura 7, foram apresentados, na Tabela 2 [37], os sete códigos de cores, correspondentes aos sete centros das bandas, que dividem o espectro da luz visível, relacionando, através das colunas x e y, os códigos com as coordenadas de cromaticidade, usadas na modulação CSK.

Tabela 2 - Os sete códigos de cores, correspondentes aos sete centros das bandas, que dividem o espectro da luz visível, [37].

Banda (nm)	Código	Centro (nm)	(x, y)
380-478	000	429	(0.169, 0.007)
478-540	001	509	(0.011, 0.733)
540-588	010	564	(0.402, 0.597)
588-633	011	611	(0.669, 0.331)
633-679	100	656	(0.729, 0.271)
679-726	101	703	(0.734, 0.265)
726-780	110	753	(0.734, 0.265)

Como se pode verificar na Tabela 2, o diagrama da Figura 7 mapeia todas as cores percebidas pelo olho humano em dois parâmetros cromáticos, x e y. Assim, a percepção da cor violeta, azul, ciano, verde, amarela, laranja e vermelha, através da transmissão de luz, com

o centro de comprimento de onda em 429, 509, 564, 611, 656, 703 e 753 nm, respetivamente, proveniente do LED branco RGB, contém as coordenadas de cromaticidade, (0.169, 0.007), (0.011, 0.733), (0.402, 0.597), (0.669, 0.331), (0.729, 0.271), (0.734, 0.265) e (0.734, 0.265), que correspondem ao código binário, 000, 001, 010, 011, 100 e 111, respetivamente.

Por razões ilustrativas, foi assumida a constelação triangular CSK (110, 010, 000), representada na Figura 8 [14].

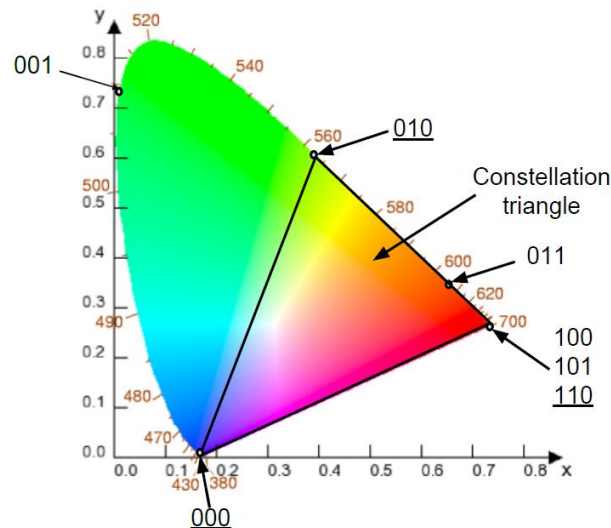


Figura 8 - Constelação triangular RGB (110, 010, 000), [14].

Tendo a constelação triangular RGBV (110, 010, 000) da Figura 8, o mapeamento dos bits de informação, para valores cromáticos, pode ser representado nas constelações triangulares 4CSK, conforme se apresenta na Figura 9 (a), 8CSK, na Figura 9 (b) e 16CSK, na Figura 9 (c).

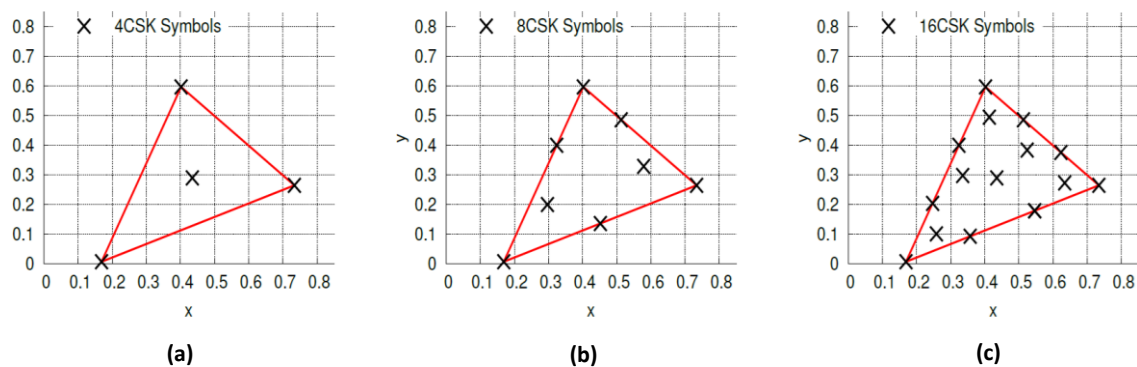


Figura 9 - Modulação CSK utilizando 4 símbolos (a), 8 símbolos (b) e 16 símbolos (c), representada numa constelação triangular RGB (110, 010, 000), [14].

Como se pode observar na Figura 9 [14], a determinação da posição dos símbolos na constelação requer que a distância entre eles seja maximizada para minimizar a interferência

inter-simbólica. No entanto, quanto maior for o número de símbolos, maior o débito binário possível de alcançar. É necessário que os símbolos estejam distribuídos igualmente na constelação triangular, para que, apesar dos símbolos transmitidos serem diferentes, a luz resultante da combinação das três cores seja percebida como branca pelo olho humano.

Como se pode verificar na Figura 10 e segundo [38], utilizando um *tri*-LED (RGB), é possível implementar a técnica de *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Esta técnica de multiplexagem é muito utilizada nas comunicações através de fibra ótica. Desta forma, modulando separadamente a informação nas três cores, que depois é multiplexada originando a luz branca, é possível obter uma velocidade de transferência de dados de 803 *Mbps* [38].

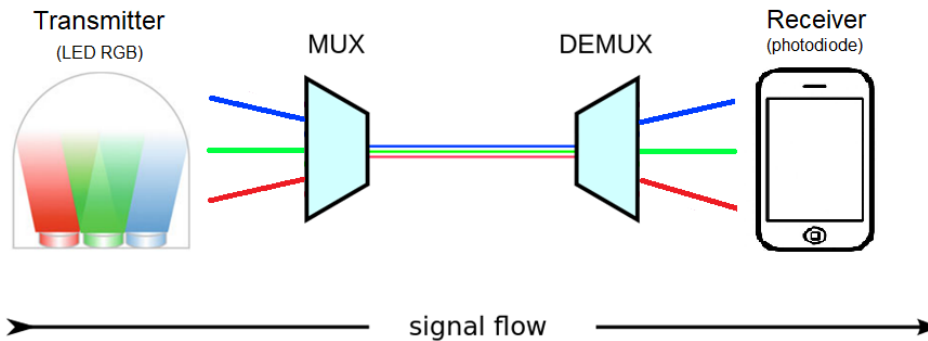


Figura 10 - Implementação da técnica de WDM, utilizando um LED RGB, como transmissor, e um fotodíodo, implementado num *smartphone*, ou utilizando as câmaras do mesmo, como recetor.

Por fim, segundo [39], a utilização de quatro LEDs (Azul, Ciano, Amarelo e Vermelho), permite obter uma constelação de forma quadrilátera (QAM). Desta forma, comparando com a constelação CSK com 3 LEDs, é possível obter maior eficiência energética e menor interferência inter-simbólica.

2.9 Medium Access Control (MAC)

Através da aplicação de cenários VLC, podem-se identificar as diferentes topologias da camada de ligação, que precisam de ser suportadas pelos protocolos MAC [14]. Deste modo, como se pode verificar na Figura 11 [19], o grupo IEEE 802.15.7 propôs três diferentes topologias da camada de ligação, para as comunicações utilizando a luz visível, *Peer-to-peer* (P2P), *Star* e *Broadcast*.

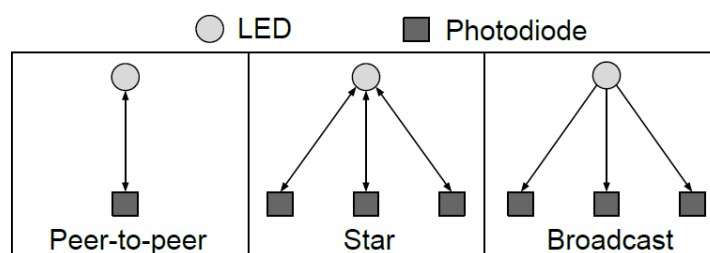


Figura 11 - Topologias das camadas de ligação VLC, [19].

A topologia *Peer-to-Peer*, ou em português, a ligação ponto a ponto, envolve um dispositivo que age como coordenador (*master*) da ligação entre dois dispositivos. Ambos

conseguem comunicar um com o outro tanto o cliente com o *master (uplink)*, como o *master* com o cliente (*downlink*).

A topologia *Star*, ou em português, a ligação em estrela, abrange vários dispositivos, ligados a um dispositivo, que age como coordenador. O caso típico de uso desta topologia é a rede de acesso sem fios VLC. A arquitetura MAC desta topologia é de difícil implementação, uma vez que envolve várias comunicações bidirecionais, utilizando o mesmo *master*.

A topologia *Broadcast*, ou em português, a ligação de transmissão, é diferente da topologia anterior, uma vez que os dispositivos dos clientes só podem receber informação do *master (DL)* e não podem enviar informação para o *master (UL)*.

Como estamos num cenário de comunicação, através de luz visível, o *master* é o LED transmissor, que emite luz branca, e o dispositivo dos clientes é um fotodiodo implementado no *smartphone* ou na câmara fotográfica do mesmo.

2.10 Coordenação das células

Segundo [19], no intuito de coordenar as operações das diversas células (LEDs) e dos dispositivos móveis (fotodiodos), a que a elas estão ligados, é necessário ligar um controlador local aos vários LEDs transmissores, como se encontra representado na Figura 12. O dispositivo é associado, entre todas as células vizinhas, à célula mais próxima que tiver maior sinal. Assim, para controlar a interferência entre as células, os transmissores não usam a mesma banda de frequência ao mesmo tempo (*frequency hopping*), nas possíveis células interferentes.

Se forem utilizados LEDs RGB, é possível fornecer várias cores de bandas diferentes, que podem ser usadas para *frequency hopping*. No entanto, pode torna-se dispendioso ligar um controlador a tantos LEDs, tirando a grande vantagem da implementação de um sistema VLC, que é a reutilização das infraestruturas já existentes.

A interferência entre as células pode causar uma degradação severa no SINR, para os utilizadores nesta posição. Por exemplo, numa sala com LEDs transmissores, implementados em cada uma das suas extremidades, o utilizador que se encontrar no meio da sala vai estar sujeito a um baixo SINR e, consequentemente, a um débito binário também baixo.

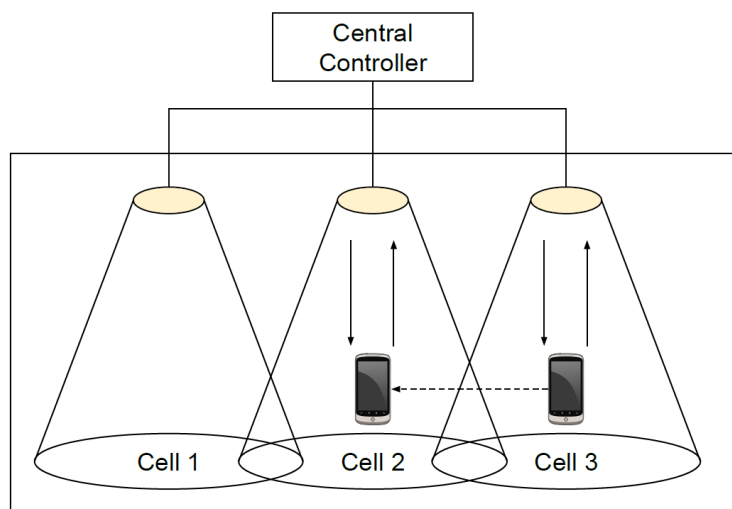


Figura 12 - Ligação de um controlador local a 3 LEDs transmissores. A mobilidade dos dispositivos pode ser gerida pelo controlador local, que coordena as operações das células VLC, [19].

3 º Capítulo

Implementação VLC para navegação

3.1 Introdução

Neste capítulo, vão ser apresentadas algumas implementações de um sistema VLC [15, 40, 13, 41], já desenvolvidas pelas orientadoras desta tese, inicialmente, utilizando apenas uma topologia, quadrangular, contudo com uma localização tridimensional. Será, ainda, apresentado um sistema VLC, utilizando duas topologias, quadrangular e hexagonal, através de uma localização bidimensional. Para ambos os sistemas, vão ser utilizados um LED branco RGBV [6], como transmissor, um fotodíodo PIN/PIN, $p-i'(a\text{-SiC:H})\text{-}n/\pi(a\text{-Si:H})\text{-}n$ [7, 8], como recetor, e a modulação OOK para codificar a informação transmitida pelo LED.

3.2 Sistema de navegação guiada utilizando a topologia quadrangular

3.2.1 Cenário VLC proposto

De forma a simular o funcionamento da localização do recetor utilizando a comunicação através de luz visível, em meios *indoor*, foi proposto o cenário de um centro comercial que usa a topologia quadrangular, como representado na Figura 13 do artigo [40].

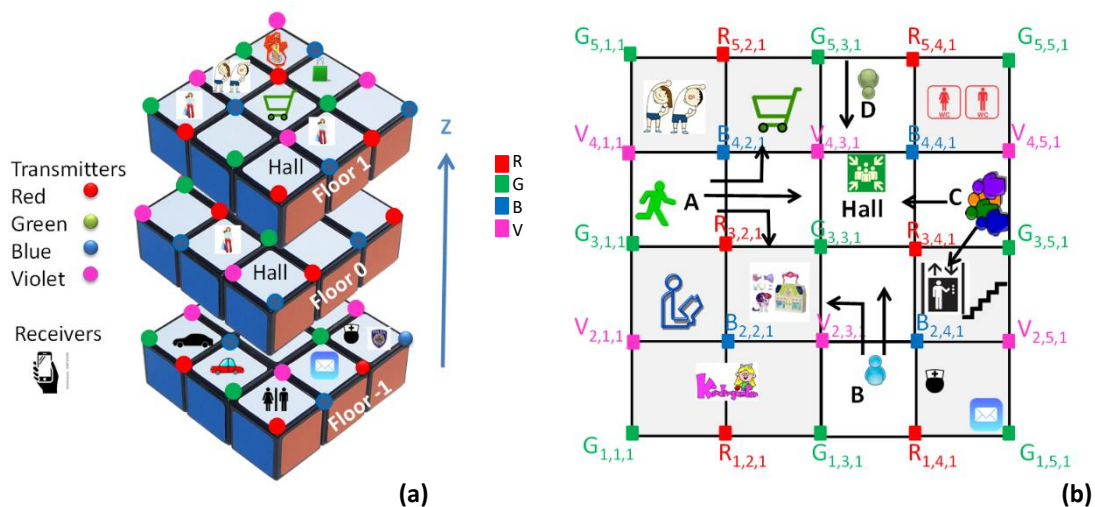


Figura 13 - Infraestrutura ótica e esboço *indoor*, [40]. (a) Planta, 3D virtual, com a informação do número de pisos e a localização respetiva dos LEDs. (b) Planta 2D da localização de cada LED do piso 1.

Assim sendo, dependendo do tempo disponível o utilizador pode-se encontrar com um amigo, fazer compras, ir a um restaurante ou simplesmente descansar. Quando o utilizador se encontra no centro comercial, o mesmo notifica a sua presença e localização (x,y,z) ao controlador local (CM), que se encontra sempre no centro de cada quadrado (#1), pedindo ajuda para encontrar o caminho mais curto e adequado aos seus interesses. Cada utilizador tem um código que o identifica e envia uma mensagem de *request* ao CM com os seus pontos de interesse, no tempo disponível. É importante mencionar, que sempre que o utilizador muda de piso, o mesmo tem de notificar o CM. Ao longo do seu caminho, o utilizador é informado como chegar ao seu destino.

Cada célula pode ser identificada, através do canto superior esquerdo do quadrado, como $C_{(i,j,k)}$, onde i , j e k correspondem, respetivamente, às linhas, colunas e o nível do piso. Cada vértice do quadrado ($X_{(i,j,k)}$) é constituído por um LED (X) que transmite uma das quatro cores (RGBV), a sua posição horizontal (linha (i) e coluna (j)) e vertical (piso (k)).

Como se pode verificar na Figura 13, o utilizador A, que se encontra na entrada do piso 1 do centro comercial, célula $C_{(4,1,1)}$, pode deslocar-se, por exemplo para o supermercado, célula $C_{(5,2,1)}$, para o jardim infantil, célula $C_{(3,2,1)}$, e encontrar-se com um dos seus amigos B, C e D, que se encontram, respetivamente, nas células $C_{(5,3,1)}$, $C_{(4,4,1)}$ e $V_{(2,3,1)}$.

3.2.2 Regiões *Footprint* da topologia quadrangular

Segundo [13], a distância estimada, entre o LED e o recetor, é usada para originar um círculo (célula) à volta de cada transmissor, em que cada dispositivo tem de estar localizado de forma a receber a informação, codificada, transmitida pelo LED.

O dispositivo móvel recebe múltiplos sinais, encontra a origem das coordenadas recebidas e guarda-as como pontos de referência. Para exemplificar, foram representadas na Figura 14 [40] a célula $C_{2,1}$ em 3D com os diferentes pisos -1, 0, 1 e 2 (Figura 14 (a)) e a planta 2D da região de *footprints* e a localização dos LEDs de cada quadrado do piso 1 (Figura 14 (b)).

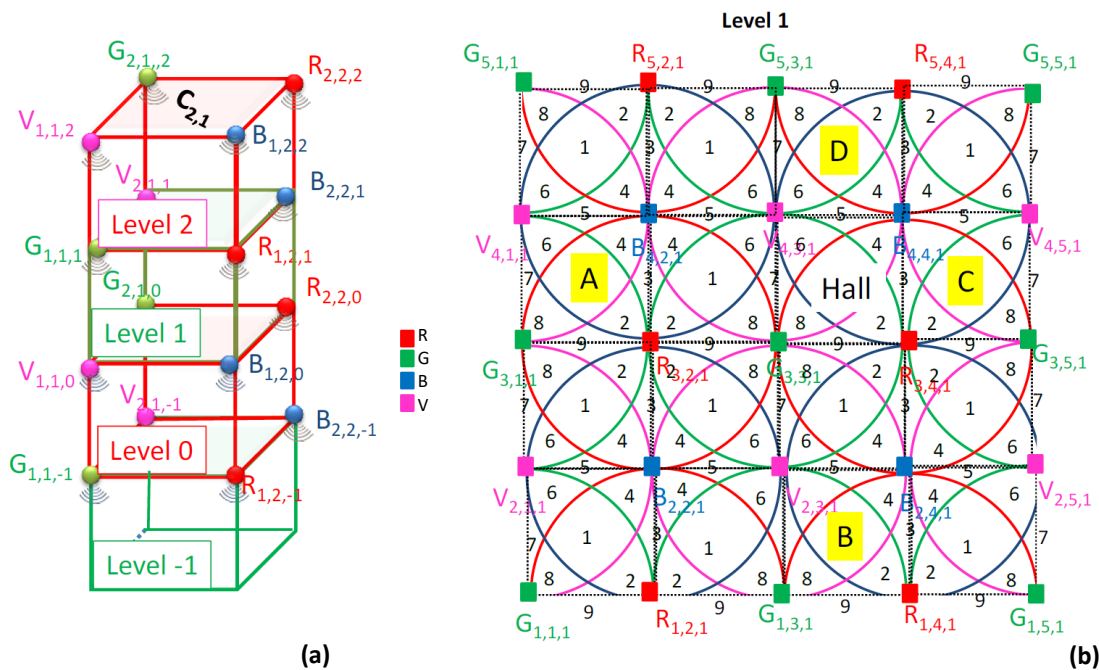


Figura 14 - Representação do cenário proposto, [40]. (a) Planta mais abrangente, para o conjunto de LEDs presentes na ilustração 3D do centro comercial, constituído por 4 andares (RGBV são as cores moduladas para transmitir a informação em cada piso do edifício). (b) Planta 2D da região de *footprints* de cada quadrado do piso 1.

Como foi usada a topologia quadrangular neste cenário, existem nove pontos de referência/ regiões *footprint*, em cada quadrado. Na Tabela 3 [41], resumem-se as diferentes regiões *footprint* resultantes da sobreposição dos diferentes sinais óticos.

Tabela 3 - Regiões *Footprint* da topologia quadrangular, baseada em [41].

Regiões <i>Footprint</i>	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Topologia quadrangular	RGBV (1111)	RGB (1110)	RB (1010)	RBV (1011)	BV (0011)	GBV (0111)	GV (0101)	RGV (1101)	RG (1100)

Como se pode constatar na Tabela 3, a região *footprint* #1 ocorre quando o dispositivo móvel se encontra no centro do quadrado, uma vez que recebe informação dos quatro LEDs de cores diferentes, RGBV (1111), de cada vértice do quadrado. As restantes regiões *footprint* seguem a mesma lógica.

3.2.3 Transmissor e Recetor VLC

Dois dos requisitos cruciais para o bom funcionamento de um sistema VLC é a não alteração da iluminação proveniente do LED devido ao uso em simultâneo com a comunicação e a obrigatoriedade do recetor VLC de consumir pouca energia, para poder ser alimentado pela bateria de um dispositivo móvel e, ao mesmo tempo, permitir comunicações através de luz visível a velocidades elevadas. Por estes motivos, foram escolhidos um LED branco RGBV [6] como transmissor e um fotodíodo PIN/PIN, p-i'(a-SiC:H)-n/pi(a-Si:H)-n [7, 8], como recetor.

Cada LED é utilizado para transmitir, em simultâneo, luz branca e informação em *downlink*. O transmissor forma uma única célula/ponto de acesso (AP) no qual o dispositivo móvel tem de pertencer para receber a informação. Esta é codificada, modulada e convertida em sinais luminosos pelo transmissor.

A utilização de um LED branco RGBV permite modular a informação, separadamente, nos quatro comprimentos de onda ($\lambda_R=626\text{ nm}$, $\lambda_G=530\text{ nm}$, $\lambda_B=470\text{ nm}$ e $\lambda_V=390\text{ nm}$). Assim, é possível implementar a técnica de WDM no recetor, *frequency hopping*² e, conseqüentemente, assegurar débitos binários mais elevados.

O fotodíodo PIN/PIN oferece sensibilidade elevada na zona do visível e produz um sinal elétrico relacionado com a intensidade do sinal ótico recebido, transformando, assim, sinais luminosos em sinais elétricos [13]. A sua estrutura está ilustrada na Figura 15 [42].

²permite controlar a interferência entre as células, uma vez que os transmissores não usam a mesma banda de frequência ao mesmo tempo, nas possíveis células interferentes, mas nas células não interferentes já é possível a reutilização da mesma.

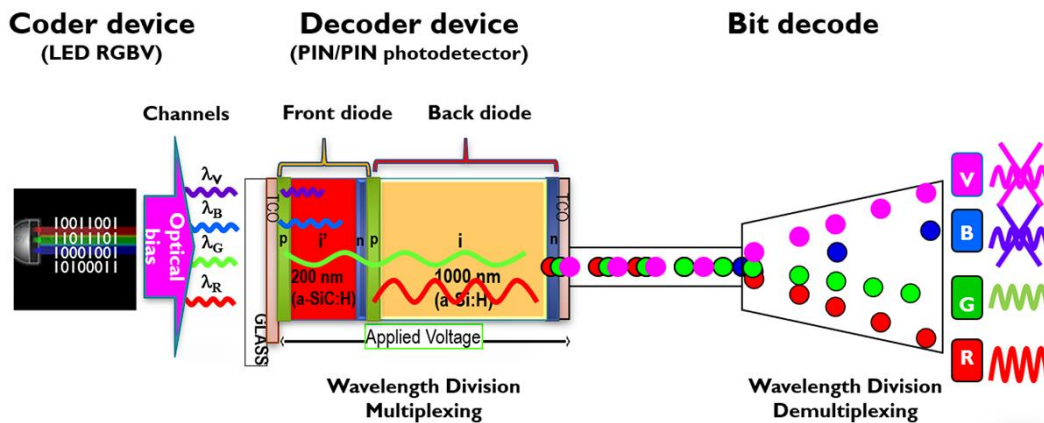


Figura 15 - Implementação da técnica de WDM, utilizando um LED RGBV como transmissor de luz branca e informação em *downlink* e um fotodíodo PIN/PIN como recetor da mesma, [42].

Sob iluminação estacionária, o dispositivo comporta-se não só como fotodetector mas também como um filtro ativo com a sensibilidade seletiva ao comprimento de onda incidente [42]. A radiação de comprimento de onda superior a 500 nm , vermelho e verde, como têm um ganho maior, são amplificadas, já a radiação de comprimento de onda inferior a 500 nm , azul e violeta, que têm um ganho menor são atenuadas [15]. Isto acontece porque o coeficiente de absorção varia na razão inversa do comprimento de onda e porque o fotodetector constituído por uma heteroestrutura PIN/PIN baseada em a-SiC:H e a-Si:H tem zonas de absorção distintas na região do visível. Assim sendo, segundo [13, 7, 8], os sinais de comprimento de onda mais curto vão ser absorvidos pela parte frontal do fotodíodo, ou seja, a estrutura PIN baseada em a-SiC:H. Já os sinais de maior comprimento de onda, como o vermelho, são absorvidos pelo fotodíodo PIN posterior baseado em a-Si:H, e o verde, pela estrutura frontal e posterior.

Em suma, o dispositivo multiplexa os diferentes canais óticos, realiza diferentes processos de filtragem e desmultiplexa os sinais óticos codificados para recuperar a informação transmitida pelos LEDs.

3.2.4 Técnicas de codificação e decodificação

De acordo com [13], foi utilizada a modulação (*On-Off Keying*) OOK para codificar a informação transmitida pelo LED. Nesta modulação, os dados dos *bits* 1 e 0 são codificados, ligando e desligando o LED, respetivamente.

Para criar um protocolo de comunicação e ultrapassar algumas restrições da tecnologia, foram criadas duas estruturas, com 64 *bits* de informação codificada, que estão representadas na Tabela 4, baseada em [40].

Tabela 4 - Representação dos *bits* de 5 e 6 sub-blocos dos 2 blocos de 64 *bits* de informação codificada, baseada em [40].

<i>Sync</i>	<i>CM</i>	$ID_{(x,y,z)}$	<i>PIN1</i> (<i>User ID</i>)	<i>PIN2</i> (<i>Meeting code</i>)	<i>Wayfinding Data</i>	Total de <i>bits</i>
5 <i>bits</i>	-	(10 <i>bits</i>) (3+3+4 _(+/-z)) Ex. (4 _(+/-z)): 1xxx negativo 0xxx positivo	(4 <i>bits</i>) número decimal de 0-9, por canal	(4 <i>bits</i>) 0 se for realizado nenhum encontro	41 <i>bits</i>	64 <i>bits</i>
	3 <i>bits</i>				38 <i>bits</i>	

Desta forma, foram representados os *bits* de 5 sub-blocos, do bloco de 64 *bits* de informação codificada. O sub-bloco de sincronismo (*Sync*) contém 5 *bits*. Este bloco é comum a todos os canais. O $ID_{(x,y,z)}$ é constituído por 10 *bits*, em que 6 *bits* são usados para representar a posição horizontal (*x*, *y*) de cada transmissor, 3 *bits* para a linha (*x*) e 3 *bits* para a coluna (*y*) e 4 *bits* (3 *bits* mais 1 *bit* para contabilizar o sinal negativo ou positivo da coordenada *z*) para representar a posição vertical (*z*), ou seja, o piso. O sub-bloco para identificar o utilizador (PIN_1) é constituído por 4 *bits* em cada canal, como por exemplo, o utilizador 9119 [(R)-1001, (G)-0001, (B)-0001, (V)-1001]. O sub-bloco *PIN 2* é constituído por 4 *bits* e indica o código de encontro, que caso não se realize fica com o valor nulo. Para completar o bloco de informação, de 64 *bits*, os seus últimos 41 *bits* estão reservados para o sub-bloco de informação adicional (*Wayfinding Data*), em que o último *bit* é de valor nulo, para representar a paragem da transmissão.

A representação dos *bits* de 6 sub-blocos é semelhante à anterior, contendo apenas diferenças nos sub-blocos controlador local (*CM*) e *Wayfinding Data*, que têm 3 e 38 *bits*, respetivamente. Posto isto, se o sub-bloco *CM* tiver o valor de 1, significa que existe intervenção do controlador local. Caso contrário, o mesmo não intervém e o *CM* contém o valor de 0.

Na Figura 16 [40], está ilustrada a codificação de informação, num determinado intervalo tempo, com as duas estruturas de 64 *bits* apresentadas na Tabela 4. Nas Figuras 16 (a) e (b) estão representados, respetivamente, os *bits* de 5 sub-blocos, transmitidos pelos LEDs, e de 6 sub-blocos, transmitidos pelo controlador local.

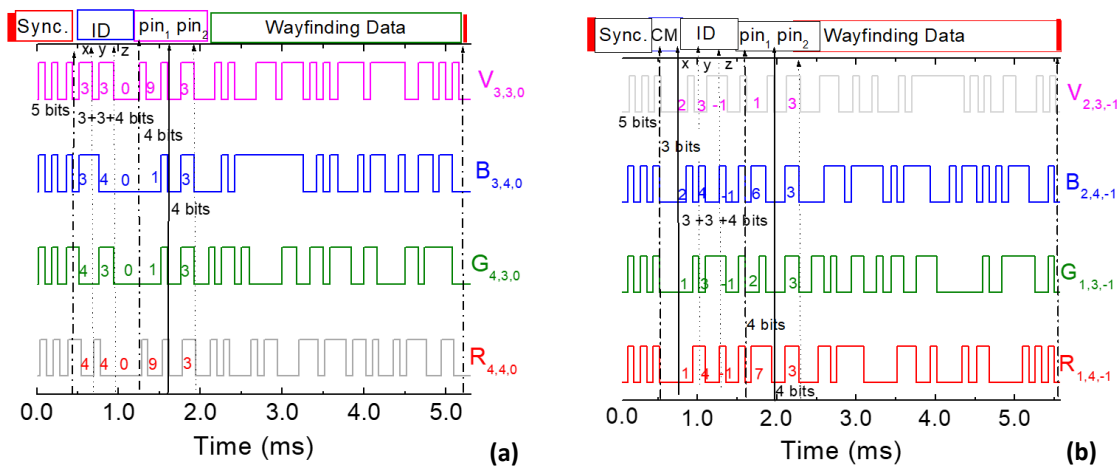


Figura 16 - Representação da codificação de informação, no mesmo intervalo de tempo, transmitida pelos LEDs (a) e pelo controlador local (b), [40].

Da ilustração mostrada na Figura 16 (a) verifica-se a codificação da informação transmitida pelos LEDs, $R_{(4,4,0)}$, $G_{(4,3,0)}$, $B_{(3,4,0)}$ e $V_{(3,3,0)}$, do ponto de acesso $C_{(4,3,0)}$ e na Figura 16 (b), no mesmo intervalo de tempo, a codificação de uma mensagem transmitida pelo controlador local que se encontra no AP $C_{(2,3,-1)}$.

Na Figura 17 [40], apresentam-se os sinais transmitidos pelos LEDs e o sinal lido pelo fotodíodo do recetor. Através da sua análise, é possível descodificar a informação do sinal multiplexado, representado a vermelho, recebido pelo utilizador. A sua descodificação encontra-se representada no topo da ilustração e a curva de calibração, representada a azul, contabiliza todas as 16 possíveis combinações *on/off* dos quatro canais RGBV (2^4). Deste modo, é possível descodificar o sinal multiplexado, atribuindo os seus níveis aos da curva de calibração, e estes, a quatro dígitos em código binário, $[X_{(R)}, X_{(G)}, X_{(B)}, X_{(V)}]$. Se X for igual a 1, significa que o canal está ligado, e se for 0, está desligado. Por fim, depois de se descodificar os sinais multiplexados, a localização do recetor na rede é revelada (AP, ID da célula, *footprint*).

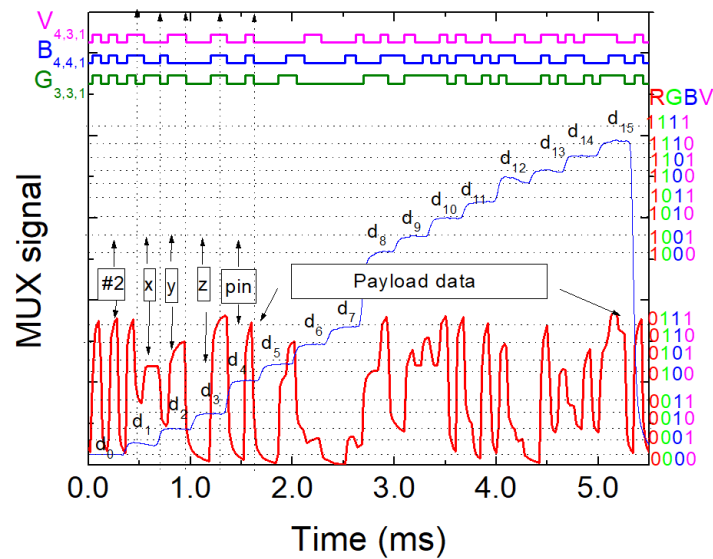


Figura 17 - Descodificação de um sinal multiplexado (MUX) e recebido pelo fotodíodo do utilizador, que se localiza na *footprint* #6 do AP $C_{(4,3,1)}$, [40].

Analisando o sub-bloco *Sync* da Figura 17, verifica-se que a sua amplitude máxima coincide com o nível d_7 da curva de calibração, a que corresponde o código binário [0111], o que significa que o utilizador só recebeu a transmissão dos canais verde, azul e violeta. De seguida, através da análise do sub-bloco ID, é possível verificar a participação dos LEDs, $G_{3,3,1}$ [011;011;0001], $B_{4,4,1}$ [100;100;0001] e $V_{4,3,1}$ [100;011;0001], na comunicação com o fotodíodo. Assim, conclui-se que o utilizador se encontra na região *footprint* #6 (Tabela 3) da célula $C_{(4,3,1)}$.

3.2.5 Resultados experimentais

Segundo [40], de modo a testar a localização do recetor, através de VLC, num espaço comercial utilizando a topologia quadrangular, foi proposto o caso em que o utilizador entra no piso 1, ponto de acesso $C_{(4,1,1)}$, *footprint* #7 (Figura 13(b) e 14 (b)). Este, ao mudar para a posição #1 da mesmo AP, em t_0 , pode deslocar-se para o supermercado ou o jardim infantil que se encontram, respetivamente, nos APs $C_{(5,2,1)}$ e $C_{(3,2,1)}$. Deste modo, o CM propõe ao utilizador os

dois caminhos que mais se adequam às necessidades do mesmo, que são as regiões *footprint* #5 e #9 do AP $C_{(4,2,1)}$. Como se pode verificar pela Figura 18 [40], para o utilizador chegar às posições anteriores, este tem de passar em t_1 e t_2 , respetivamente pelas regiões *footprint* #3 e #1, e em t_3 , pela #5 ou #9.

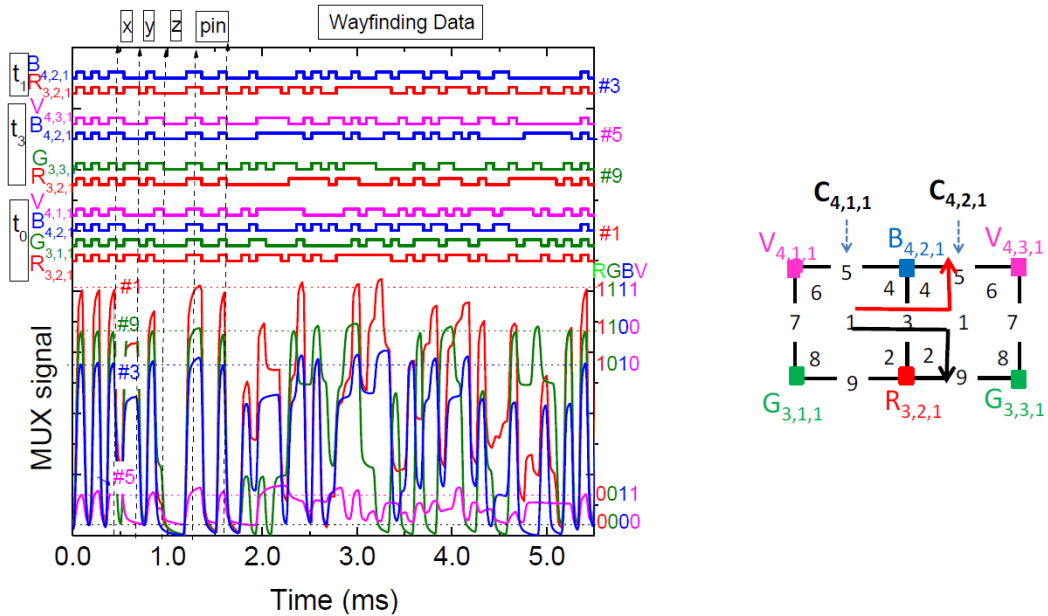


Figura 18 - Descodificação de um sinal MUX recebido pelo utilizador, que se localiza inicialmente na *footprint* #7 do AP $C_{(4,1,1)}$ do piso 1 e acaba na célula $C_{(5,2,1)}$ ou $C_{(3,2,1)}$, também do piso 1, [40].

Analisando a Figura 18, verifica-se que consoante o movimento do utilizador, nas posições sugeridas pelo CM, a informação do caminho muda. Deste modo, há canais que são adicionados ou perdidos, sempre que existe uma transição de *bits* de informação de navegação, entre dois conjuntos de dados consecutivos. Por exemplo, dois canais são adicionados, $G_{(3,1,1)}$ e $V_{(4,1,1)}$, no instante em que o recetor se move para trás, ou seja, das regiões *footprint* #3 para a #1 do mesmo AP, $C_{(4,1,1)}$, e os 4 dígitos em código binário passaram de [1010] para [1111]. No entanto, se o recetor andar para a frente, na direção do AP $C_{(4,2,1)}$, os canais adicionados têm as mesmas cores, mas diferentes ID's, ou seja, $G_{(3,3,1)}$ e $V_{(4,3,1)}$. Assim, apenas seguindo o caminho em sucessivos instantes, a direção do recetor é revelada, isto é, se o recetor for para a frente, significa passar de #3 para #7, se virar para a esquerda, corresponde passar para #5 e por fim, se virar para a direita significa passar para #9.

3.3 Sistema de navegação guiada utilizando as topologias quadrangular e hexagonal

3.3.1 Cenário VLC proposto

De forma a simular o funcionamento da localização do recetor utilizando a comunicação através de luz visível, em meios *indoor*, foi proposto, em [13], o cenário de um aeroporto, que usa as topologias quadrangular e hexagonal, conforme se mostra na Figura 19.

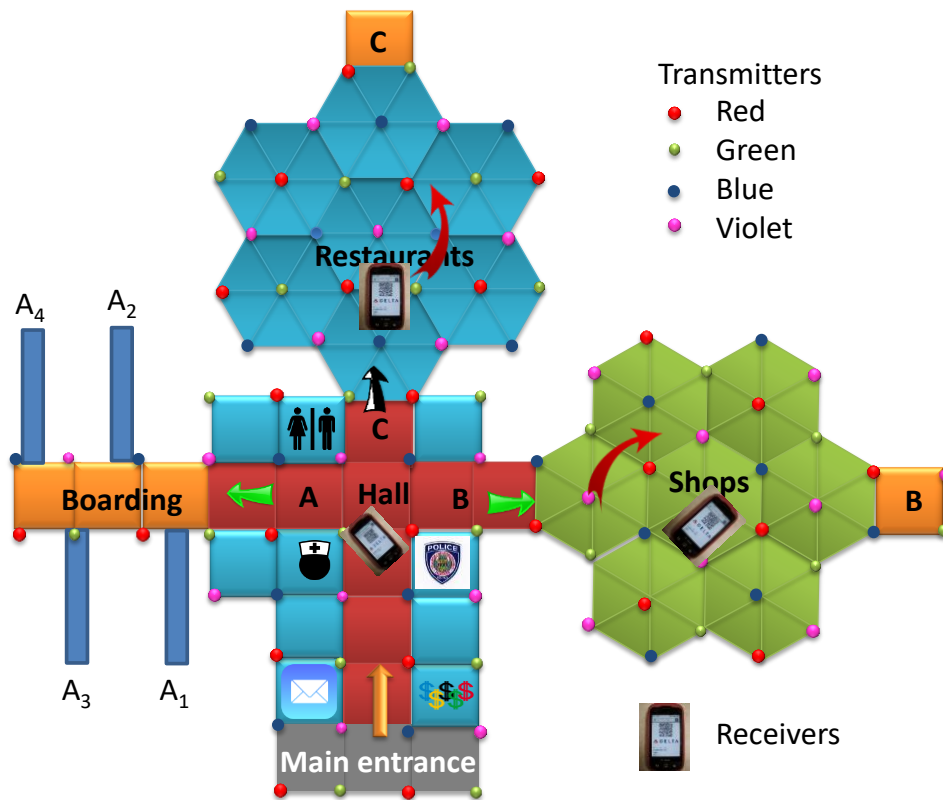


Figura 19 - Representação do cenário VLC proposto que usa a topologias quadrangular e hexagonal, [13].

Através da análise da Figura 19 [13], verifica-se que o recetor, depois do *check-in* (Entrada principal), pode ir, dependendo do seu tempo disponível, às compras (Terminal B), ao restaurante (Terminal C), descansar ou se não lhe restar tempo pode ir diretamente para a zona de embarque (Terminal A). A partir do momento que o utilizador efetua o *check-in*, este notifica a sua presença ao controlador local e solicita a sua ajuda mandando uma mensagem de *request* com os seus pontos de interesse, no tempo disponível. Durante o caminho do utilizador o CM pode aconselhar como chegar ao seu destino a tempo, uma vez que tem a capacidade de analisar as áreas mais frequentadas e pode tomar ações se essas áreas estiverem muito sobrelotadas, ou seja, se for necessário indica o caminho mais curto para outras áreas do mesmo interesse, mas com menor lotação.

3.3.2 Regiões *Footprint* das topologias quadrangular e hexagonal

A distância estimada, entre o LED e o recetor, é usada para originar um círculo (célula) à volta de cada transmissor, em que cada dispositivo tem de estar localizado de forma a receber a informação, codificada, transmitida pelo LED.

Na Figura 20 [13] estão ilustradas duas topologias, quadrangular (a) e hexagonal (b).

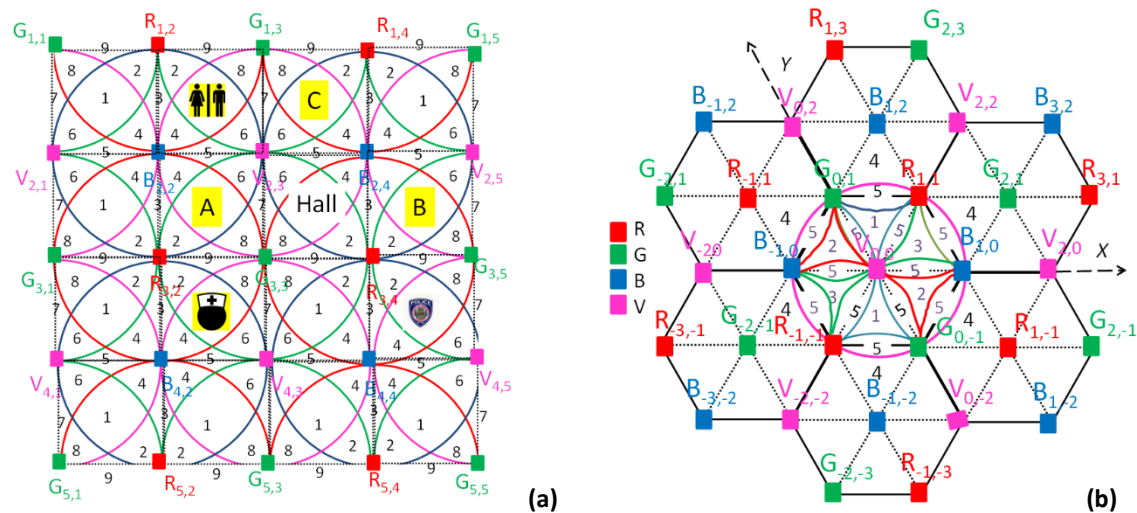


Figura 20 - Representação do cenário proposto, constituído pela localização dos LEDs e as respetivas regiões *footprint* de cada topologia. (a) Representação da zona do corredor, que utiliza a topologia quadrangular. (b) Representação da zona de restauração, do terminal C, que utiliza a topologia hexagonal, [13].

Analisando a Figura 20, verifica-se que a topologia hexagonal é mais precisa do que a quadrangular, uma vez que tem mais pontos de referência, o que permite determinar com maior exatidão a posição final do recetor. No entanto, ambas têm a sua utilidade, dependendo do meio em questão. A topologia hexagonal é mais indicada para locais em que o utilizador se pode mover mais “livremente”, como é o exemplo da Figura 20 (b), que representa a zona de restauração. Já a topologia quadrangular, é mais apropriada para locais cujos movimentos do utilizador são “ortogonais”, ou seja, horizontal, vertical ou em ambas as direções, como é o exemplo da Figura 20 (a), que representa a zona do corredor.

Como foram usadas as topologias quadrangular e hexagonal neste cenário, existem respetivamente, nove pontos de referência/regiões *footprint* em cada quadrado e dezoito em cada hexágono, ou seja, doze nos vértices e seis nos centros, dos seis triângulos equiláteros, que constituem um hexágono. Na Tabela 5 resumem-se as diferentes regiões *footprint*, nas duas topologias, resultantes da sobreposição dos diferentes canais óticos.

Tabela 5 - Regiões *Footprint* da topologia quadrangular e hexagonal, baseada em [41].

Regiões <i>Footprint</i>	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Topologia quadrangular	RGBV (1111)	RGB (1110)	RB (1010)	RBV (1011)	BV (0011)	GBV (0111)	GV (0101)	RGV (1101)	RG (1100)
Topologia hexagonal	RGV (1101)	GBV (0111)	RBV (1011)	RGB (1110)	RGBV (1111)	-	-	-	-

Como se pode constatar na Tabela 5 [13], a região *footprint* #5, da topologia hexagonal, ocorre quando o dispositivo móvel se encontra nas extremidades de cada triângulo, uma vez que recebe informação dos quatro LEDs de cores diferentes, RGBV (1111), de cada vértice do hexágono. Já na topologia quadrangular, a região *footprint* que contém a sobreposição dos 4 canais óticos, ocorre quando o dispositivo móvel se encontra no centro do quadrado, ou seja, em #1.

3.3.3 Resultados experimentais

Segundo [13], de maneira a testar a localização do recetor, através de VLC, num aeroporto utilizando as topologias quadrangular e hexagonal, foi proposto o caso em que o utilizador se encontra inicialmente no corredor, ponto de acesso $C_{(2,3)}$, *footprint* #1 (Figura 20 (a) e Figura 21) e a partir dessa posição, dependendo do seu destino, pode mover-se para três direções, ponto A, B e C.

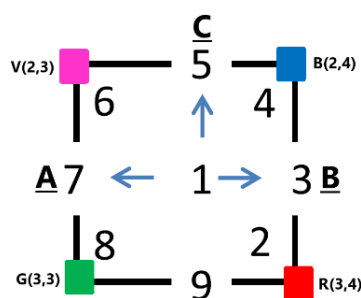


Figura 21 - Representação do AP $C_{(2,3)}$ do corredor central. Posição inicial do recetor, em t_0 , quando este se encontra na *footprint* #1, baseada em [13].

Se o utilizador se deslocar para o terminal A, ponto de acesso $C_{(2,2)}$, tem de passar pelas regiões *footprint* #7, #1 e #3, como se verifica na Figura 22 (a). Já se o utilizador decidir deslocar-se para o terminal B, AP $C_{(2,4)}$, terá de passar pelas regiões #3, #1 e #7, como se observa na Figura 22 (b). Por fim, se a intenção do utilizador for a zona de restauração [Figura 20 (b)], terá de deslocar-se em direção do terminal C, ponto de acesso $C_{(1,3)}$, ou seja, passar pelas regiões *footprint* #5, #1 e #9 [Figura 22 (c)] e finalmente pelas #4, #5 e #3 [Figura 22 (d)].

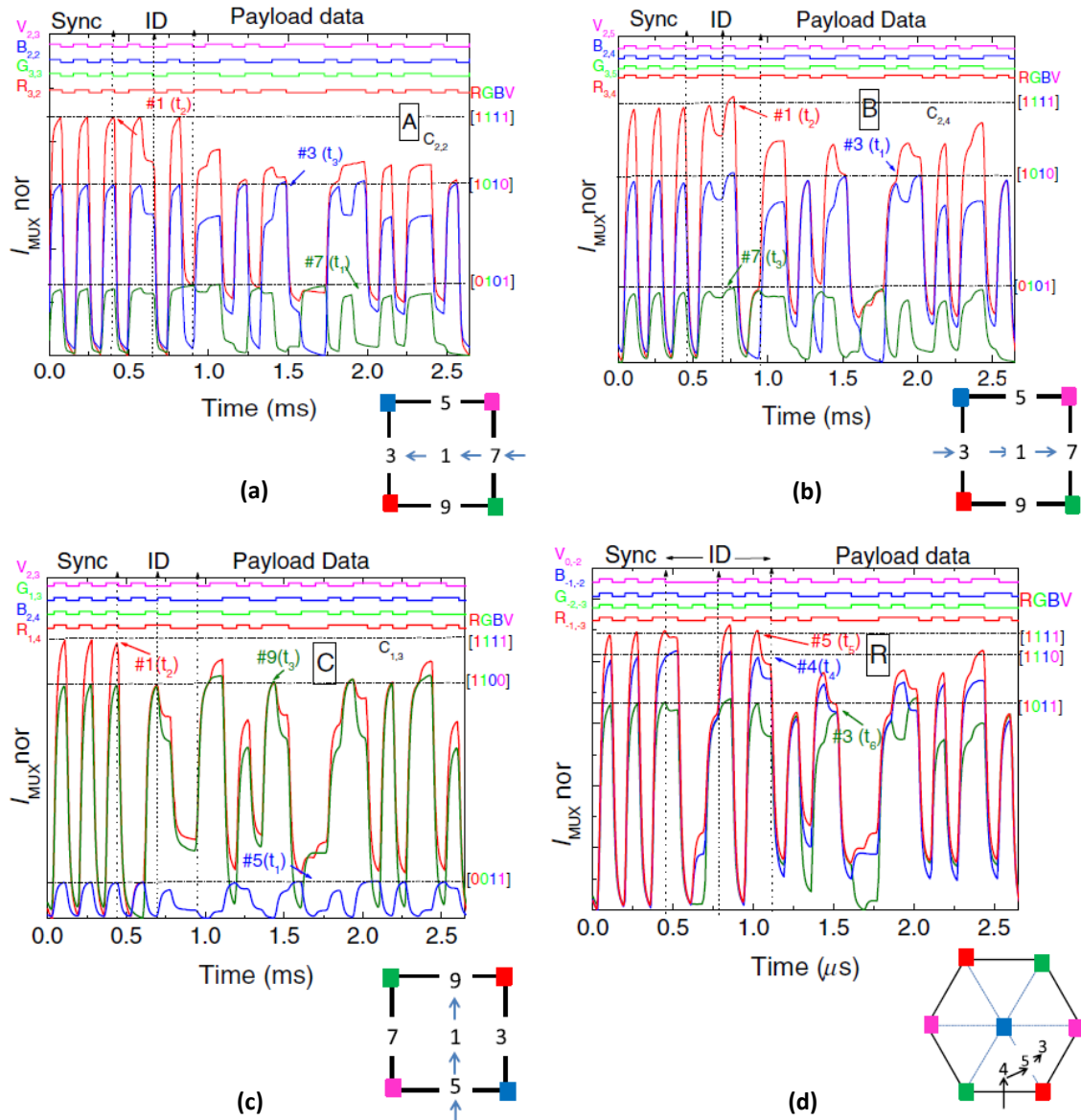


Figura 22 - Localização *indoor* através de VLC em instantes sucessivos (t_0 , t_1 , t_2 , t_3 , t_4 e t_6), [13]. (a) Aquisição do sinal em direção ao terminal A. (b) Aquisição do sinal em direção ao terminal B. (c) Aquisição do sinal em direção ao terminal C. (d) Aquisição do sinal na zona de restauração.

Inicialmente, em t_1 , quando o recetor se move da região *footprint* #1 para a #3, #5 ou #7 para se deslocar, respetivamente, em direção aos terminais A, C ou B, existe sempre perda de informação proveniente de dois canais distintos. Por exemplo, se o utilizador for em direção ao terminal A os canais dos LEDs $R_{(3,4)}$ e $B_{(2,4)}$ [Fig. 22 (a)] são perdidos. Já se o mesmo for em direção ao terminal B ou C, vão ser perdidos, respetivamente, os canais correspondentes aos LEDs $G_{(3,3)}$ e $V_{(2,3)}$ [Fig. 22 (b)] ou $R_{(3,4)}$ e $G_{(3,3)}$ [Fig. 22 (c)]. Ainda em t_1 , os 4 dígitos em código binário passaram de [1111] para [0101], [1010] ou [0011] que correspondem, respetivamente, às regiões *footprint* #1, #7, #3 ou #5.

Posteriormente, em t_2 , o recetor passa pela região #1, independentemente da direção escolhida pelo mesmo. Deste modo, se for comparada a posição da Figura 22 (a) com a da (c) verifica-se que em ambas o utilizador está na *footprint* #1, no instante t_2 . No entanto, os canais adicionais têm ID's diferentes, ou seja, apesar de terem a mesma posição dentro de cada AP

têm outra localização dentro da rede. Como se pode verificar, na Figura 22 (a) foram adicionados os canais $R_{(3,2)}$ e $B_{(2,2)}$, já na Figura 22 (b) foram recebidos os canais $G_{(3,5)}$ e $V_{(2,5)}$.

Seguidamente, em t_3 , as posições diferem consoante a escolha da direção, por parte do utilizador, como se constata nas Figuras 22 (a), (b) e (c).

Finalmente, em t_4 , t_5 e t_6 , o utilizador passa para um ambiente mais amplo, em que se pode mover mais livremente, isto é, um meio em que, para o caracterizar, é usado uma topologia quadrangular (corredor principal), para uma topologia hexagonal (zona de restauração). Como se pode observar nas Figuras 20 (b) e 22 (d), é decodificada a informação dos sinais multiplexados recebidos pelo utilizador que se encontra na zona de restauração. Deste modo, verifica-se que, em t_4 , o recetor é localizado na região *footprint* #4 [1110], uma vez, que só recebe informação dos LEDs $R_{(-1,-3)}$, $G_{(-2,-3)}$ e $B_{(-1,-2)}$. Já em t_5 , o utilizador situa-se na região #5 [1111], visto que recebe informação dos canais anteriores e do $V_{(0,-2)}$. Por fim, em t_6 , como o utilizador só recebe informação dos LEDs $R_{(-1,-3)}$, $B_{(-1,-2)}$ e $V_{(0,-2)}$, o mesmo encontra-se na *footprint* #3 [1011].

4^o Capítulo

Caracterização da comunicação
do canal VLC

4.1 Introdução

Neste capítulo, vai ser descrito, metodicamente, o processo de obtenção da curva de calibração, a nível teórico e prático. Começando pela curva de calibração tórica, esta será obtida idealmente, ou seja, num cenário, em ambiente fechado, produzido com a ajuda do *software MatLab*. Já a curva de calibração prática, será obtida num cenário “real”, através de medições laboratoriais utilizando um protótipo que pretende replicar, em escala reduzida, a situação de iluminação de uma sala.

Ao longo das próximas páginas, também vai ser apresentado o processo de obtenção dos sinais recebidos pelo fotodetetor (fotodíodo PIN/PIN) [7, 8], através da multiplexação dos sinais transmitidos pelos LEDs brancos RGBV [6], previamente calibrados pelas curvas, obtidas a nível prático e teórico.

Por fim, demonstrar-se-á a codificação do sinal transmitido pelos LEDs, a descodificação ideal de um sinal recebido pelo fotodíodo, obtido a nível teórico, e uma aplicação que simula tudo o que foi descrito, de forma a facilitar a reprodução de uma navegação assistida por LEDs num sistema Li-Fi.

4.2 Processo de obtenção das curvas de calibração ideal

4.2.1 Cenário de simulação ideal

A fim de simplificar e obter a curva de calibração *standard* teórica, foi considerado o modelo de um sistema VLC, com linha de vista (LOS) nas duas direções, ou seja, a transmissão da comunicação e iluminação, entre o transmissor (LED branco RGBV) e o receptor (fotodíodo PIN/PIN), é realizada através da linha de vista direta, sem a contabilização de obstáculos. Desta forma, com o intuito de se realizar, idealmente (por *software MatLab* e não num cenário “real”, como o laboratório), a calibração dos LEDs, foi proposto o cenário em ambiente fechado, representado na Figura 23.

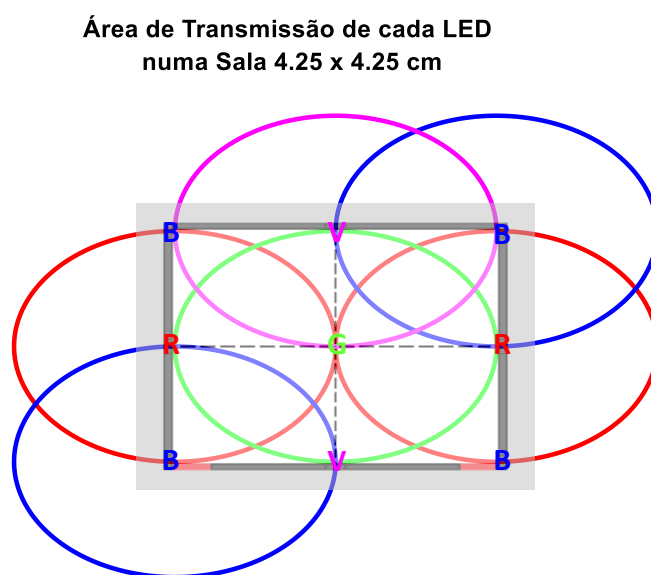


Figura 23 - Cenário de teste e raio de transmissão de cada LED.

Como se pode verificar através da Figura 23, o cenário é constituído por uma área de 4.25x4.25 cm, dividida por quatro células, com topologia quadrangular, e 9 LEDs brancos RGBV em cada vértice das mesmas, cujo raio de transmissão de cada um, é de 2 cm. Em cada LED é utilizado um comprimento de onda, segundo o *datasheet* em [6], para transmitir informação, enquanto os restantes têm a finalidade de iluminar a sala (1 verde (540 nm), 2 vermelhos (624 nm), 2 violeta (405 nm) e 4 azuis (480 nm)), em que 1 LED violeta e 2 LEDs azuis se encontram desligados. As regiões representadas a cinzento e a branco caracterizam, respetivamente, a parte interior (*indoor*) e exterior (*outdoor*) da sala, já as regiões de cor preta e vermelha representam, respetivamente, as paredes e as portas. Assim sendo, o utilizador provido com um fotodetector (fotodíodo PIN/PIN) instalado no seu dispositivo móvel, move-se livremente por todo o cenário. No entanto para receber, simultaneamente, a informação e iluminação provenientes dos LEDs, o utilizador tem de se encontrar no interior da área *indoor* e no raio de transmissão de pelo menos um LED, uma vez que a luz não penetra obstáculos opacos.

4.2.2 Cobertura prevista em *downlink*

De forma a prever a cobertura em *downlink*, na área de transmissão do cenário *indoor*, apresentado na Figura 23, foi necessário calcular a potência recebida (P_r) pelo fotodíodo, com a ajuda da Equação 4.1. Esta é obtida através da soma entre a potência transmitida (P_t) pelos LEDs, o ganho de receção (G_r) do fotodíodo, e o ganho de transmissão (G_t) dos LEDs, subtraindo a atenuação de propagação (L_p), desde o transmissor ao recetor. Assim, pode-se prever a cobertura em *downlink*, entre o transmissor (LED branco RGBV) e o recetor (fotodíodo), com o auxílio das Equações 4.2 e 4.6 que calculam, respetivamente, o ganho de transmissão e a atenuação de propagação.

$$P_{r(dBm)} = P_t + G_r + G_t - L_p \quad (4.1)$$

P_r : Potência recebida, em dBm;

P_t : Potência transmitida, em dBm;

G_r : Ganho de receção, em dB;

G_t : Ganho de transmissão, em dB;

L_p : Atenuação de propagação, em dB.

Na figura 24 [43], foi apresentada a geometria da posição relativa do transmissor e recetor, com ênfase nos principais parâmetros usados, para caracterizar a fonte LED e o recetor fotodíodo.

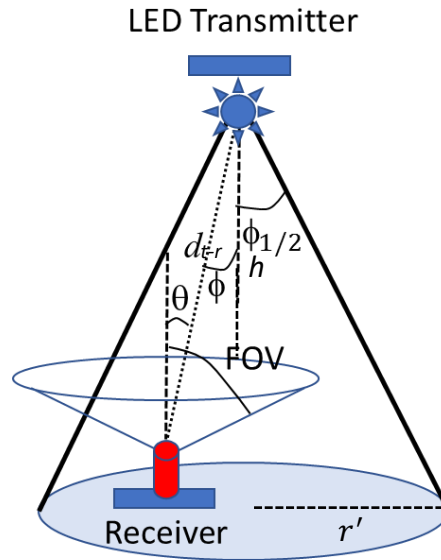


Figura 24 - Geometria da posição relativa do transmissor e recetor, [43].

Com a ajuda da Figura 24 e da Equação 4.2 [43, 44], é possível perceber como é calculado o ganho de transmissão (G_t). Através do índice *Lambertiano* (m), da área do fotodíodo (A), da distância entre o transmissor e o recetor (d_{t-r}), da intensidade máxima transmitida pelo LED (I_N), anteriormente injetada, e o valor dos ângulos de irradiação (ϕ) e incidência (θ). Uma vez que se está na presença de LEDs com um campo de visão (FOV) igual a 120° , o índice de *Lambertiano* é sempre igual a 1, para um feixe a meia potência de 60° . Caso o ângulo θ contenha um valor maior que o FOV, o ganho transmitido resulta num valor nulo.

$$G_{t(dB)} = \frac{(m + 1) \times A}{2\pi \times (d_{t-r})^2} \times I_N \times \cos^m(\phi) \times \cos(\theta) \quad (4.2)$$

G_t : Ganho de transmissão, em dB;

m : Índice *Lambertiano*;

A : Área do fotodíodo, em m^2 ;

d_{t-r} : Distância entre o transmissor e o receptor, em m;

I_N : Intensidade máxima transmitida pelo LED, em cd;

ϕ : Ângulo de irradiação, em $^\circ$;

θ : Ângulo de incidência, em $^\circ$.

Para melhor percepção espacial da posição relativa do transmissor e recetor e do cálculo dos ângulos ϕ e θ , foram apresentadas a Figura 25, as Equações 4.3 e 4.5 [30] e a Equação 4.4.

Assumindo uma posição fixa do transmissor, em x_t e y_t , a distância entre o transmissor e o receptor, em qualquer ponto x_r e y_r , é calculada através do teorema de Pitágoras, dentro da área de transmissão do cenário de simulação.

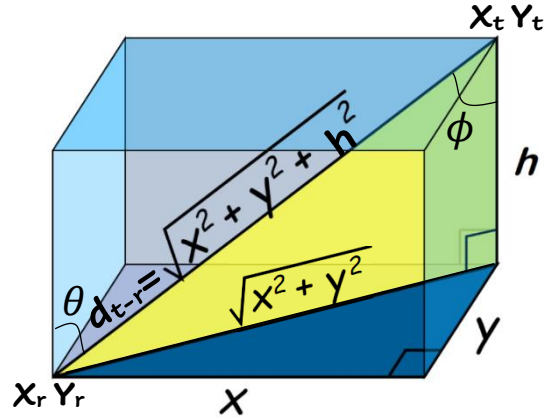


Figura 25 - Assumindo uma posição fixa do transmissor, em x_t e y_t , a distância entre o transmissor e o receptor, em qualquer ponto x_r e y_r , é calculada através do teorema de Pitágoras, dentro da área de transmissão.

$$d_{t-r(m)} = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} = \sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2 + h^2} \quad (4.3)$$

$$h_{(m)} = h_{LED} - h_{PH} = \frac{r'}{\tan 60^\circ} - h_{PH} \quad (4.4)$$

$$\theta_{(^\circ)} = \phi = \cos^{-1}\left(\frac{h}{d_{t-r}}\right) \quad (4.5)$$

- d_{t-r} : Distância entre o transmissor e o receptor, em m ;
- x_t e y_t : Posição relativa do transmissor, em m ;
- x_r e y_r : Posição relativa do receptor, em m ;
- h : Altura entre o transmissor (h_{LED}) e o receptor (h_{PH}), em m ;
- r' : Raio da fonte LED, em m ;
- ϕ e θ : Ângulos de irradiação e incidência, em $^\circ$.

Realizando o teorema de Pitágoras, como se observa na Equação 4.3 e na Figura 25, é possível obter a hipotenusa (d_{t-r}) através do cateto das posições relativas do transmissor (x_t, y_t) e do receptor (x_r, y_r), e do cateto que representa a altura (h), entre ambos. Através da Equação 4.4 e das Figuras 24 e 25, é possível calcular a altura, entre o transmissor e o receptor, resultante da divisão entre o raio (r') da fonte LED e a tangente de 60° ($\tan 60^\circ$), relativa ao feixe a meia potência produzido pelo mesmo, com a altura do fotodíodo. Desta forma, como se verifica na

Equação 4.5, é possível obter os ângulos θ e ϕ , das Figuras 24 e 25, que resultam do inverso do cosseno da altura, entre o transmissor e o recetor, com a distância entre os mesmos.

Por fim, como se pode constatar na Equação 4.6, baseada em [45], a atenuação de propagação (L_p) é calculada através da distância (d_{t-r}) entre o transmissor e o recetor, do comprimento de onda (λ), correspondente à cor a que o LED transmite. Visto que a luz visível não penetra obstáculos opacos, é necessário contabilizar, para o cálculo da atenuação de propagação, a atenuação (L_W) provocada pelo número de paredes (nW) que constituem a sala, como sendo máxima.

$$L_{p(dB)} = 22 + 20 \times \log_{10} \left(\frac{d_{t-r}}{\lambda} \right) + nW \times L_W \quad (4.6)$$

L_p : Atenuação de propagação, em dB ;

λ : Comprimento de onda, em m ;

d_{t-r} : Distância entre o transmissor e o receptor, em m ;

L_W : Atenuação provocada pelas paredes, em dB ;

nW : Número de paredes.

Os valores dos principais parâmetros da simulação utilizados na modulação do canal VLC, estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores dos principais parâmetros da simulação VLC.

$P_t (P_{t_R}, P_{t_G}, P_{t_B}, P_{t_V})$	13.5, 13.0, 13.5, 14.1 dBm
$G_r (G_{r_R}, G_{r_G}, G_{r_B}, G_{r_V})$	5.0, 4.0, 1.7, 0.8 dB
$\lambda (\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B, \lambda_V)$	540, 624, 405, 480 $nm = \lambda \times 10^{-9} m$
FOV	120°
A	$3.2 \times 2.8 = 8.96 \text{ mm}^2 = 8.96 \times 10^{-6} m^2$
$^3 h_{PH}$	1 $cm = 0.01 m$
R	2 $cm = 0.02 m$
m	1
T_{bit}	0.08 $ms = 0.08 \times 10^{-3} s$

Analisando a Tabela 6 e as equações apresentadas anteriormente, verifica-se que injetando uma potência nos LEDs vermelho, verde, azul e violeta de, 13.5, 13.0, 13.5, 14.1 dBm , um ganho de receção de 5.0, 4.0, 1.7, 0.8 dB e um comprimento de onda 540, 624, 405, 480 nm , respetivamente, pode-se prever a cobertura, em *downlink*, entre o transmissor (LED branco RGBV), com raio de 2 cm , e o recetor (fotodiodo PIN/PIN), no cenário ideal anterior, representado no mapa de cores da Figura 26.

³ Por lapso, o parâmetro da altura do fotodiodo ficou com o valor de 1 m . Esta altura refere-se àquela que o utilizador apresenta quando está a usar o telemóvel. No entanto, como se está a trabalhar numa escala de cm , h_{PH} devia ser 1 cm que, posteriormente, convertido para metros, daria um valor de 0.01 m e não 1 m . Em consequência, o valor da potência recebida pelo fotodiodo vai resultar num valor menor, do que aquele que realmente era, se a altura do mesmo fosse convertida corretamente. Como solução, foram aumentados o ganho recebido e a potência transmitida, para os valores da Tabela 6, de forma a compensar a baixa potência recebida.

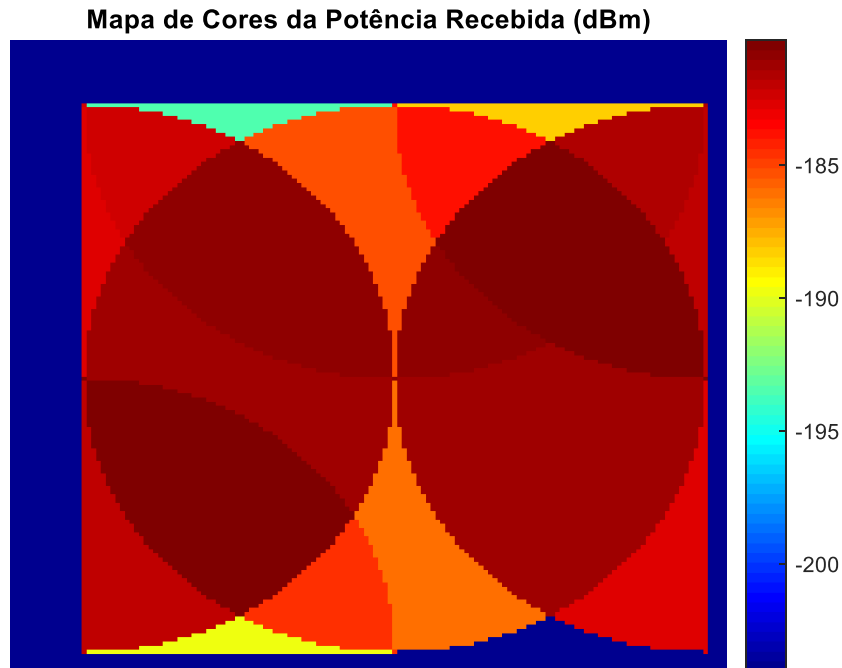


Figura 26 - Representação em mapa de cores da potência recebida pelo fotodetetor em *dBm*.

Observando a Figura 26, constata-se que, o raio de cobertura de cada LED é muito reduzido e as regiões da sala com maior potência recebida (-180.3 dBm) são as que têm a contribuição dos 4 LEDs. Já as de menor potência (-238.3 dBm) são as que não contêm a contribuição de algum LED. Assim, a cor vermelha mais intensa representa o caso de potência máxima recebida pelo fotodíodo, sendo o contrário representado pela cor azul mais intensa.

Nas figuras 27 e 28, foram representadas a densidade de probabilidade (PDF) e a distribuição cumulativa da potência recebida, de forma a perceber o comportamento da mesma na comunicação em *downlink*, entre a fonte LED e o recetor fotodíodo, no cenário ideal anterior.

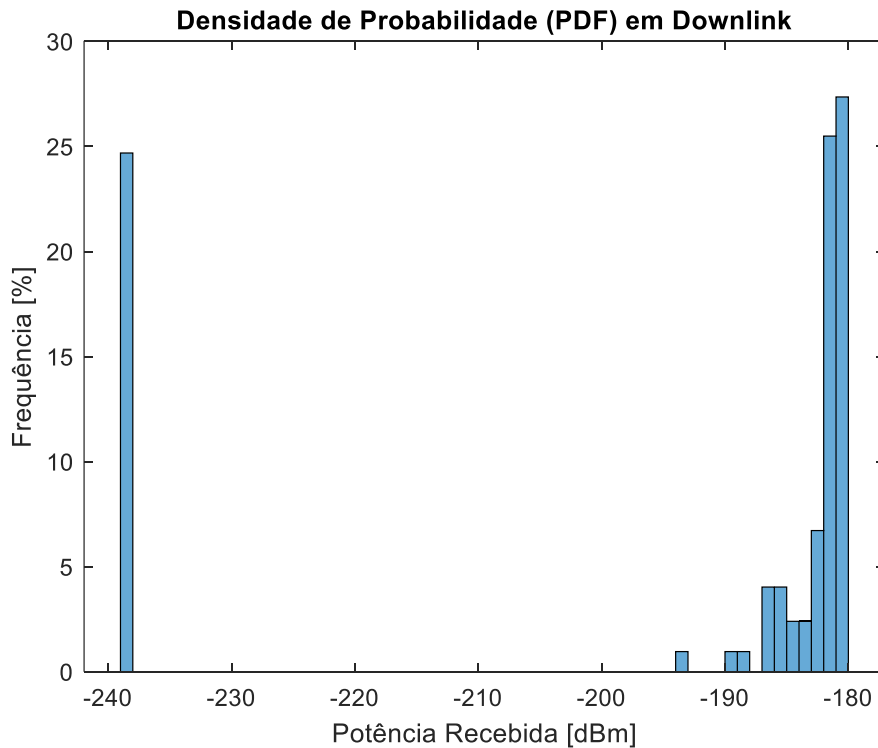


Figura 27 - Frequência da Função Densidade de Probabilidade (PDF), em função da potência recebida em *downlink*.

Através da análise da Figura 27, é possível verificar que a ordem das potências recebidas mais frequentes, com 27%, 26% e 25%, correspondem, respetivamente, a [-181; -180] dBm, [-182; -181] dBm e [-239; -238] dBm. As potências recebidas entre [-181; -180] dBm são as mais frequentes em toda a simulação e decorrem quando o fotodíodo está na presença dos quatro LEDs [R, G, B, V] ou de três LEDs [R, G, B] e [R, G, V]. Por outro lado, as potências recebidas entre [-239; -238] dBm também acontecem muito frequentemente, contudo menos que no intervalo anterior. Surgem nas regiões em que todos os LEDs estão desligados ou não conseguem chegar ao fotodíodo, por este estar em regiões fora da sala (*outdoor*). Isto acontece devido à incapacidade da luz, proveniente da fonte LED, penetrar obstáculos opacos, como a parede da sala. No entanto, visto que o pretendido é simular um sistema VLC em ambientes interiores (*indoor*), a falta de cobertura fora sala não é um problema, além disso, como não existem obstáculos no interior da mesma, o modelo LOS é válido para este cenário de simulação.

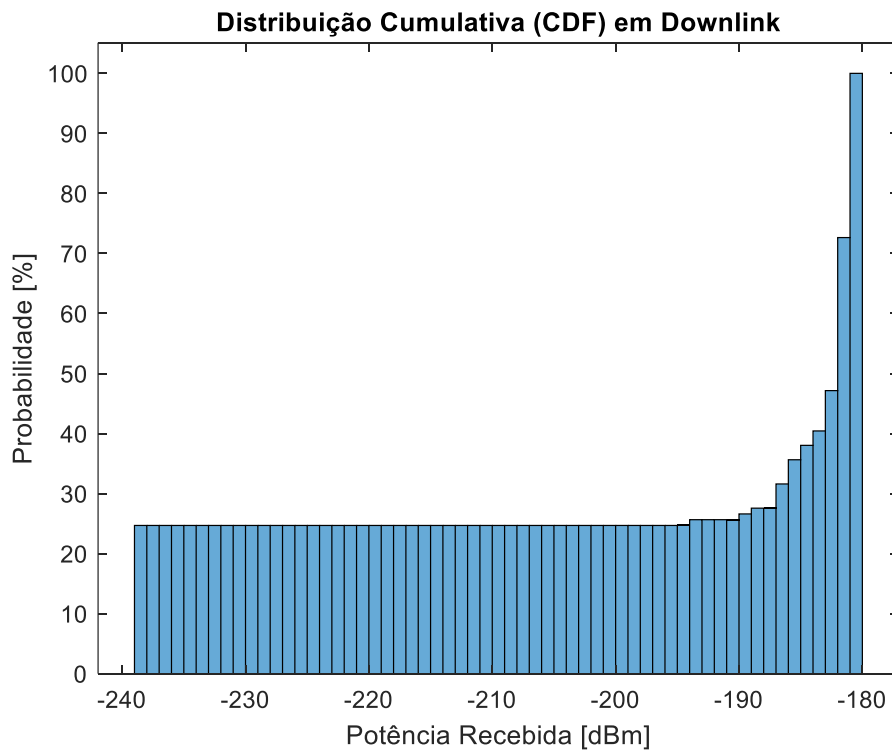


Figura 28 - Probabilidade da Função Distribuição Cumulativa (CDF), em função da potência recebida em *downlink*.

Analisando a Figura 28, é possível observar uma probabilidade de 100%, da distribuição cumulativa, em função da potência recebida ser menor ou igual a -180 dBm . Para potências recebidas entre $[-239; -194] \text{ dBm}$, a probabilidade de distribuição é a mesma (25%).

4.2.3 Curva de calibração ideal com ganho

Se for feita uma análise às potências recebidas anteriormente, verifica-se que existem, aproximadamente, 16 níveis diferentes de potência para 16 regiões específicas da sala, que correspondem às 16 combinações possíveis de obter quando se está na presença de 4 LEDs RGBV ($2^4 = 16$). Assim, é possível verificar as diferentes regiões no mapa de cores, representado na Figura 29. Neste os níveis 0 [-], 1 [V], 2 [B], 3 [BV], 4 [G], 5 [GV], 6 [GB], 7 [GBV], 8 [R], 9 [RV], 10 [RB], 11 [RBV], 12 [RG], 13 [RGV], 14 [RGB] e 15 [RGBV] estão representados, respetivamente, pelas cores amarela, azul ciano, violeta, castanha escura, castanha clara, vermelha, verde escura, verde menos intensa, verde clara, azul escura, azul menos intensa, azul clara, preta, cinzenta escura, cinzenta menos intensa, cinzenta clara, por fim, a área exterior da sala não contém nenhum nível, porque a iluminação proveniente dos LEDs está obstruída pelas paredes da sala.

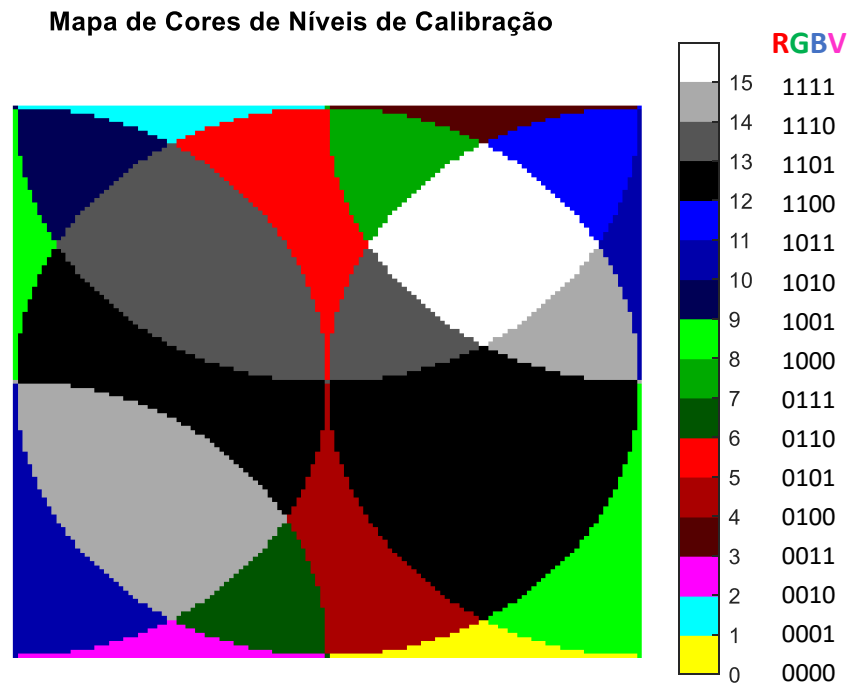


Figura 29 - Representação dos 16 níveis de potência recebida pelo fotodíodo, em mapa de cores.

Considerando a célula unitária (célula constituída por quatro LEDs), que segue uma topologia quadrada e se situa no canto superior direito da Figura 29, verifica-se que os quatro LEDs RGBV, situados em cada vértice, estão simultaneamente ligados. Por consequência, a anterior contém apenas nove níveis de potência recebida, 3, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14 e 15, que correspondem, respetivamente, às regiões *footprint* #5, #7, #6, #3, #4, #9, #8, #2 e #1, como se ilustra na Figura 30 e na Tabela 7.

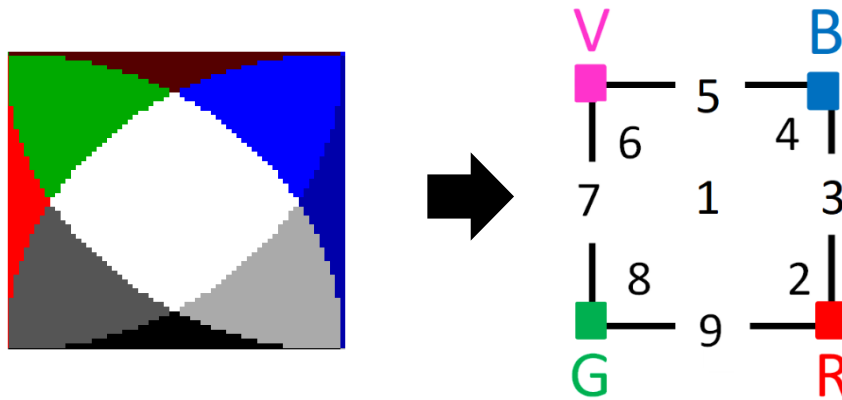


Figura 30 - Representação dos 9 níveis de potência e das 9 *footprints* de uma célula unitária, com os 4 LEDs RGBV ligados.

Tabela 7 - Regiões *footprint* de uma célula unitária constituída por 4 LEDs RGBV simultaneamente ligados, situados em cada vértice da mesma.

Regiões <i>Footprint</i>	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Níveis de potência	RGBV (1111) 15	RGB (1110) 14	RB (1010) 10	RBV (1011) 11	BV (0011) 3	GBV (0111) 7	GV (0101) 5	RGV (1101) 13	RG (1100) 12

Normalizando os 16 níveis diferentes de potência recebida pelo fotodíodo, obtêm-se, a nível teórico, os 16 níveis da curva de calibração *standard* (STD), com ganho de recepção, representados na Figura 31. No entanto, foi necessário um ajuste minucioso do ganho de recepção (interação transmissor/detector) e da potência transmitida por cada LED RGBV, por forma a obter uma curva de calibração semelhante à obtida laboratorialmente, ilustrada na Figura 33. Por conseguinte, como dito anteriormente, foi necessário definir os ganhos de recepção e as potências transmitidas dos LEDs vermelho, verde, azul e violeta com os valores de 5.0, 4.0, 1.7, 0.8 *dB* e de 13.5, 13.0, 13.5, 14.1 *dBm*, respetivamente. Por fim, foi também definido um tempo de *bit* (T_{bit}) de 0.08 *ms*.

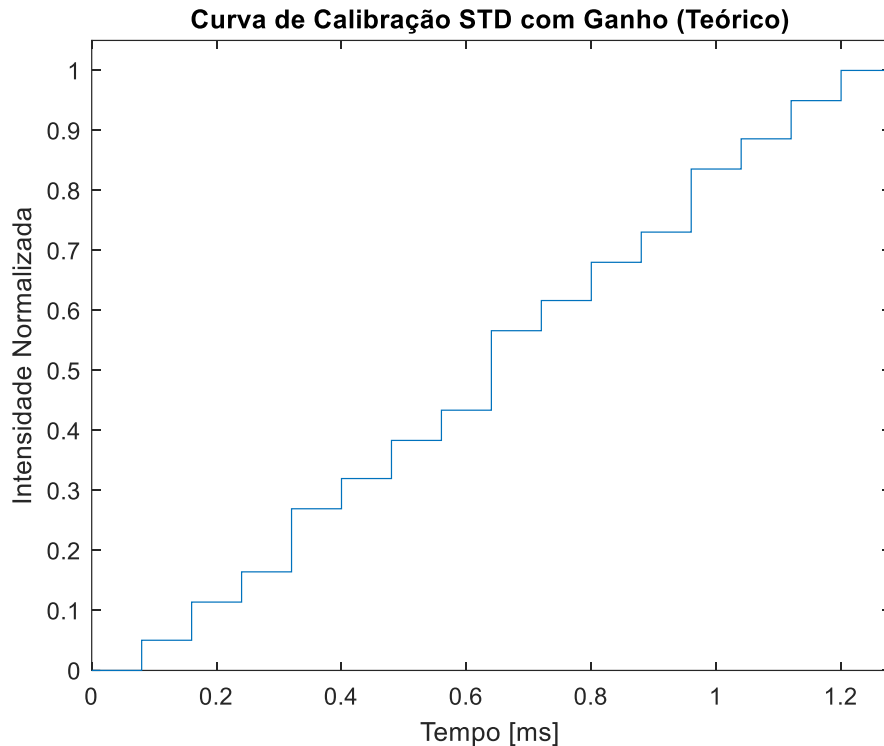


Figura 31 - Representação teórica da curva de calibração *standard*, com ganho de recepção.

Analisando a Figura 31, verifica-se que foram obtidos os 16 níveis de calibração distintos, na qual, uma vez normalizados, os níveis 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 correspondem, respetivamente, a uma intensidade aproximada de 0, 0.05, 0.11, 0.16, 0.27, 0.32, 0.38, 0.43, 0.57, 0.62, 0.68, 0.73, 0.84, 0.89, 0.95 e 1. Também se verifica que a duração total do sinal corresponde a 1.28 *ms*.

4.3 Curva de calibração “real” com ganho

De forma a validar os resultados obtidos, a nível teórico, foram feitas medidas a nível prático, obtidas laboratorialmente. O cenário de simulação é semelhante ao teórico, e consiste numa célula unitária com topologia quadrangular constituída por 4 LEDs RGBV, situada nos vértices da mesma, cujo raio de transmissão de cada tem o valor de aproximadamente 2 *cm* e 1 LED RGBV no centro. Os LEDs, situados na periferia da célula unitária, usam as cores vermelha, verde, azul e violeta para transmitir informação, enquanto o LED central tem como finalidade regular o ganho dos canais usando, apenas, a cor violeta.

A montagem laboratorial está ilustrada na Figura 32, onde se observa o osciloscópio digital de 4 canais utilizado para ler os sinais, tanto transmitidos pelos LEDs, como o sinal recebido pelo fotodíodo e os 4 LEDs que transmitem o sinal VLC, em geometria quadrangular, com o LED violeta ao centro. Para além deste equipamento, a montagem experimental compreende, ainda, uma fonte de alimentação para injetar potência nos LEDs, uma fonte de tensão para polarizar inversamente o fotodíodo, um pré-amplificador e um *software* dedicado, que define a informação que será transmitida pelos LEDs.



Figura 32 - Cenário do protótipo laboratorial.

Na Figura 33, mostra-se a curva de níveis de calibração *standard*, com ganho, semelhante à obtida teoricamente. Contudo, como o tempo de *bit* equivale a 8 amostras e o tempo de cada amostra é de 0.02 ms , a duração total do sinal corresponde a 2.56 ms . Desta forma, foi possível obter, aproximadamente, 16 níveis de calibração diferentes em que, uma vez normalizados, os níveis 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 correspondem, respectivamente, a uma intensidade aproximada de 0, 0.07, 0.14, 0.18, 0.29, 0.36, 0.43, 0.47, 0.63, 0.67, 0.73, 0.78, 0.88, 0.90, 0.95 e 1.

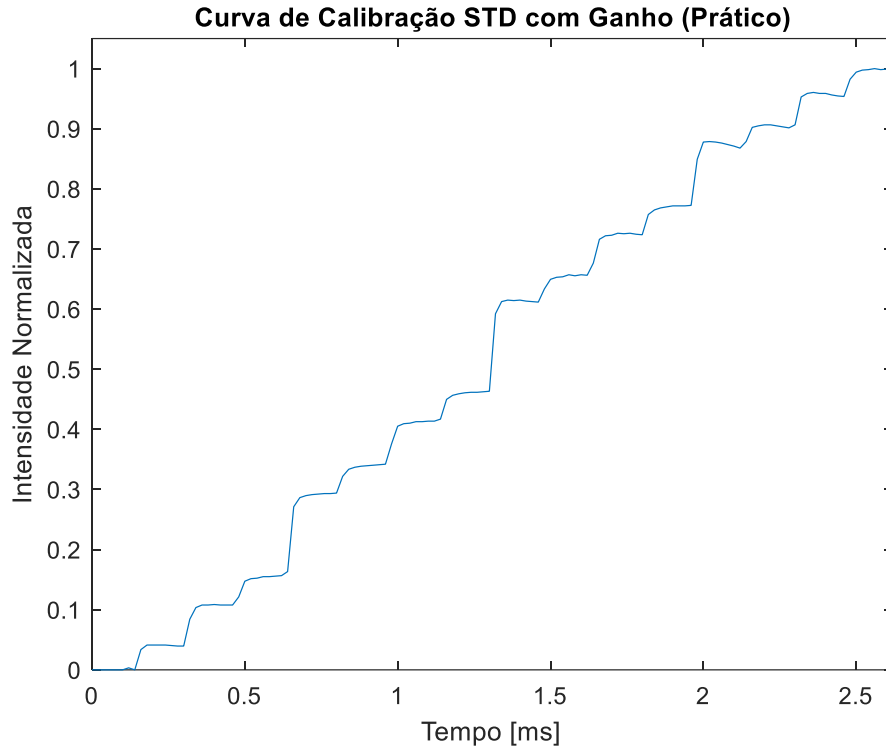


Figura 33 - Representação prática da curva de níveis de calibração *standard*, com ganho.

4.4 Processo de representação ideal do sinal MUX recebido (*Standard* e Paridade)

Através da curva de calibração *standard* teórica, representada na Figura 31, foram determinados os coeficientes de cada LED, para se compreender a contribuição/“ganho” individual dos quatro canais RGBV, quando estes estão ligados “1”. Os coeficientes de cada LED, R_C, G_C, B_C, V_C , correspondem, respetivamente, ao nível 9 (1000) da curva de calibração com apenas a contribuição do LED vermelho e com o valor de 566.19×10^{-3} , ao nível 5 (0100) que contém a contribuição do LED verde e tem o valor de 269.44×10^{-3} , ao nível 3 (0010) com o valor de 113.91×10^{-3} que contém a contribuição do LED azul e, por fim, o coeficiente do LED violeta corresponde ao nível 2 (0001) da curva de calibração com o valor de 50.31×10^{-3} . Assim, definindo os sinais, R_S, G_S, B_S, V_S , que cada LED transmite, é possível obter o sinal recebido pelo fotodíodo ($MUX_{(STD)}$), que resulta da multiplexação da multiplicação do sinal transmitido com o coeficiente, correspondente a cada canal, como se pode constatar na Equação 4.7.

$$MUX_{(STD)} = R_S \times R_C + G_S \times G_C + B_S \times B_C + V_S \times V_C \quad (4.7)$$

$MUX_{(STD)}$: Sinal recebido e posteriormente multiplexado pelo fotodetector;

R_S : Sinal transmitido pelo LED Vermelho, em *bits*;

R_C : Coeficiente do LED Vermelho;

G_S : Sinal transmitido pelo LED Verde, em *bits*;
 G_C : Coeficiente do LED Verde;
 B_S : Sinal transmitido pelo LED Azul, em *bits*;
 B_C : Coeficiente do LED Azul;
 V_S : Sinal transmitido pelo LED Violeta, em *bits*;
 V_C : Coeficiente do LED Violeta.

Como evidenciam as Equações 4.8, 4.9, 4.10 [46] de forma a conferir e corrigir a existência de erros numa decodificação não ideal, do sinal recebido pelo fotodíodo, explicado ao detalhe no capítulo 6, é necessário realizar a paridade dos sinais transmitidos pelos LEDs (R_S, G_S, B_S, V_S) através da operação lógica XOR (\oplus), para se obter a paridade dos mesmos (R_P, G_P, B_P). Posteriormente, na Equação 4.11, deve-se multiplexar os sinais resultantes da paridade com as multiplicações dos coeficientes de cada LED (MUX_{SP}).

$$R_P = V_S \oplus R_S \oplus B_S \quad (4.8)$$

$$G_P = V_S \oplus R_S \oplus G_S \quad (4.9)$$

$$B_P = V_S \oplus G_S \oplus B_S \quad (4.10)$$

$$MUX_{(SP)} = R_P \times R_C + G_P \times G_C + B_P \times B_C \quad (4.11)$$

MUX_{SP} : Paridade do sinal recebido e posteriormente multiplexado pelo fotodetector;
 R_P : Paridade do sinal transmitido pelo LED Vermelho, em *bits*;
 R_C : Coeficiente do LED Vermelho;
 G_P : Paridade do Sinal transmitido pelo LED Verde, em *bits*;
 G_C : Coeficiente do LED Verde;
 B_P : Paridade do Sinal transmitido pelo LED Azul, em *bits*;
 B_C : Coeficiente do LED Azul.

Por fim, são feitas as normalizações dos sinais recebidos pelo fotodíodo, MUX_{SSTD} e MUX_{SP} , com a ajuda das Equações 4.12 e 4.13. O valor do sinal máximo recebido (MAX_{MUX}) corresponde à soma dos coeficientes relativos das cores de cada LED RGBV, ou seja, 1. Por outro lado, o sinal mínimo recebido (MIN_{MUX}) contém valor nulo.

$$N_{MUX(SSTD)} = \frac{MUX_{(SSTD)} - MIN_{MUX}}{MAX_{MUX} - MIN_{MUX}} \quad (4.12)$$

$N_{MUX(SSTD)}$: Sinal recebido, pelo fotodetector, normalizado;
 $MUX_{(SSTD)}$: Sinal recebido e posteriormente multiplexado pelo fotodetector;
 MAX_{MUX} : Sinal máximo recebido;
 MIN_{MUX} : Sinal mínimo recebido.

$$N_{MUX(SP)} = \frac{MUX_{(PS)} - MIN_{MUX}}{MAX_{MUX} - MIN_{MUX}} \quad (4.13)$$

$N_{MUX(PS)}$: Paridade do sinal recebido, pelo fotodetector, normalizado;

$MUX_{(PS)}$: Paridade do sinal recebido e posteriormente multiplexado pelo fotodetector;

MAX_{MUX} : Sinal máximo recebido;

MIN_{MUX} : Sinal mínimo recebido.

4.5 Codificação

Foi utilizada a modulação (*On-Off Keying*) OOK para codificar a informação transmitida pelo LED. Segundo [30] esta modulação, apesar de não permitir um débito binário elevado, beneficia, em contrapartida, de um melhor desempenho a nível de Taxa de Erro de Bits (BER). Desta forma, torna-se uma boa candidata para o uso em aplicações que requerem pouco débito binário e elevada resiliência. Nesta modulação, os dados dos *bits* 1 e 0 são codificados, ligando e desligando o LED, respetivamente. Para criar um protocolo de comunicação e ultrapassar algumas restrições da tecnologia, foi criada uma estrutura com 64 *bits* de informação. A sua estrutura está representada na Tabela 8.

Tabela 8 - Constituição dos 6 sub-blocos do bloco de 64 *bits* de informação codificada.

Sync	ID_(x,y,z)	PIN1 (User ID)	PIN2 (Meeting code)	Angle	Payload Data	Total de bits
5 bits	(12 bits) (ID _x ,ID _y ,ID _z) (4,4,4) bits	(4 bits) número decimal de 0-9, por canal RGBV	(4 bits) 0 se for realizado nenhum encontro	4 bits	35 bits	64 bits

A Tabela 8, evidencia os 6 sub-blocos diferentes de informação (*Sync*, *ID*, *PIN1*, *PIN2*, *Angle* e *Payload Data*). O sub-bloco *Sync* é constituído por 5 *bits*, o *ID* por 12 *bits*, o *PIN1* por 4 *bits*, o *PIN2* por 4 *bits*, o *Angle* por 4 *bits* e, por fim, o sub-bloco *Payload Data* por 35 *bits* (34 *bits* de informação mais 1 *bit* de paragem), perfazendo, na totalidade dos sub-blocos 64 *bits*.

4.6 Representação ideal dos sinais transmitidos e sinal MUX recebido (*Standard* e Paridade)

Posteriormente ao ajuste da curva de calibração *standard*, representada na Figura 31, e à obtenção dos coeficientes de cada LED foram definidos os sinais transmitidos pelos dois conjuntos de 4 LEDs RGBV. Assim, os dois conjuntos S_1 e P_1 , obtido através da realização da paridade do S_1 , transmitem os sinais codificados R_S, G_S, B_S, V_S e R_P, G_P, B_P, V_P , respetivamente, para o fotodíodo. Seguidamente, o receptor multiplexa os sinais transmitidos, de forma a originar os sinais recebidos S_{STD} , provenientes do conjunto S_1 , e o sinal S_P , proveniente do conjunto P_1 . Assim, os sinais normalizados S_{STD} e S_P , foram obtidos através das Equações 4.12 e 4.13 e representados na Figura 34.

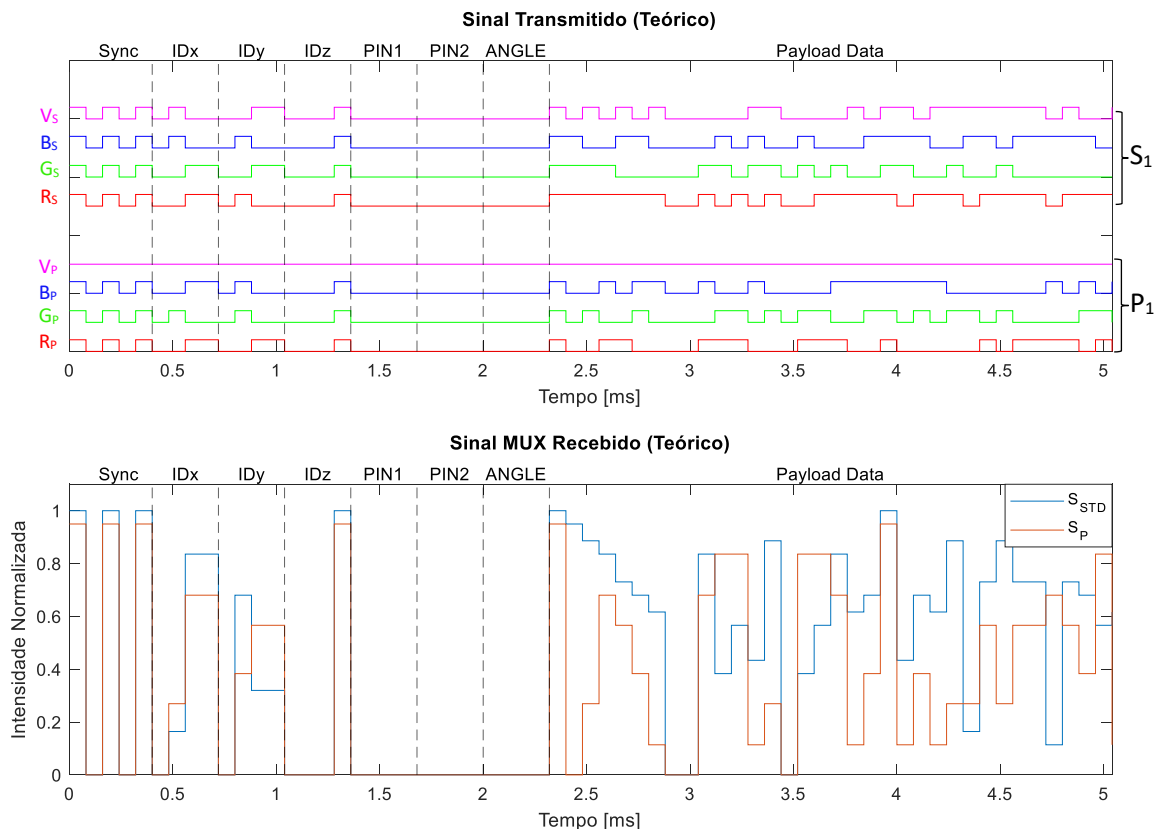
$$\begin{aligned}
 &R_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, \\
 &1,1,1,1,1,1, 0, 0,1,0,1,0,1,0,0,1,1,1,1, 1,0,1,1, 1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1] \\
 &G_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, \\
 &1,1,1,1,0,0,0, 0, 0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0] \\
 &B_{S1} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, \\
 &1,1,0,0,1,1,0, 0, 0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0] \\
 &V_{S1} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, \\
 &1,0,1,0,1,0,1, 0, 0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,0,0,1]
 \end{aligned}$$


Figura 34 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os LEDs RGBV transmitem o conjunto de sinais S_1 e P_1 para o fotodíodo. Seguidamente, o receptor multiplexa os sinais transmitidos, de forma a originar os sinais recebidos S_{STD} , provenientes do conjunto S_1 , e o sinal S_P , proveniente do conjunto P_1 .

Analisando a Figura 34, percebe-se com clareza os sinais transmitidos pelos LEDs vermelho (R_S), verde (G_S), azul (B_S) e violeta (V_S) e os sinais provenientes da realização da paridade dos mesmos, R_P , G_P , B_P , através das Equações 4.8, 4.9 e 4.10. Também se verificam os 6 blocos diferentes de informação (*Sync*, *ID*, *PIN1*, *PIN2*, *Angle* e *Payload Data*) e o tempo por *bit* (T_{bit}), definido anteriormente na aplicação, que tem o valor de 0.08 ms. Nos sinais recebidos e multiplexados pelo fotodíodo, observa-se que o seu valor máximo de intensidade normalizada relativo ao sinal S_{STD} , tem o valor de 1. Por outro lado, o sinal relativo à paridade (S_P) tem um valor inferior, apesar de ser obtido através do sinal enviado pelos 4 LEDs RGBV. Isto acontece porque, a Equação 4.11 ($MUX_{(S_P)}$), através da qual o sinal S_P foi obtido, sem ser normalizado, não contém a contribuição do LED violeta (50.31×10^{-3}). Assim sendo, o sinal transmitido V_P , encontra-se desligado e o sinal recebido S_P , contém um valor máximo de intensidade normalizada de 0.95. Comparando os conjuntos de sinais transmitidos S_1 e P_1 , é possível detetar se existe ou não erros na descodificação do sinal S_{STD} . Por exemplo, no *bit* 13, o sinal S_1 tem o valor de 0101 e, efetuando a paridade do sinal S_1 no mesmo *bit*, o sinal P_1 tem de ter o valor de 1000, caso contrário, presencia-se uma descodificação incorreta.

Visto que neste e no próximo capítulo vai ser realizada uma descodificação ideal, ou seja, sem erros, por ser decodificado um sinal recebido, obtido a nível teórico (por *software MatLab*), só no capítulo 6 é que vai ser possível entender a utilização da paridade para detetar e corrigir erros de descodificação “real” dos sinais recebidos, obtidos a nível prático (por laboratório).

4.7 Descodificação do sinal recebido ideal

Como se pode constatar, tendo os 16 níveis da curva de calibração *standard* da Figura 31 e o sinal S_{STD} , obtido a nível teórico, da Figura 34, através da interpolação dos seus valores normalizados e posterior conversão para binário do seu nível correspondente, é possível desmultiplexar os sinais recebidos pelo fotodíodo e obter os sinais, codificados, transmitidos pelos LEDs (S_R, S_G, S_B, S_V), representados anteriormente. Por conseguinte, através da descodificação dos sinais obtidos, verifica-se, com o auxílio da Figura 35 e 36 que o utilizador se encontra no instante t_1 na região *footprint* #1, ou seja, no centro da célula unitária $C_{(4,3,1)}$, constituída em cada vértice pelos LEDs, vermelho na posição $R_{(3,4,1)}$, verde na posição $G_{(3,3,1)}$, azul na posição $B_{(4,4,1)}$ e o LED violeta na posição $V_{(4,3,1)}$. Também se evidencia, com a ajuda da Tabela 9, que o utilizador tem a direção de 45° , que corresponde ao código 4, indicado pelo bloco *Angle*. O bloco *PIN1*, que indica o número do mesmo (7261), só é descodificado pelo controlador local, que se situa no centro de cada célula unitária (*footprint* #1). No entanto, o bloco *PIN2* indica o código de encontro com o valor 3, que significa que o utilizador se quer encontrar com um amigo nas proximidades. Por fim, o bloco *Payload Data* indica a informação adicional.

```

-----Início da Descodificação-----
**S1**
Sync: #1
ID:   R(3,4,1) G(3,3,1) B(4,4,1) V(4,3,1)
PIN2: 3
Angle: Code 4 (45°)
PD:   R(11111110001010010010011101110111010) G(11110000011101000010111011110000100)
      B(11001100010010001101111000110011001) V(10101010010100010101010001111010100)
-----Fim da Descodificação-----

```

Figura 35 – Descodificação “ideal” do sinal transmitido pelos LEDs brancos RGBV.

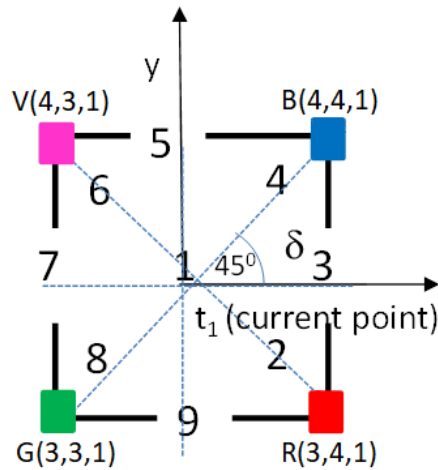


Figura 36 - Representação da localização do utilizador, que se situa na região *footprint* #1 da célula unitária $C_{(4,3,1)}$ do piso 1.

Se o utilizador se situar no centro da célula unitária, ou seja, na região *footprint* #1, tal como se verifica na Figura 36, os ângulos possíveis para ele se direccionar são 8. Posto isto observa-se, com a ajuda da Tabela 9, que quando o bloco PIN2 contém os códigos número 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, estes correspondem à mobilização do recetor para as regiões *footprint*, #2, formando um ângulo de 315° , #3, formando um ângulo de 0° , #4, formando um ângulo de 45° , #5, formando um ângulo de 90° , #6, formando um ângulo de 135° , #7, formando um ângulo de 180° , #8, formando um ângulo de 225° e, por último, para a região *footprint* #9, formando um ângulo de 270° , respetivamente. Contudo, se o utilizador não se localizar no centro da célula unitária, os códigos e os ângulos correspondentes mantêm-se, mas as regiões *footprint* alteram-se.

Tabela 9 - Códigos e sectores respetivos aos 8 ângulos possíveis do recetor se direccionar.

Código do Ângulo e sector respetivo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ângulo	-	315° (SE)	0° (E)	45° (NE)	90° (N)	135° (NO)	180° (O)	225° (SO)	270° (S)

4.8 Aplicação que simula uma navegação assistida por LEDs num sistema Li-Fi

Com o objetivo de simplificar a interação com o utilizador e de simular os cenários, interiores, de um sistema Li-Fi, apresentados neste e no próximo capítulo, foi criada uma aplicação, com a ajuda da ferramenta *App Designer* do *software MatLab*, cuja interface gráfica está representada na Figura 37.

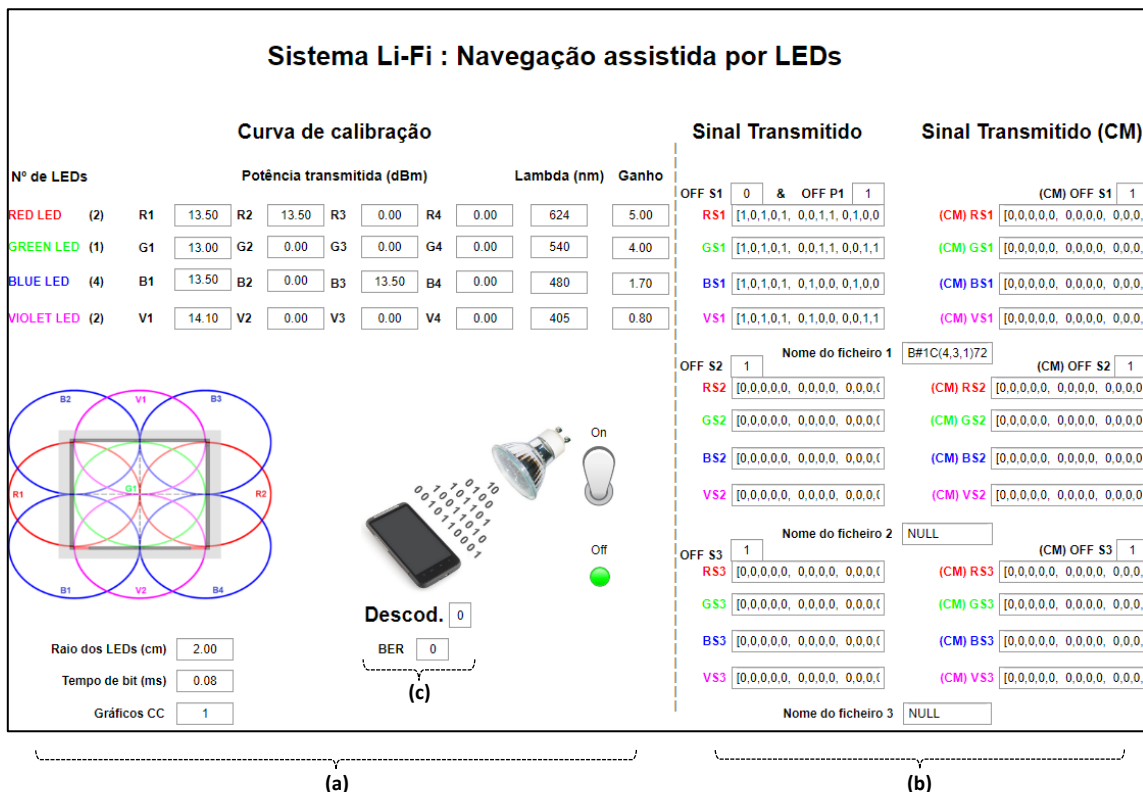


Figura 37 - Aplicação que simula uma navegação assistida por LEDs num sistema Li-Fi. (a) obtenção da curva de calibração *standard*. (b) simulação do sinal transmitido pelos LEDs brancos RGBV e recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, através da curva de calibração obtida idealmente, em (a), e no laboratório. (c) realização da descodificação do sinal recebido pelo fotodíodo, obtido a nível laboratorial.

A aplicação, representada na Figura 37, consiste na simulação, simplificada, de uma navegação assistida por LEDs, num sistema Li-Fi em ambientes interiores. No lado esquerdo, em (a), obtém-se a curva de calibração *standard* e, em (c), a descodificação do sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, obtido a nível laboratorial. No lado direito, em (b), é realizada a simulação do sinal transmitido pelos LEDs brancos RGBV e recebido pelo fotodíodo através da curva de calibração obtida idealmente a nível teórico, em (a), e a nível prático num cenário, mais “real”, de laboratório.

Inicialmente, neste capítulo, com o intuito de ser feita apenas a calibração dos LEDs, tanto os seus sinais transmitidos, sem a intervenção do controlador local (S_1 , S_2 e S_3), como com a sua intervenção (CM_{S1} , CM_{S2} e CM_{S3}), estão desligados, colocando o valor das caixas que correspondem ao “OFF $S_{1,2,3}$ ”, “(CM) OFF $S_{1,2,3}$ ” e “OFF P_1 ” em 1 e à “Descod.” e “BER”, em 0. Apenas são definidas as potências transmitidas, os comprimentos de onda, ganhos recebidos,

raio e o tempo de *bit*, com os valores respetivos de cada LED, e o valor da caixa “Gráficos CC”, relativo à apresentação da curva de calibração, é colocado em 1. Assim, o cenário de simulação ideal, apresentado na Figura 23, aplica-se única e exclusivamente à obtenção dos 16 níveis da curva de calibração, representados na Figura 31.

De seguida, foi ligado o primeiro conjunto de 4 LEDs brancos RGBV, sem a intervenção do controlador local, correspondente aos sinais transmitidos S_1 e à sua respetiva paridade P_1 , colocando as caixas “OFF S_1 ” e “OFF P_1 ” com valores nulos. Desta maneira, foi testada uma comunicação Li-Fi, em que os LEDs enviam os sinais S_1 e P_1 codificados, através da modulação OOK, para o fotodíodo que multiplexa os sinais recebidos e os descodifica, de forma a obter a localização do utilizador (Figuras 34 e 35). Contudo, para cada conjunto de 4 LEDs brancos RGBV, dos quais é possível definir os sinais transmitidos ($S_{R1}, S_{G1}, S_{B1}, S_{V1}$ ou/e $S_{R2}, S_{G2}, S_{B2}, S_{V2}$ ou/e $S_{R3}, S_{G3}, S_{B3}, S_{V3}$), o cenário ideal é idêntico ao de calibração de LEDs, expeto o facto de se aplicar apenas a uma célula unitária (Figura 30). Consequentemente, é possível enviar no máximo 3 sinais óticos (S_1, S_2 e S_3), respetivos aos 3 conjuntos de 4 LEDs para o fotodíodo, situado em 3 regiões *footprint* diferentes da mesma célula ou em 3 células unitárias diferentes. Se for uma simulação em que é necessária a intervenção do controlador local (CM), então é possível enviar os sinais referidos anteriormente juntamente com os responsáveis por enviar o sinal relativo à sua comunicação. Ou seja, é possível transmitir, no máximo 3, sinais (CM_{S1}, CM_{S2} e CM_{S3}), respetivos aos 3 conjuntos de 4 LEDs, para o fotodíodo, situados sempre na região central, *footprint* #1, da mesma célula ou em 3 células unitárias diferentes.

Simultaneamente, é possível ler o ficheiro *.xlsx* que contém todas as simulações, realizadas no cenário laboratorial retratado na Figura 32, que vão ser apresentadas ao longo do capítulo 5, para serem comparados os resultados obtidos a nível prático e teórico. Desta forma, usando as caixas denominadas por “nome de ficheiro 1, 2 e 3”, colocando em vez de “NULL” o nome do respetivo ficheiro numa delas, por exemplo “B#1C(4,3,1)7261”, é possível ler os sinais transmitidos pelos LEDs brancos RGBV e recebido pelo fotodíodo, que simulam uma comunicação bidirecional quando o utilizador 7261 se encontra na região *footprint* #1 da célula unitária $C_{(4,3,1)}$.

Por fim, mas não menos importante, também é possível descodificar o sinal recebido pelo fotodíodo, obtido a nível laboratorial, como irá ser demonstrado no capítulo 6. Assim, colocando o nome do ficheiro no qual se encontram as medições laboratoriais e o valor da caixa correspondente à descodificação, “Descod.”, em 1, é possível obter o sinal inicialmente transmitido pelos LEDs, e a partir deles descobrir a localização do recetor. Na eventualidade de se querer saber a eficiência da descodificação com e sem a intervenção do controlo de erros, é também necessário colocar o valor das caixas “BER”, em 1, “OFF S_1 ”, em 0, e os sinais “ R_{S1}, G_{S1}, B_{S1} e V_{S1} ”, que se pretendem transmitir. As restantes caixas não intervêm nesta simulação.

5 º Capítulo

Validação do modelo VLC

5.1 Introdução

Neste capítulo, vão ser explorados possíveis trajetos, de modo a simular e validar a codificação e decodificação, num cenário interior de um sistema Li-Fi, em comunicações unidirecional e bidirecional, tanto a nível teórico como prático. Desta forma, serão apresentados e comparados, os dados obtidos nas simulações produzidas através do modelo do canal VLC implementado na aplicação, dada a conhecer no capítulo anterior na Figura 37, com os dados obtidos laboratorialmente. Os sinais multiplexados obtidos nas simulações, teóricas, serão decodificados, idealmente, para permitir a obtenção dos sinais transmitidos por cada canal de comunicação. O cenário considerado para estas simulações encontra-se representado nas ilustrações 3D e 2D da Figura 38, sendo constituído por um edifício com quatro andares (-1, 0, 1, 2), em que os recetores da informação transmitida pelos LEDs se encontram no piso 1 das células $C_{(4,3,1)}$ e $C_{(4,4,1)}$.

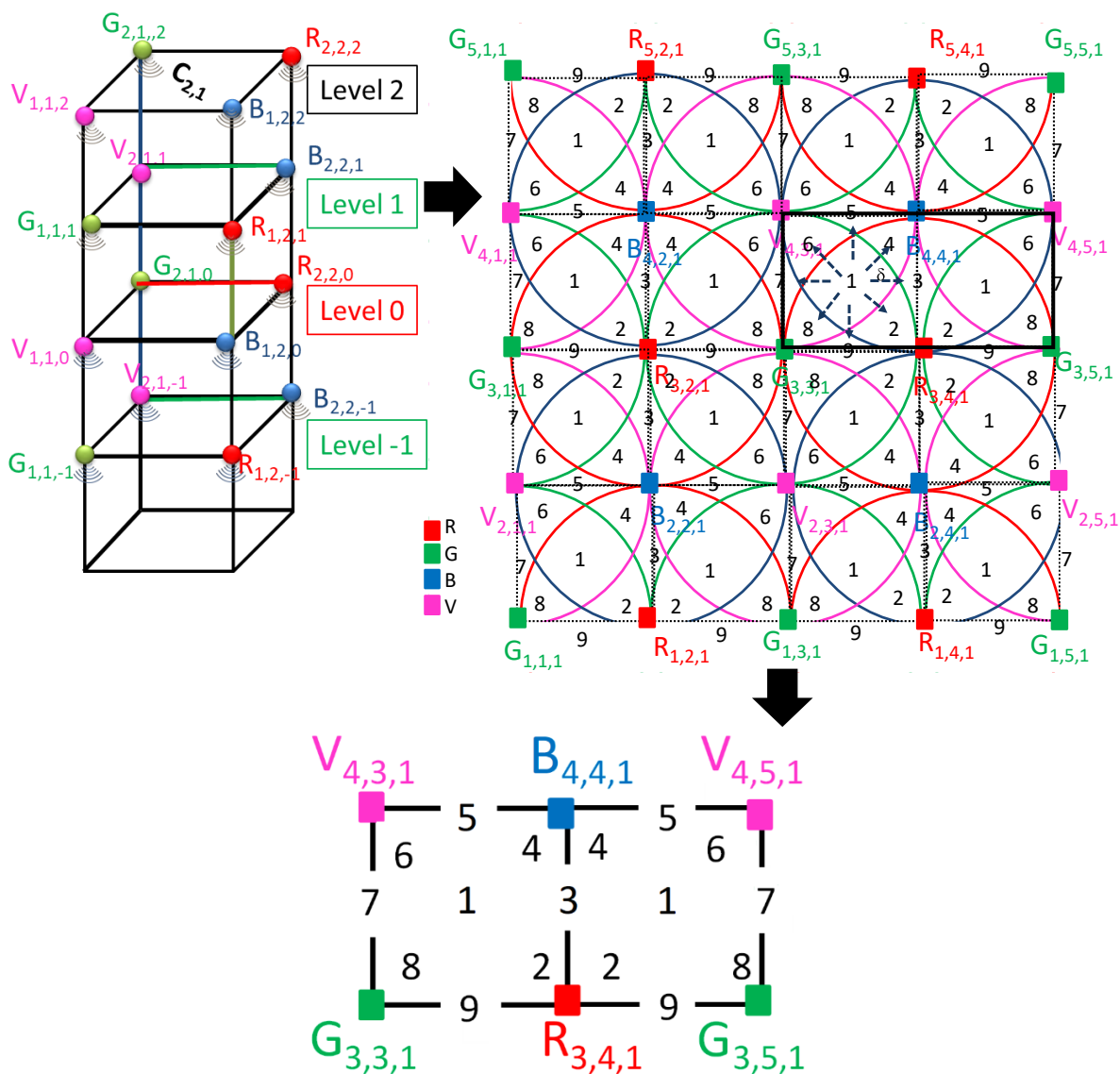


Figura 38 - Representação 3D e 2D de um cenário *indoor*, em que os recetores se situam nas células $C_{(4,3,1)}$ e $C_{(4,4,1)}$ do piso 1.

5.2 Comunicação unidirecional

Com o intuito de ser testada uma comunicação unidirecional em *downlink*, isto é, dos LEDs brancos RGBV [6] (transmissor) para o fotodíodo PIN/PIN [7, 8] (recetor/utilizador), foi proposto o cenário representado na Figura 39, no qual o recetor se desloca pelas *footprints* #1, #4 e #4 e quer saber, nos instantes t_0 , t_1 e t_2 , a sua localização.

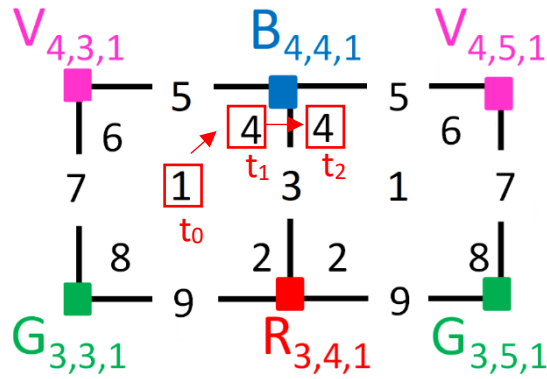


Figura 39 - Representação do percurso do recetor pelas *footprints* #1, #4 e #4, nos instantes t_0 , t_1 e t_2 .

Posteriormente ao ajuste das curvas de calibração *standard* prática e teórica, representadas, respetivamente, nas Figuras 31 e 33, foram introduzidos na aplicação, ilustrada na Figura 37, e no *software* de laboratório, os sinais para os três primeiros conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Desta forma, os canais dos LEDs R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} ; R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} e R_{S3} , G_{S3} , B_{S3} , V_{S3} transmitem os seus sinais codificados com a informação que o fotodíodo PIN/PIN irá receber. De seguida, o dispositivo multiplexa os diferentes canais óticos, em S_1 , S_2 e S_3 , e desmultiplexa os sinais óticos codificados para recuperar a informação, inicialmente, transmitida pelos LEDs, como se pode constatar nos sinais seguintes e nas Figuras 40, 41, 42 e 43.

R_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,1,1,1,1,1,1, 0, 0,1,0,1,0,1,0,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1]

G_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,1,1,1,0,0,0, 0, 0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0]

B_{S1} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,1,0,0,1,1,0, 0, 0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0]

V_{S1} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,0,1,0,1,0,1, 0, 0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,0,1]

R_{S2} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,1,1,1,1,1,1, 0, 0,1,0,1,0,1,0,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1]

G_{S2} [0,0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0,0,0,0, 0, 0,0]

B_{S2} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,1,0,0,1,1,0, 0, 0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0]

V_{S2} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,0,1,0,1,0,1, 0, 0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,0,1]

Por fim, os sinais, transmitidos e recebidos, têm na totalidade 64 *bits* e como o tempo por *bit* foi definido em 0.08 *ms*, a sua duração é de 5.12 *ms*.

Posteriormente à realização da descodificação “ideal” dos sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, nota-se, como ilustra a Figura 41, a informação inicialmente transmitida pelos LEDs e sabe-se a localização do utilizador.

```

-----Início da Descodificação-----
**S1**
Sync: #1
ID: R(3,4,1) G(3,3,1) B(4,4,1) V(4,3,1)
PIN2: 0
Angle: Code 0 (NaN°)
PD: R(1111111001010100111110111011101111) G(11110000011011010100110010010000000)
    B(11001100001010010001111001101111100) V(10101010000011000010110111111101001)
**S2**
Sync: #4
ID: R(3,4,1) G(0,0,0) B(4,4,1) V(4,3,1)
PIN2: 0
Angle: Code 0 (NaN°)
PD: R(1111111001010100111110111011101111) G(0000000000000000000000000000000000000000)
    B(11001100001010010001111001101111100) V(10101010000011000010110111111101001)
**S3**
Sync: #4
ID: R(3,4,1) G(0,0,0) B(4,4,1) V(4,5,1)
PIN2: 0
Angle: Code 0 (NaN°)
PD: R(11111110010011100010101111100110100) G(0000000000000000000000000000000000000000)
    B(11001100001011100100000011110101010) V(10101010001000111011001101100011001)
-----Fim da Descodificação-----

```

Figura 41 - Descodificação “ideal” dos sinais (S_1 , S_2 e S_3), recebidos e multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN e transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, nos instantes t_0 , t_1 e t_2 .

Analisando a Figura 41, conclui-se que, após a descodificação dos sinais S_1 , S_2 e S_3 , o utilizador, nos instantes t_0 , t_1 e t_2 , se encontra na regiões *footprint* #1, #4, e #4 (*Sync*) das células $C_{(4,3,1)}$, $C_{(4,3,1)}$ e $C_{(4,4,1)}$ (*ID*), respetivamente. Uma vez que o utilizador só quer saber a sua localização, em vários instantes de tempo, ou seja, não pediu ao controlador local o caminho mais curto para se encontrar com um amigo, ou para um sítio em específico, os sub-blocos *PIN1*, *PIN2* e *Angle* contêm o código 0. Por fim, o sub-bloco *Payload Data* indica a informação adicional.

Uma vez que foi realizado a nível prático, no laboratório, o mesmo cenário (Figura 39), através do qual foi obtida a Figura 40, a simulação passa a ser “menos ideal” ou “real”. Por essa razão, os sinais, recebidos pelo fotodíodo e transmitido pelos LEDs, contêm algum ruído, proveniente do meio em que foi realizada a simulação. Assim, serão expostas duas representações, Figuras 42 e 43, com e sem ruído, respetivamente. A eliminação do ruído, em todas as simulações realizadas, neste capítulo, foi feita através da análise do sinal transmitido, em que foi detetado um padrão de ruído que permitiu a sua eliminação de forma automatizada, tanto nos sinais transmitidos, como nos recebidos.

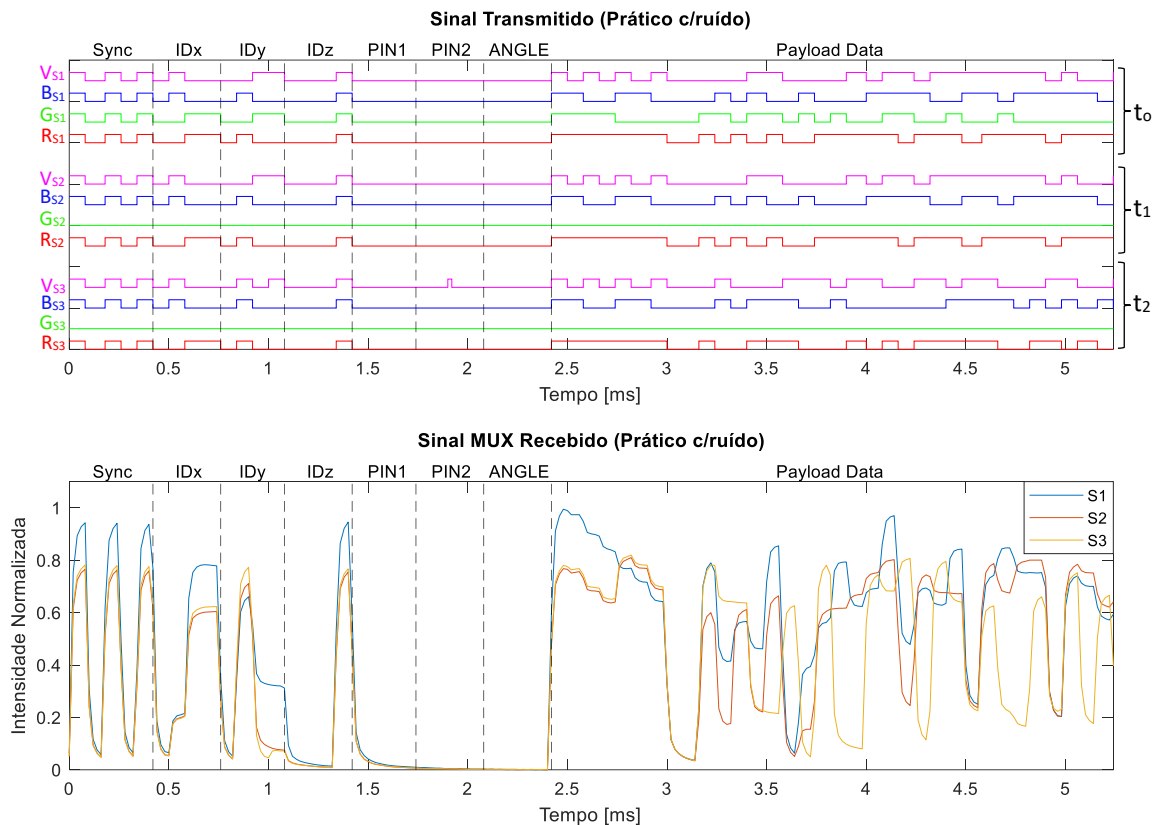


Figura 42 - Representação prática de uma comunicação unidirecional, com ruído. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} ; R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} e R_{S3} , G_{S3} , B_{S3} , V_{S3} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e posteriormente multiplexados pelo mesmo, em S_1 , S_2 e S_3 , nos instantes t_0 , t_1 e t_2 .

Como se pode verificar, na Figura 42, após várias medições laboratoriais, obtiveram-se os sinais transmitidos e recebidos, semelhantes aos obtidos teoricamente (Figura 41) apenas com um atraso de 0.2 ms , resultante das 10 amostras repetidas/erradas e dos 0.02 ms por cada amostra. Desta forma, o tempo total para ambos os sinais práticos, transmitido e recebido, corresponde a 5.32 ms . O mesmo não acontecerá na Figura 43, uma vez que esta não tem ruído e por isso também não apresentará atraso nos sinais transmitidos e recebidos.

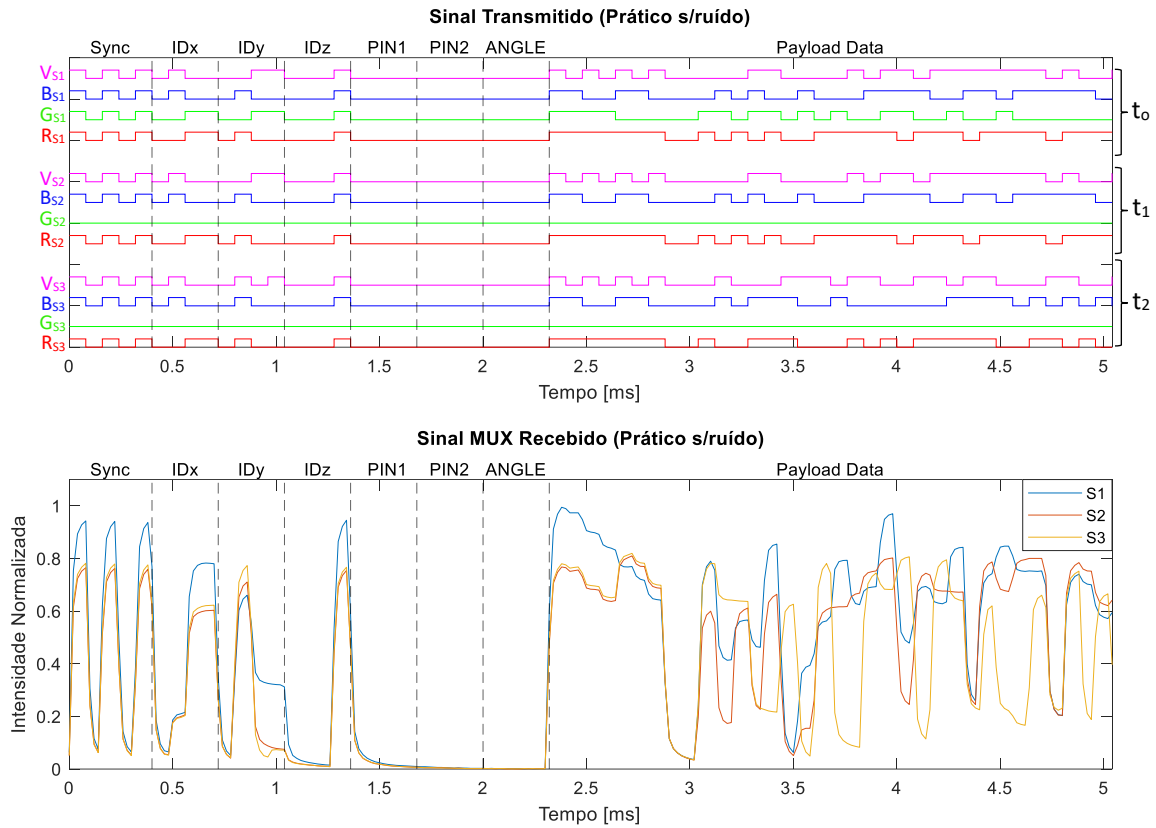


Figura 43 - Representação prática de uma comunicação unidirecional, sem ruído. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} ; R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} e R_{S3} , G_{S3} , B_{S3} , V_{S3} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodiodo PIN/PIN e posteriormente multiplexados, em S_1 , S_2 e S_3 , nos instantes t_0 , t_1 e t_2 .

Como previsto, na Figura 43, após a eliminação das amostras em excesso, o tempo do sinal prático e recebido, correspondeu ao obtido teoricamente, ou seja, 5.12 ms . Para além do mais, o ruído relativo ao LED violeta, em t_2 , no canal V_{S3} , é claramente eliminado, sendo causado apenas por uma amostra do sub-bloco $PIN2$. Como o LED contém a cor com menor comprimento de onda ($\lambda_v=405 \text{ nm}$) e o seu sinal óptico é menos intenso, no final, acaba por não ter impacto no sinal recebido pelo fotodiodo PIN/PIN.

Por fim, também se verifica que os sinais recebidos, S_1 , S_2 e S_3 , têm, o seu valor máximo ligeiramente diferente dos sinais obtidos teoricamente, que é cerca de 0.95, 0.78 e 0.78, respetivamente, de intensidade normalizada. Isto acontece, porque a curva de calibração obtida a nível prático, na simulação de um cenário “real”, (com ruído e atenuações na potência recebida pelo fotodiodo), vai ser sempre diferente da obtida teoricamente, na simulação de um cenário ideal (obtida através de *software*).

5.3 Comunicação bidirecional

De forma a ser testada uma comunicação bidirecional, ou seja, dos LEDs brancos RGBV [6] para o fotodíodo PIN/PIN [7, 8] (*downlink*), e vice-versa (*uplink*), foi proposto o cenário ilustrado na Figura 44, que consiste na deslocação do utilizador 7261, que se localiza na região *footprint* #1 da célula $C_{(4,3,1)}$, até ao encontro do seu amigo, utilizador 3009, que se localiza na região *footprint* #6 da célula $C_{(4,4,1)}$. Este encontro é possível, com a ajuda do controlador local, que indica ao utilizador 7261 o caminho mais curto para se encontrar com o utilizador 3009.

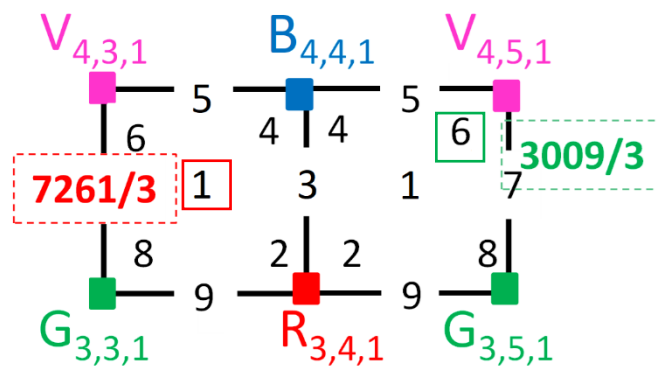


Figura 44 - Representação da localização inicial dos recetores 7261 e 3009, que se encontram, respetivamente, nas regiões *footprint* #1 e #6.

5.3.1 Utilizador 7261

Tendo o utilizador 7261 o propósito de se encontrar com o 3009, ambos combinam, previamente, o mesmo código de encontro. O primeiro pede ajuda ao controlador local, para saber o caminho mais curto, de modo a encontrar-se com o seu amigo. Posteriormente, desloca-se nos instantes t_0 , t_1 , t_2 e t_3 para as regiões *footprint* #1, #3, #1 e #6, respetivamente, como se pode observar na Figura 45.

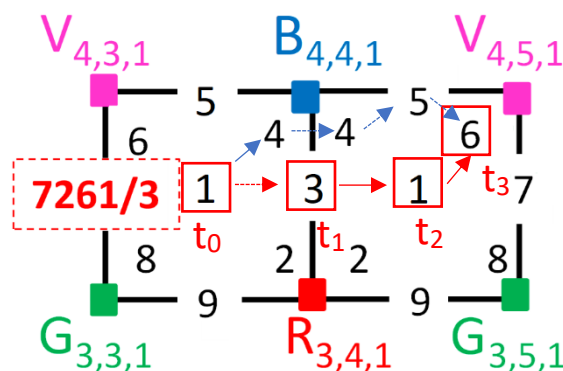


Figura 45 - Representação da deslocação do utilizador 7261 pelo percurso mais curto (ilustrado a vermelho), passando pelas regiões *footprint* #1, #3, #1 e #6, nos instantes t_0 , t_1 , t_2 e t_3 , respetivamente, e pelo suposto percurso mais longo (ilustrado a azul), passando pelas regiões *footprint* #1, #4, #4, #5 e #6.

Em seguida ao ajuste das curvas de calibração *standard*, prática e teórica, representadas, respetivamente, nas Figuras 31 e 33, foram introduzidos na aplicação, ilustrada na Figura 37, e no *software* de laboratório, os sinais relativos ao utilizador 7261, para os dois primeiros conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Desta forma, os canais dos LEDs R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} transmitem os seus sinais codificados com a informação que o fotodíodo PIN/PIN irá receber. De seguida, o dispositivo multiplexa os diferentes canais óticos, em S_1 e S_2 , e desmultiplexa os sinais óticos codificados, para recuperar a informação, inicialmente, transmitida pelos LEDs, como se pode constatar nos sinais seguintes e Figuras 46, 47 e 48.

R_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
1,1,1,1,1,1, 0, 0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0]
 G_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,1,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
1,1,1,1,0,0,0, 0, 0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0]
 B_{S1} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
1,1,0,0,1,1,0, 0, 0,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,1]
 V_{S1} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
1,0,1,0,1,0,1, 0, 0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0]

R_{S2} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,1, 0,0,1,1, 0,0,1,1,
1,1,1,1,1,1, 0, 0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,0]
 G_{S2} [0,0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0, 0, 0,0]
 B_{S2} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,0, 0,0,1,1, 0,0,1,1,
1,1,0,0,1,1,0, 0, 0,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0]
 V_{S2} [0,0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0, 0, 0,0]

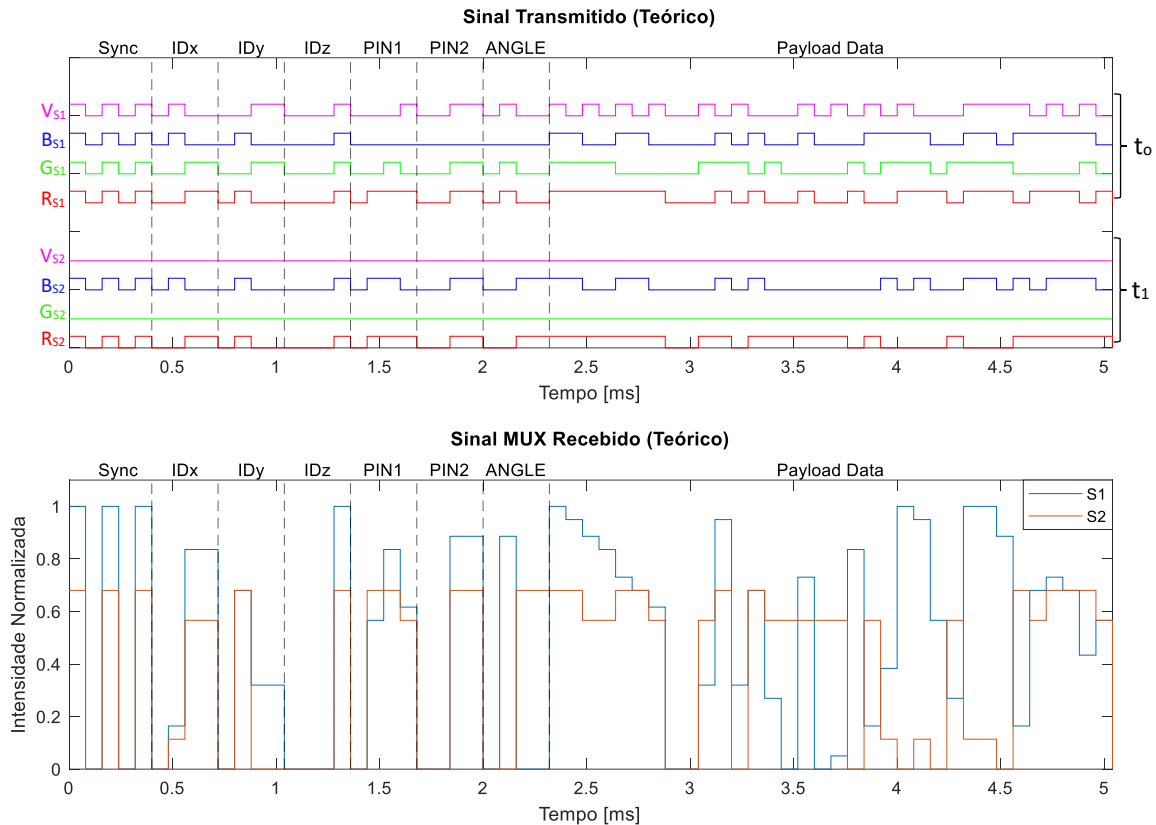


Figura 46 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1 e S_2 , nos instantes t_0 e t_1 .

Na Figura 46, examinando os sinais, S_1 e S_2 , recebidos e posteriormente multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN, percebe-se que desmultiplexando o sinal S_1 , este corresponde aos sinais, codificados, transmitidos pelos LEDs, em t_0 , e que a sua intensidade tem o valor máximo igual a 1. Contudo, desmultiplexando o sinal recebido S_2 , este corresponde aos sinais codificados, transmitidos pelos LEDs para o fotodíodo, no instante t_1 , e tem uma intensidade máxima menor que a do sinal S_1 , cerca de 0.68. Isto pode ser explicado pelo facto de, os sinais S_1 e S_2 corresponderem à posição, do utilizador 7261, nas regiões *footprint* #1 e #3. Desta forma, em t_0 , todos os 4 LEDs estão ligados (R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} e V_{S1}) e, por isso, o utilizador, munido de um fotodíodo, encontra-se abrangido pelo raio dos mesmos. Já do conjunto de sinais, R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} e V_{S2} , os LEDs verde (G_{S2}) e violeta (V_{S2}) estão desligados, estando o utilizador incluído apenas nos LEDs vermelho (R_{S2}) e azul (B_{S2}). Por fim, ambos, os sinais transmitidos e recebidos, têm na totalidade 64 *bits* e uma duração de 5.12 *ms*.

Posteriormente à realização da descodificação “ideal” do sinal multiplexado e recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, é possível verificar, como ilustra a Figura 47, a informação inicialmente transmitida pelos LEDs e saber a localização do utilizador.

```

-----Início da Descodificação-----
**S1**
Sync: #1
ID: R(3,4,1) G(3,3,1) B(4,4,1) V(4,3,1)
PIN2: 3
Angle: Code 4 (45°)
PD: R(11111110001010010010011101110111010) G(11110000011101000010111011110000100)
      B(11001100010010001101111000110011001) V(10101010010100010101010001111010100)
**S2**
Sync: #3
ID: R(3,4,1) G(0,0,0) B(4,4,1) V(0,0,0)
PIN2: 3
Angle: Code 3 (0°)
PD: R(11111110011011111101000010001111110) G(0000000000000000000000000000000000000000)
      B(11001100001010000000101001101011100) V(0000000000000000000000000000000000000000)
-----Fim da Descodificação-----

```

Figura 47 - Descodificação “ideal” dos sinais (S_1 e S_2), recebidos e multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN e transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, nos instantes t_0 e t_1 .

Dos resultados mostrados na Figura 47 verifica-se que, após a descodificação dos sinais S_1 e S_2 , o utilizador, nos instantes t_0 e t_1 , se encontra nas regiões *footprint* #1 e #3 (*Sync*) da célula $C_{(4,3,1)}$ (*ID*), respetivamente.

O sub-bloco *PIN2* contém o valor de 3, uma vez que o utilizador quis encontrar-se com o seu amigo, definindo entre ambos o código de encontro número três. O 7261 pediu ao controlador local o caminho mais curto para ir de encontro ao utilizador 3009.

Inicialmente, o utilizador 7261, como ainda não recebeu a resposta do CM, em t_0 , direciona-se para a região *footprint* #4 da célula $C_{(4,3,1)}$, pensando erradamente que o caminho mais curto será o trajeto representado a azul, na Figura 45. No entanto, em t_1 o utilizador já contém a direção correta, previamente transmitida pelo CM, indicando assim que o caminho mais curto é o ilustrado a verde, na mesma Figura. Assim, o sub-bloco *Angle*, nos instantes t_0 e t_1 , têm, respetivamente, o valor de 45° e 0° .

Por fim, através da descodificação representada acima, observa-se que o sub-bloco *Payload Data* indica a informação adicional.

Após várias medições laboratoriais, obtiveram-se os sinais, sem ruído, transmitidos, pelos LEDs brancos RGBV, e recebidos, pelo fotodíodo PIN/PIN, como se ilustra na Figura 48.

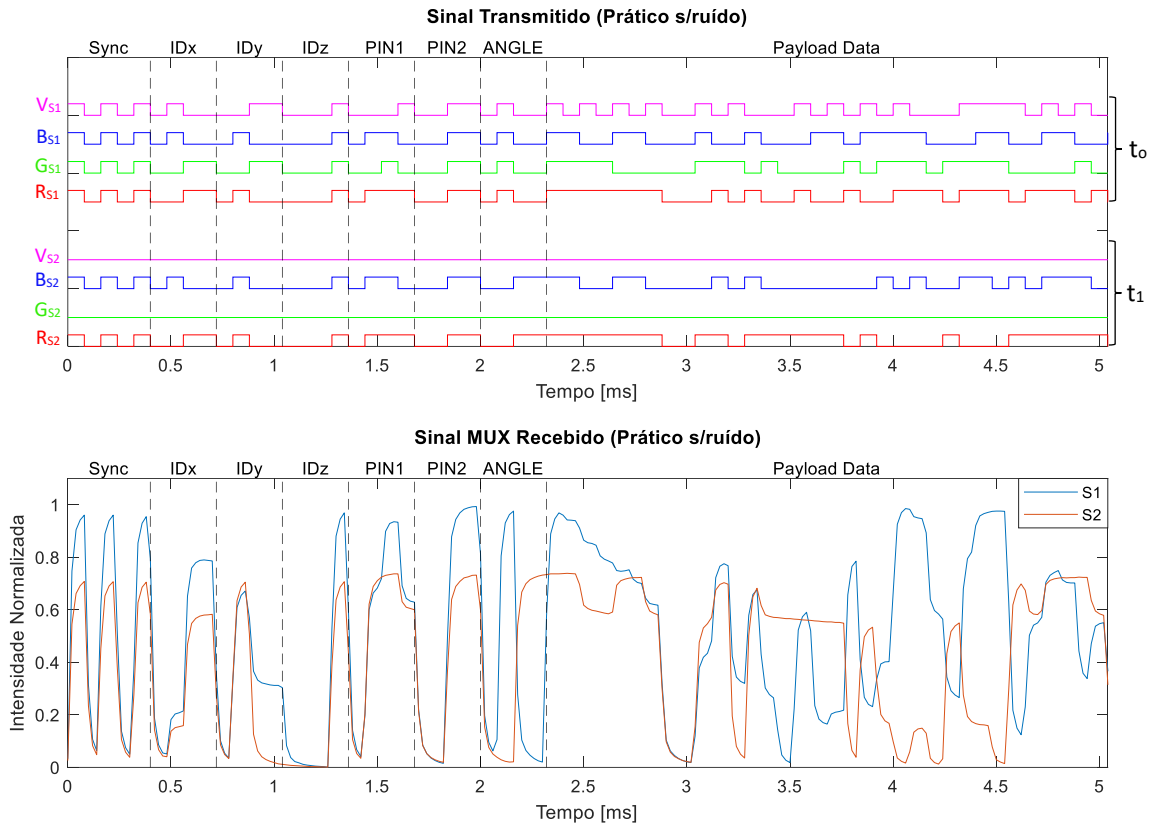


Figura 48 - Representação prática de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodiodo PIN/PIN e posteriormente multiplexados, sem ruído, em S_1 e S_2 , nos instantes t_0 e t_1 .

Analisando a Figura 48 verifica-se que os sinais transmitidos, R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} , são multiplexados pelo fotodetetor, dando origem aos sinais recebidos, S_1 e S_2 , nos instantes t_0 e t_1 , respetivamente. Estes revelam ser semelhantes aos obtidos teoricamente, na Figura 46. No entanto, observa-se que os sinais recebidos, S_1 e S_2 , obtidos a nível prático, têm o seu valor máximo ligeiramente menor e maior, respetivamente, do que o dos sinais obtidos teoricamente, isto é, por volta de 0.95 e 0.72 de intensidade normalizada, respetivamente. Isso acontece, porque a curva de calibração, obtida a nível prático, é diferente (cenário "real") da obtida teoricamente (cenário ideal). Por conseguinte, o utilizador 7261, em t_0 e t_1 , encontra-se, respetivamente, nas regiões *footprint* #1 [RGBV] e #3 [RGBV] da célula $C_{(4,3,1)}$. Também se observa que tempo total dos sinais práticos, transmitido e recebido, corresponde a 5.12 ms.

Após o ajuste das curvas de calibração *standard*, prática e teórica, representadas, respetivamente, nas Figuras 31 e 33, foram introduzidos, na aplicação, ilustrada na Figura 37, e no *software* de laboratório, os sinais relativos ao utilizador 7261, para os dois primeiros conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Desta forma, os canais dos LEDs R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} transmitem os seus sinais codificados com a informação que o fotodiodo PIN/PIN irá receber. De seguida, o dispositivo multiplexa os diferentes canais óticos, em S_1 e S_2 , e desmultiplexa os sinais óticos codificados para recuperar a informação, inicialmente, transmitida pelos LEDs, como se pode constatar nos sinais seguintes e Figuras 49, 50 e 51.

R_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
 1,1,1,1,1,1, 0, 0,1,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0]
 G_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,1, 0,0,0,1, 0,0,1,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
 1,1,1,1,0,0,0, 0, 0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0]
 B_{S1} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
 1,1,0,0,1,1,0, 0, 0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0]
 V_{S1} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,1, 0,0,0,1, 0,0,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
 1,0,1,0,1,0,1, 0, 0,0,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1]

R_{S2} [0,0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0, 0, 0,0]
 G_{S2} [1,0,1,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,1, 0,0,0,1, 0,0,1,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
 1,1,1,1,0,0,0, 0, 0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0]
 B_{S2} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
 1,1,0,0,1,1,0, 0, 0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0]
 V_{S2} [1,0,1,0,1, 0,1,0,0, 0,1,0,1, 0,0,0,1, 0,0,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0,
 1,0,1,0,1,0,1, 0, 0,0,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1]

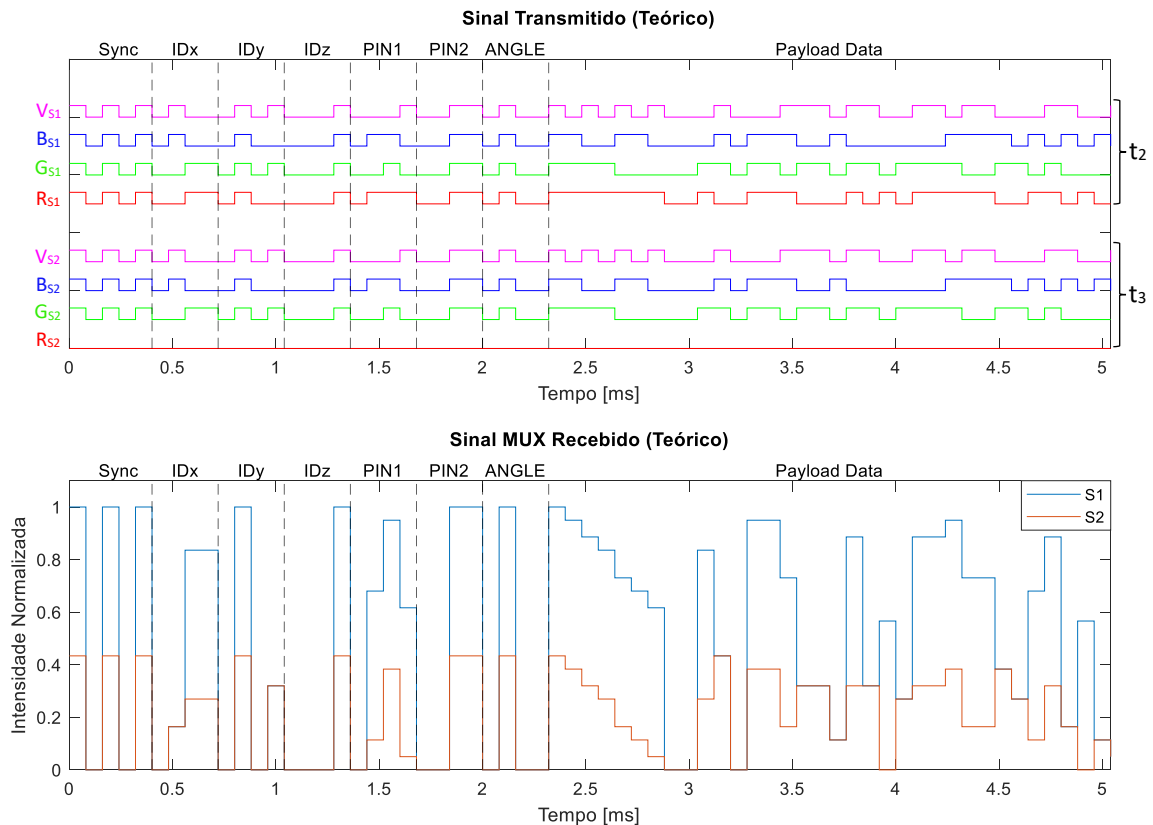


Figura 49 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1 e S_2 , nos instantes t_2 e t_3 .

Analisando os sinais, S_1 e S_2 , recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, da Figura 49, constata-se que o sinal multiplexado S_1 correspondente aos sinais codificados e transmitidos pelos LEDs, em t_2 , e que a sua intensidade tem um valor máximo igual a 1. No entanto, o sinal multiplexado S_2 , que corresponde aos sinais codificados, transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, no instante t_3 , tem uma intensidade máxima menor que a do sinal S_1 , que é de cerca de 0.43. Isto acontece de forma semelhante, na Figura 46, no entanto os sinais S_1 e S_2 correspondem, respetivamente, à

altura em que o utilizador 7261 se encontra nas regiões *footprint* #1 e #6. Desta forma, na Figura 49, em t_2 todos os 4 LEDs estão ligados (R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} e V_{S1}). Por outro lado, em t_3 , o LED vermelho (R_{S2}) está desligado, ou seja, só estão ligados 3 LEDs (G_{S2} , B_{S2} e V_{S2}). Por fim, também se observa que os sinais transmitidos e recebidos, têm, na totalidade, 64 *bits*, e como o tempo por *bit* foi definido em 0.08 *ms*, a sua duração é de 5.12 *ms*.

A seguir à realização da descodificação “ideal” do sinal multiplexado e recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, é possível verificar, como ilustra a Figura 50, a informação codificada, inicialmente transmitida, pelos LEDs brancos RGBV, e saber a localização do utilizador.

```
-----Início da Descodificação-----
**S1**
Sync: #1
ID:   R(3,4,1) G(3,5,1) B(4,4,1) V(4,5,1)
PIN2: 3
Angle: Code 4 (45°)
PD:   R(11111110010011100010101111100110100) G(11110000011011011011011110011010000)
      B(11001100001011100100000011110101010) V(10101010001000111011001101100011001)
**S2**
Sync: #6
ID:   R(0,0,0) G(3,5,1) B(4,4,1) V(4,5,1)
PIN2: 3
Angle: Code 4 (45°)
PD:   R(000000000000000000000000000000000000) G(11110000011011011011011110011010000)
      B(11001100001011100100000011110101010) V(10101010001000111011001101100011001)
-----Fim da Descodificação-----
```

Figura 50 – Descodificação “ideal” dos sinais (S_1 e S_2), recebidos e multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN e transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, nos instantes t_2 e t_3 .

Analisando a Figura 41 conclui-se que, após a descodificação dos sinais S_1 e S_2 , o utilizador 7261, no instante t_2 , se encontra na região *footprint* #1 (*Sync*) da célula $C_{(4,4,1)}$ (*ID*) e, no instante t_3 , se encontra, finalmente, com o utilizador 3009, que se situa na *footprint* #6, da mesma célula. Também se observa, em ambos os instantes, que o sub-bloco *PIN2* contém o código de encontro igual a 3 e que sub-bloco *Angle* tem o valor de 4, correspondente à direção de 45°.

Por fim, observa-se que o sub-bloco *Payload Data* indica a informação adicional.

Após várias medições laboratoriais, obtiveram-se os sinais recebidos, S_1 e S_2 , sem ruído, como se ilustra na Figura 51.

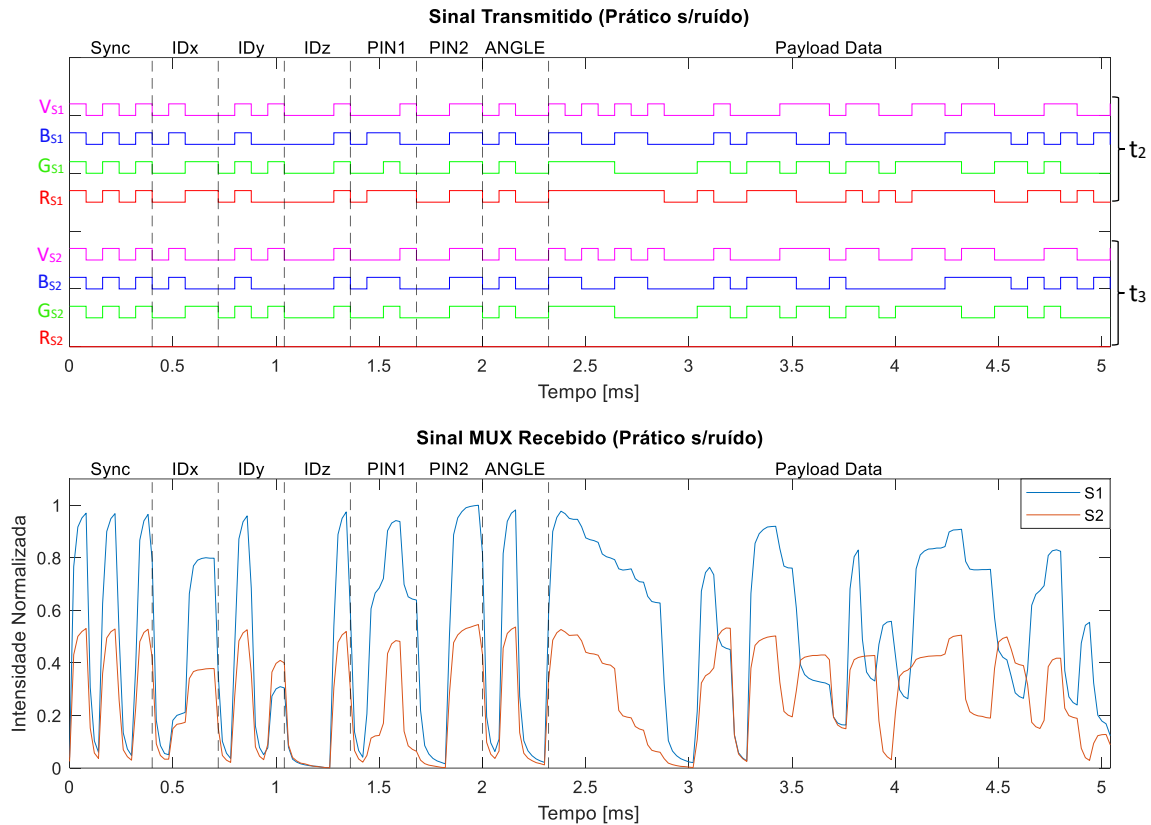


Figura 51 - Representação prática de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados, sem ruído, em S_1 e S_2 , nos instantes t_2 e t_3 .

Analisando a Figura 51, verifica-se que os sinais S_1 e S_2 são obtidos através da multiplexação dos transmitidos, pelos canais LED, R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} , e recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, nos instantes t_2 e t_3 , sendo semelhantes aos obtidos teoricamente, na Figura 49. Porém, constata-se que os sinais recebidos, S_1 e S_2 , têm o seu valor máximo ligeiramente menor e maior, respetivamente, do que os sinais obtidos teoricamente, isto é, de cerca de 0.95 e 0.47 de intensidade normalizada. O mesmo acontece, porque a curva de calibração obtida a nível prático, simulação de um cenário “real” (com ruído e atenuações na potência recebida, pelo fotodíodo), será sempre diferente da obtida teoricamente, simulação de um cenário ideal (obtida através de *software*). Assim, o utilizador 7261, em t_2 e t_3 , encontra-se, respetivamente, nas regiões *footprint* #1 [RGBV] e #6 [RGBV] da célula $C_{(4,4,1)}$. Também se constata que o tempo total para ambos os sinais práticos, transmitido e recebido, corresponde a 5.12 ms.

5.3.2 Controlador local (CM)

Com a finalidade de auxiliar o utilizador 7261 a ir de encontro ao utilizador 3009, o controlador local, que se situa no centro de cada célula unitária, interveio no trajeto em dois instantes. Como se pode verificar na Figura 52, nos instantes t_0 e t_2 , o CM corrigiu a direção do utilizador 7261, que se situava, respetivamente, nas regiões *footprint* #1 das células $C_{(4,3,1)}$ e $C_{(4,4,1)}$, do piso 1.

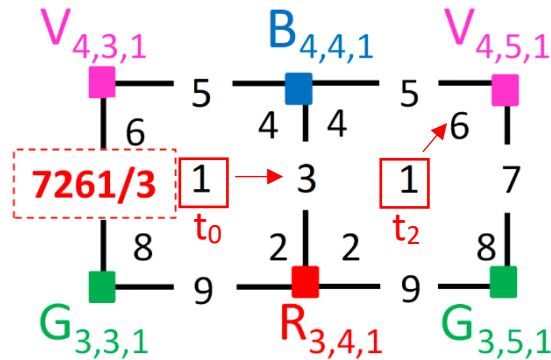


Figura 52 - Representação da intervenção do controlador local no percurso do utilizador 7261, nos instantes t_0 e t_2 em que o mesmo se encontra, respetivamente, nas regiões *footprint* #1 das células $C_{(4,3,1)}$ e $C_{(4,4,1)}$, do piso 1.

Uma vez que existe intervenção do controlador local no percurso do utilizador 7261, os sinais transmitidos, pelos LEDs brancos RGBV, contêm uma constituição semelhante ao apresentado na Tabela 8, no entanto, é adicionado um sub-bloco *CM*, como se observa na Tabela 10. Posto isto, se o sub-bloco *CM* tiver o valor de 1, significa que existe intervenção do controlador local. Caso contrário, o mesmo não intervém e o *CM* contém o valor de 0.

Tabela 10 - Constituição dos 7 sub-blocos do bloco de 64 *bits* de informação codificada do controlador local.

<i>Sync</i>	<i>CM</i>	$ID_{(x,y,z)}$	<i>PIN1 (User ID)</i>	<i>PIN2 (Meeting code)</i>	<i>Angle</i>	<i>Payload Data</i>	Total de <i>bits</i>
5 <i>bits</i>	4 <i>bits</i>	(12 <i>bits</i>) (ID_x, ID_y, ID_z) (4,4,4) <i>bits</i>	(4 <i>bits</i>) número decimal de 0-9, por canal RGBV	(4 <i>bits</i>) 0, se for realizado nenhum encontro	4 <i>bits</i>	31 <i>bits</i>	64 <i>bits</i>

Na Tabela 10, evidenciam-se 7 sub-blocos diferentes de informação (*Sync*, *CM*, *ID*, *PIN1*, *PIN2*, *Angle* e *Payload Data*). O sub-bloco *Sync* é constituído por 5 *bits*, o *CM* por 4 *bits*, o *ID* por 12 *bits*, o *PIN1* por 4 *bits*, o *PIN2* por 4 *bits* e o *Angle* por 4 *bits*. Por fim, o sub-bloco *Payload Data* é constituído por 31 *bits* (30 *bits* de informação mais 1 *bit* de paragem), perfazendo, na totalidade dos sub-blocos 64 *bits*.

Em seguida ao ajuste das curvas de calibração *standard*, prática e teórica, representadas, respetivamente, nas Figuras 31 e 33, foram introduzidos na aplicação, ilustrada

na Figura 37, e no *software* de laboratório, os sinais relativos ao controlador local, para os dois primeiros conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Desta forma, os canais dos LEDs CM, R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} transmitem os seus sinais codificados, com a informação que o fotodíodo PIN/PIN irá receber. De seguida, o dispositivo multiplexa os diferentes canais óticos, em S_1 e S_2 , e desmultiplexa os sinais óticos codificados para recuperar a informação, inicialmente, transmitida pelos LEDs, como se pode constatar nos sinais seguintes e Figuras 53, 54 e 55.

R_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,0,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,1, 0,0,1,1, 0,0,1,1, 1,1,1, 0, 0,0,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0]

G_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,0,0, 0,0,1,1, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,1,0, 0,0,1,1, 0,0,1,1, 1,1,1, 0, 0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1]

B_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,0,0, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,0, 0,0,1,1, 0,0,1,1, 1,1,0, 0, 0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,0,1,0]

V_{S1} [1,0,1,0,1, 0,0,0,0, 0,1,0,0, 0,0,1,1, 0,0,0,1, 0,0,0,1, 0,0,1,1, 0,0,1,1, 1,0,1, 0, 0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1]

R_{S2} [1,0,1,0,1, 0,0,0,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 1,1,1, 0, 0,0,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0,0,0,1,1]

G_{S2} [1,0,1,0,1, 0,0,0,0, 0,0,1,1, 0,1,0,1, 0,0,0,1, 0,0,1,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 1,1,1, 0, 0,0,1,1,0,1,0,0,1,1,1,0,1,1,0,1,0,0,0,0,1,1]

B_{S2} [1,0,1,0,1, 0,0,0,0, 0,1,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,1, 0,1,1,0, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 1,1,0, 0, 0,0,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,1]

V_{S2} [1,0,1,0,1, 0,0,0,0, 0,1,0,0, 0,1,0,1, 0,0,0,1, 0,0,0,1, 0,0,1,1, 0,1,0,0, 1,0,1, 0, 0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0]

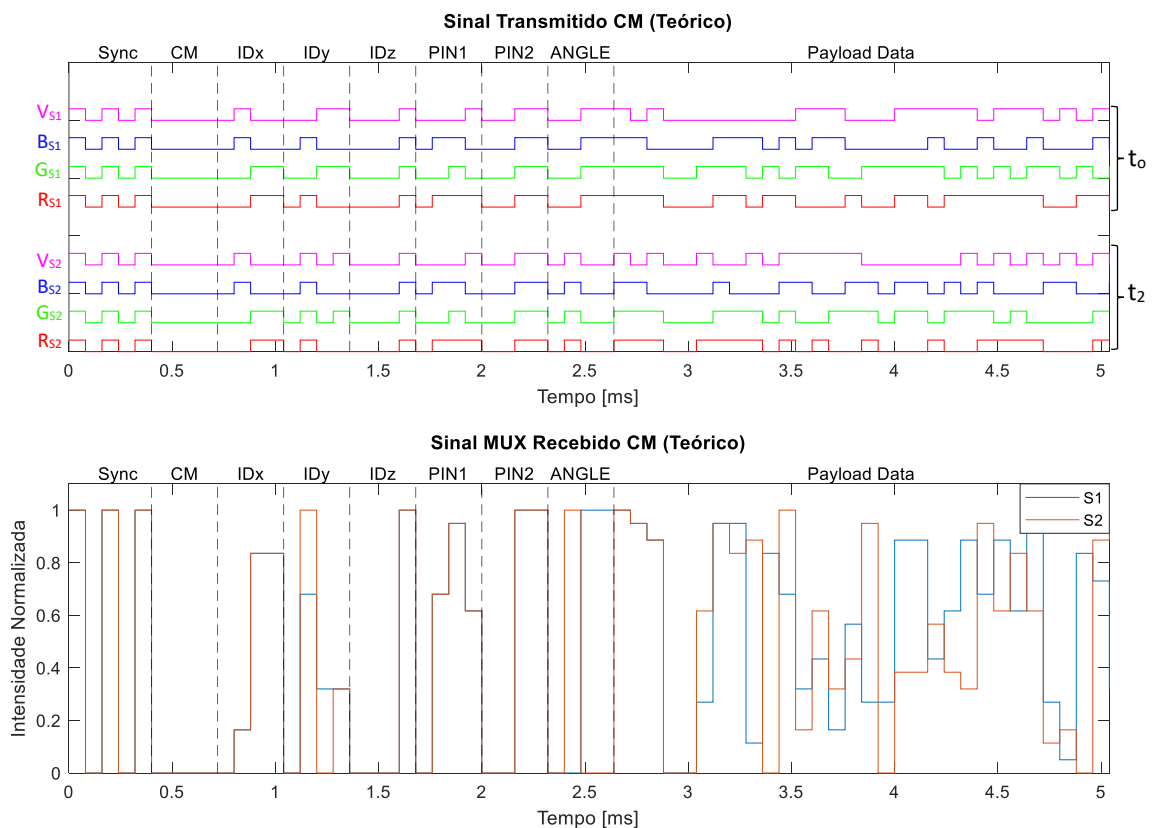


Figura 53 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais codificados, CM (R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2}), são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV do controlador local, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1 e S_2 , nos instantes t_0 e t_2 .

Considerando os sinais recebidos e, posteriormente, multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN, da Figura 53, verifica-se que, desmultiplexando os sinais recebidos, S_1 e S_2 , estes correspondem, aos sinais, codificados e transmitidos pelos LEDs, do CM, em t_0 e t_2 , respetivamente, em que ambas as intensidades têm o valor máximo igual a 1. Também se observa, nos sinais transmitidos, em ambos os instantes, que todos os 4 LEDs estão ligados (Rs_1, Gs_1, Bs_1, Vs_1 e Rs_2, Gs_2, Bs_2, Vs_2). Isto acontece, porque os sinais S_1 e S_2 correspondem, quando o utilizador 7261 se encontra nas regiões *footprint* #1 [RGBV] de células diferentes. Por fim, também se percebe que ambos os sinais, transmitidos e recebidos, têm na totalidade 64 *bits* e uma duração de 5.12 *ms*.

Posteriormente à realização da descodificação “ideal” do sinal multiplexado e recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, é possível verificar, como ilustra a Figura 54, a informação inicialmente transmitida pelos LEDs brancos RGBV, saber a localização do utilizador e corrigir a sua direção.

```

-----Início da Descodificação CM-----
**CM S1**
Sync: #1
CM: 0
ID: R(3,4,1) G(3,3,1) B(4,4,1) V(4,3,1)
PIN1: 7261
PIN2: 3
Angle: Code 3 (0°)
PD: R(111000110110001001101111100110) G(1110011101011001111101010110101)
    B(1100001110101100000100100100010) V(1010000000011100011111011101011)
**CM S2**
Sync: #1
CM: 0
ID: R(3,4,1) G(3,5,1) B(4,4,1) V(4,5,1)
PIN1: 7261
PIN2: 3
Angle: Code 4 (45°)
PD: R(1110011110101001000100111100011) G(1110001110100111011011101000011)
    B(1100001000110011011010100011001) V(1010010010111110000001010101010)
-----Fim da Descodificação CM-----

```

Figura 54 - Descodificação “ideal” dos sinais, CM (S_1 e S_2), recebidos e multiplexados pelo fotodíodo PIN/PIN, e transmitidos pelos LEDs brancos RGBV do controlador local, nos instantes t_0 e t_2 .

Dos resultados mostrados na Figura 54 identifica-se que, após a descodificação dos sinais S_1 e S_2 , o utilizador 7261, número indicado pelo sub-bloco *PIN1*, em ambos os instantes, se encontra na *footprint* #1 (*Sync*). No entanto, o recetor situa-se em células diferentes, ou seja, em t_0 , na $C_{(4,3,1)}$, e, no instante t_2 , situa-se na célula $C_{(4,4,1)}$, como indicado pelo sub-bloco *ID*. Também se observa que, como o utilizador se quer encontrar com o seu amigo, o bloco sub-bloco *PIN2* tem o valor de 3.

Através da descodificação, representada na Figura 54, também se pode constatar que o sub-bloco *Angle*, nos instantes t_0 e t_2 , têm, respetivamente, o valor de 0° e 45° . Isto significa que houve uma correção na direção do utilizador 7261, em t_0 , uma vez que esta tinha o valor correspondente a 45° . Por fim, verifica-se que o sub-bloco *Payload Data* indica a informação adicional.

Após várias medições laboratoriais, obtiveram-se os sinais recebidos, S_1 e S_2 , sem ruído, como se observa na Figura 55.

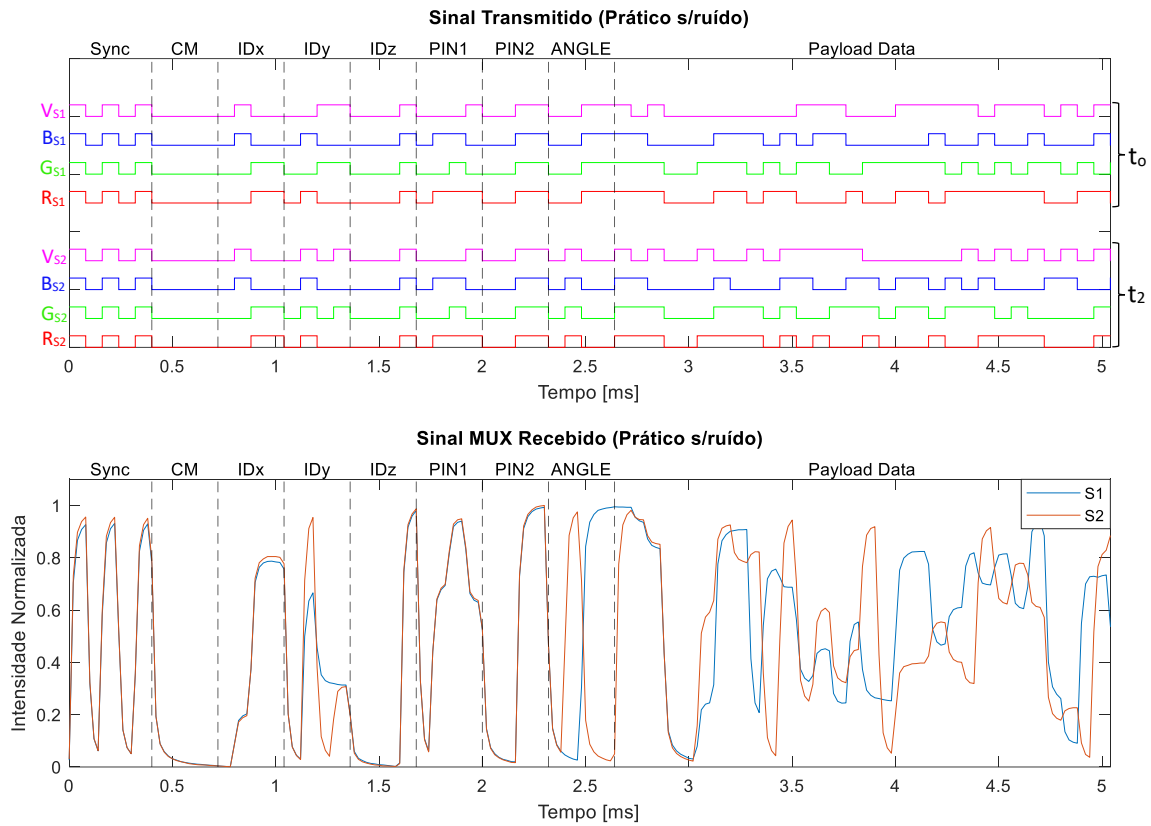


Figura 55 - Representação prática de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 7261. Os sinais, codificados, CM (R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2}), são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV do controlador local, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados, em S_1 e S_2 nos instantes t_0 e t_2 .

Analisando a Figura 55, verifica-se que os sinais S_1 e S_2 são obtidos através da multiplexação dos transmitidos pelos canais LED, do controlador local, R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1} e R_{S2} , G_{S2} , B_{S2} , V_{S2} , e recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, nos instantes t_0 e t_2 , sendo semelhantes aos obtidos teoricamente, na Figura 53. Contudo, verifica-se que os sinais recebidos, S_1 e S_2 , têm o seu valor máximo ligeiramente menor do que o do sinal obtido teoricamente, por volta de 0.95 de intensidade normalizada. Isto sucede, porque a curva de calibração, obtida a nível prático, é diferente (cenário com “real”) da obtida teoricamente (cenário ideal). Assim, o utilizador 7261, em t_0 e t_2 , encontra-se, respetivamente, nas regiões *footprint* #1 [RGBV] das células $C_{(4,3,1)}$ e $C_{(4,4,1)}$. Também se constata que o tempo total, para ambos os sinais práticos, transmitido e recebido, corresponde a 5.12 ms.

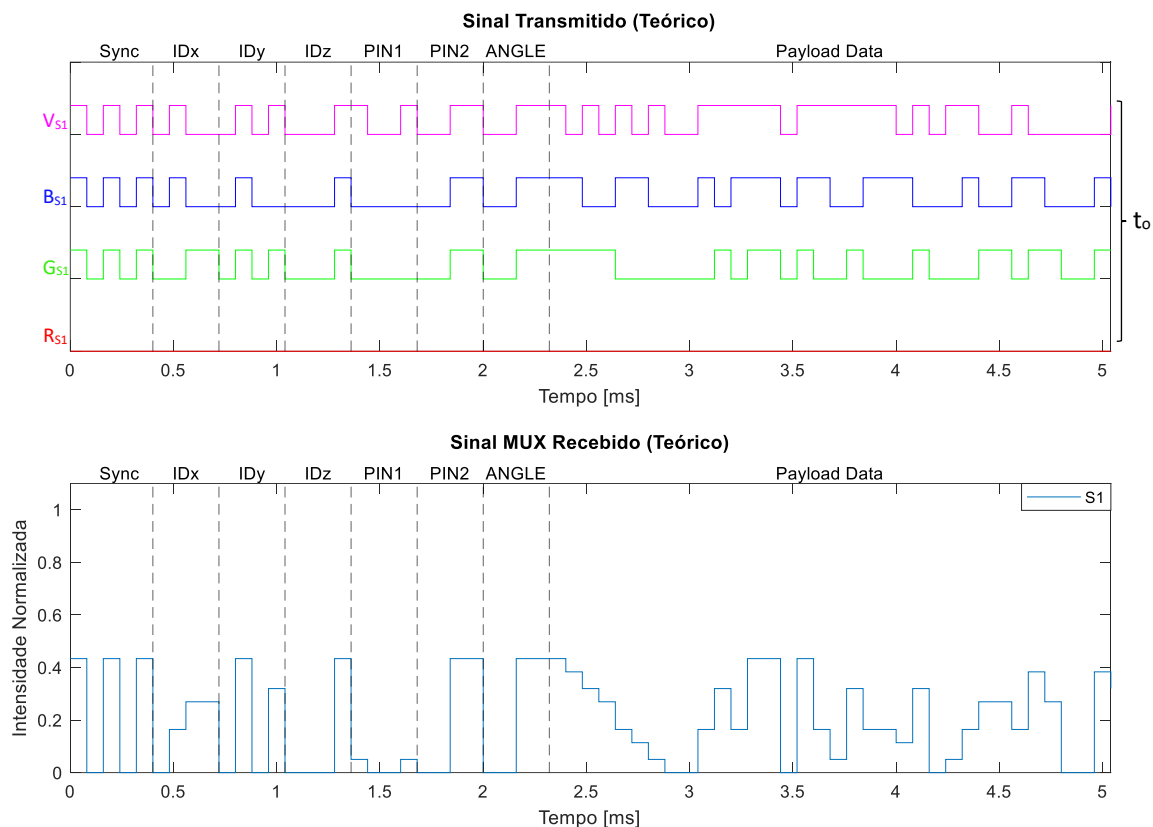


Figura 57 - Representação teórica de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 3009. Os sinais codificados, R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} e V_{S1} , são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados pelo mesmo, em S_1 , no instante t_0 .

Através da análise dos sinais transmitidos, teoricamente, representados na Figura 57, verifica-se, no conjunto de quatro LEDs (R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} , V_{S1}), que o vermelho se encontra desligado, ou seja, o recetor, em t_0 , situa-se dentro do raio de todos os LEDs, exceto o do vermelho (R_{S1}). Examinando o sinal S_1 , recebido e multiplexado pelo fotodíodo PIN/PIN, observa-se que este corresponde ao conjunto de sinais transmitidos pelos LEDs, em t_0 , e que a sua intensidade tem o valor máximo igual a 0.43. Isto acontece, porque o sinal S_1 representa, a altura em que o utilizador 3009 se localiza na região *footprint* #6 [RGBV]. Por fim, também se observa que os sinais transmitidos e recebidos, têm na totalidade 64 *bits* e, como o tempo por *bit* foi definido em 0.08 *ms*, a sua duração é de 5.12 *ms*.

Posteriormente à realização da desmultiplexação do sinal, multiplexado e recebido pelo fotodíodo, é possível verificar, como ilustra a Figura 58, a informação, codificada, inicialmente transmitida pelos LEDs e, através da descodificação “ideal”, saber a localização do utilizador.

```

-----Início da Descodificação-----
**S1**
Sync: #6
ID: R(0,0,0) G(3,5,1) B(4,4,1) V(4,5,1)
PIN2: 3
Angle: Code 3 (0°)
PD: R(00000000000000000000000000000000) G(11110000001011010010001000110110011)
      B(11001100010111011001110001001100010) V(1010101001111101111101011001000001)
-----Fim da Descodificação-----

```

Figura 58 - Descodificação “ideal” do sinal (S_1), recebido e multiplexado pelo fotodíodo PIN/PIN, e transmitido pelos LEDs brancos RGBV, nos instantes t_0 .

Analisando a Figura 58 identifica-se que, após a descodificação do sinal S_1 , o utilizador 3009 se encontra no instante t_0 , na região *footprint* #6 da célula $C_{(4,4,1)}$, através dos sub-blocos *Sync* e *ID*. Também se observa que, como o utilizador se quer encontrar com o seu amigo (7261), o sub-bloco *PIN2* tem o valor de 3.

Atendendo à descodificação representada na Figura 58, também se pode constatar que o sub-bloco *Angle*, no instante t_0 , tem o valor 3, correspondente à direção de 0° . Por fim, verifica-se que o sub-bloco *Payload Data* indica a informação adicional.

Após várias medições laboratoriais, obteve-se o sinal recebido, S_1 , sem ruído, como se observa na Figura 59.

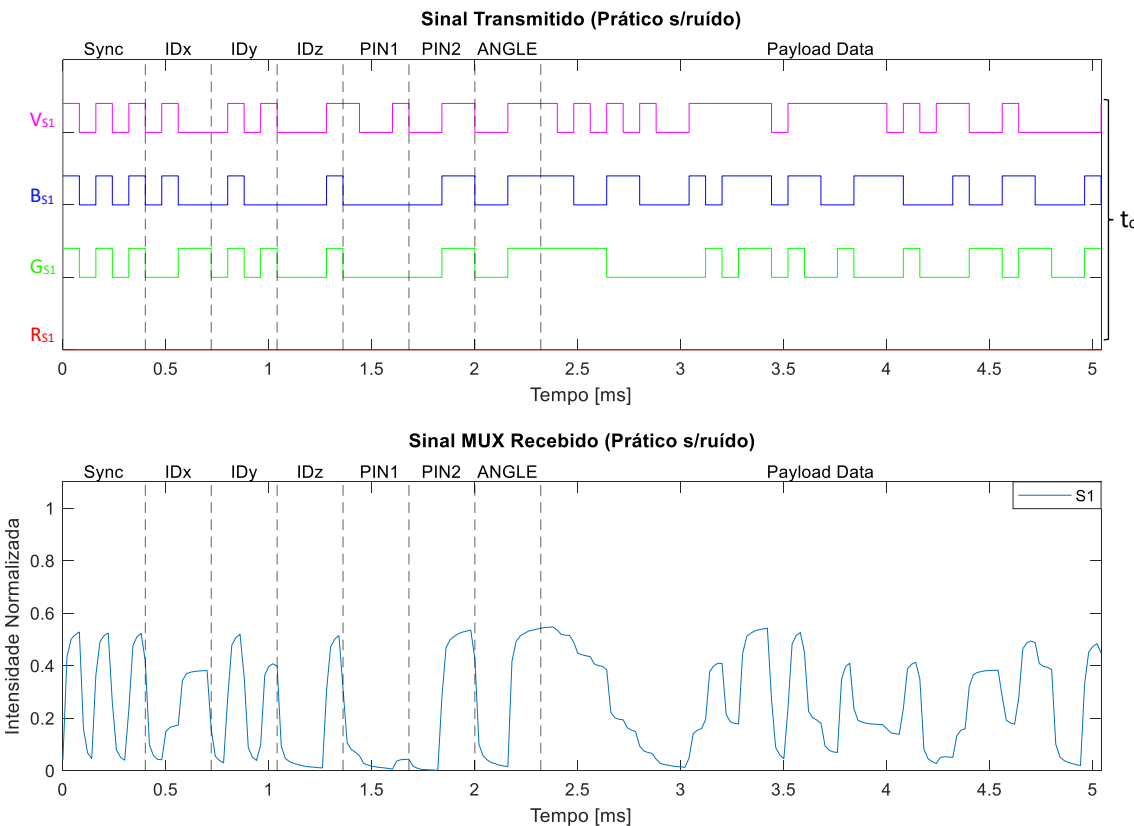


Figura 59 - Representação prática de uma comunicação bidirecional, relativa ao utilizador 3009. Os sinais codificados, R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} e V_{S1} , são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV, recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN e, posteriormente, multiplexados sem ruído, em S_1 , no instante t_0 .

Considerando os sinais transmitidos e recebidos, laboratorialmente, representados na Figura 59, evidencia-se um comportamento semelhante aos obtidos teoricamente, na Figura 57. Assim sendo, os sinais R_{S1} , G_{S1} , B_{S1} e V_{S1} são transmitidos pelos LEDs brancos RGBV e multiplexados pelo fotodíodo, no sinal S_1 , em t_0 . Desta forma, o utilizador 3009, em t_0 , encontra-se, na região *footprint* #6 [RGBV] da célula $C_{(4,4,1)}$. Também se verifica que o sinal recebido, S_1 , tem o seu valor máximo ligeiramente maior do que o sinal obtido teoricamente, ou seja, cerca de 0.47 de intensidade normalizada. Tal sucede, porque a curva de calibração, obtida a nível prático, é diferente (cenário “real”) da obtida teoricamente (cenário ideal). Por fim, também se observa que ambos os sinais, transmitidos e recebidos, têm na totalidade 64 *bits* e uma duração de 5.12 *ms*.

6.º Capítulo

Descodificação e controlo de erros

6.1 Introdução

Neste capítulo, será simulado, com a ajuda do laboratório e da aplicação (realizada através do *Software MatLab* e apresentada no capítulo 4), um caso mais realista, em que o utilizador da mesma, desconhece o sinal transmitido pelos LEDs brancos RGBV [6]. A partir dos sinais multiplexados no fotodíodo PIN/PIN [7, 8], da curva de calibração *standard* e da respetiva paridade, obtidas no laboratório, pretende-se determinar o sinal transmitido pelos LEDs, por forma a descobrir a localização do recetor.

6.2 Obtenção das curvas de calibração *standard* e paridade

Foram obtidas e representadas na Figura 60 novas curvas de calibração *standard* e paridade, com ganhos nos canais vermelho, verde, azul e violeta de, respetivamente, 2.75, 2.36, 2.32 e 1.28.

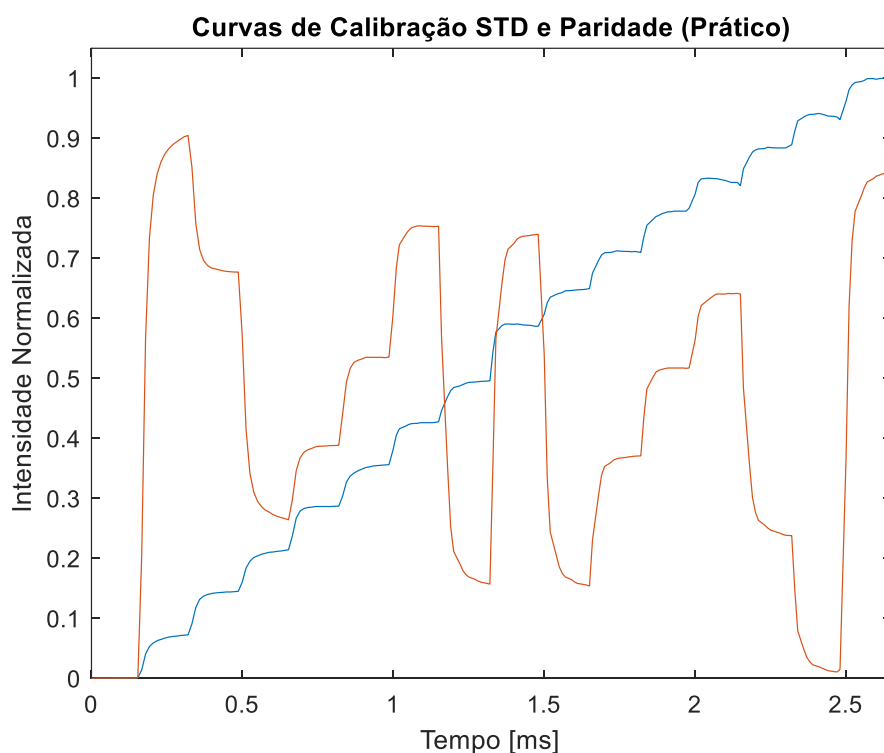


Figura 60 - Representação prática (obtida através de simulações no laboratório) da intensidade normalizada das curvas de calibração *standard* (a azul) e paridade (a vermelho).

Considerando a Figura 60, é possível perceber que a intensidade normalizada da curva a azul, que representa a calibração *standard* e contém 16 níveis distintos, é semelhante aos níveis da curva de calibração, obtida também laboratorialmente, representada na Figura 33 do capítulo 4. No entanto, a curva a vermelho, que representa a paridade da curva de calibração *standard*, contém apenas 8 níveis distintos, que se assemelham aos níveis pares da curva a azul. Isto acontece porque a paridade dos 16 níveis de calibração, relativos às 2^4 regiões possíveis de

cobrir com 4 LEDs [RGBV], resulta apenas em dois conjuntos “simétricos” de 8 níveis, dos quais o LED violeta se encontra sempre desligado. Desta forma, é possível cobrir apenas 2^3 regiões com 3 LEDs [RGB].

Também é possível observar que o nível máximo da curva da paridade (P_8) não corresponde ao penúltimo nível da curva de calibração *standard* (S_{14}), devido a algumas limitações do *software* e do ruído proveniente do meio em que a simulação foi realizada. De forma a mitigar estas anomalias, como se verifica na Figura 61, foi necessário fazer a média das 13 amostras que perfazem um *bit* para todos os níveis da curva *standard* de calibração. Já para a curva de calibração da paridade, além da média, foi necessário, devido às suas variações abruptas e conseqüente variação de declive, incluir o desvio padrão para a representação dos seus níveis. Foi subtraída ou somada a média com o desvio padrão, quando o declive da reta, formada pelas 13 amostras de cada nível, tinha um valor negativo ou positivo.

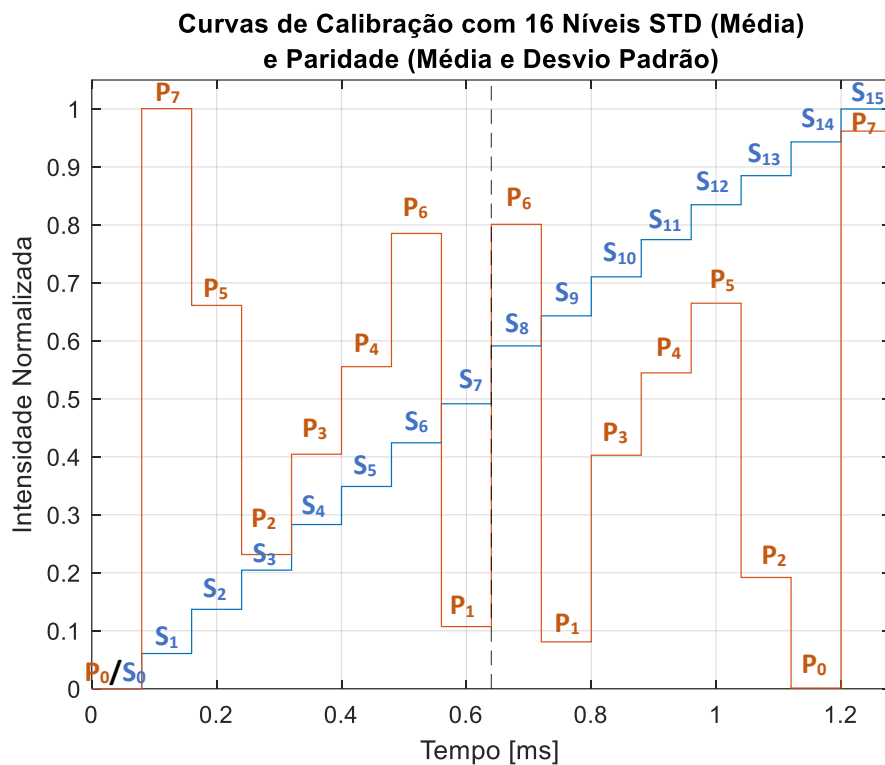


Figura 61 - Ilustração da intensidade normalizada dos 16 níveis da média da curva de calibração *standard* (a azul) e da média +/- desvio padrão da curva de paridade (a vermelho), representadas na Figura 60.

Analisando a Figura 61, verifica-se que a intensidade normalizada do nível P_7 do conjunto da direita, da curva de calibração da paridade, aproxima-se mais do nível S_{14} , da curva de calibração *standard*, do que o conjunto da esquerda. O mesmo acontece nos outros níveis, devido alguma assimetria entre os primeiros 8 níveis com os últimos 8, da curva de paridade. Por esta razão, como representado na Figura 62, foi necessário obter, dos dois conjuntos de 8 níveis, a curva de paridade com os 8 níveis mais próximos dos 16 níveis pares da curva de calibração *standard*.

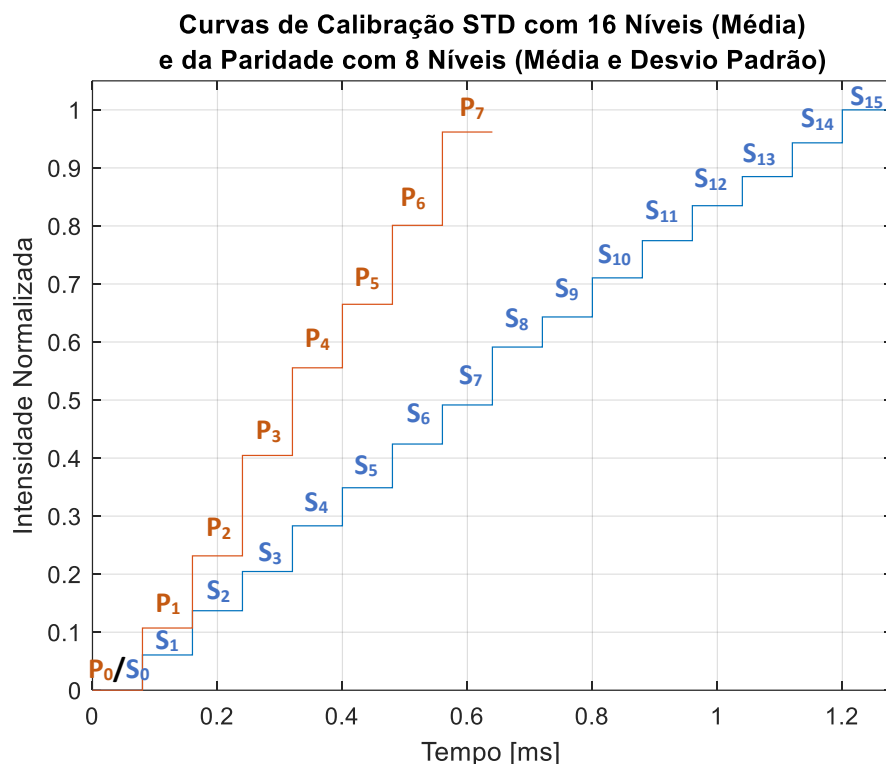


Figura 62 - Ilustração da intensidade normalizada dos 16 níveis da curva de calibração *standard* (a azul) e dos 8 níveis da curva de paridade (a vermelho) mais próximos dos 8 níveis pares da curva *standard*.

Observando a Figura 62 verifica-se que a intensidade normalizada dos 8 níveis da curva de calibração de paridade encontra-se próxima dos 8 níveis pares da curva de calibração *standard* ($P_0 - S_0 [-]$, $P_1 - S_2 [R]$, $P_2 - S_4 [G]$, $P_3 - S_6 [GB]$, $P_4 - S_8 [R]$, $P_5 - S_{10} [RB]$, $P_6 - S_{12} [RG]$, $P_7 - S_{14} [RGB]$). Contudo, existem níveis com um desnível maior do que outros. Assim, foi realizada a representação da Figura 63, que ilustra a intensidade normalizada do desnível entre os 8 níveis pares da curva de calibração *standard* com os 8 níveis da curva de paridade.

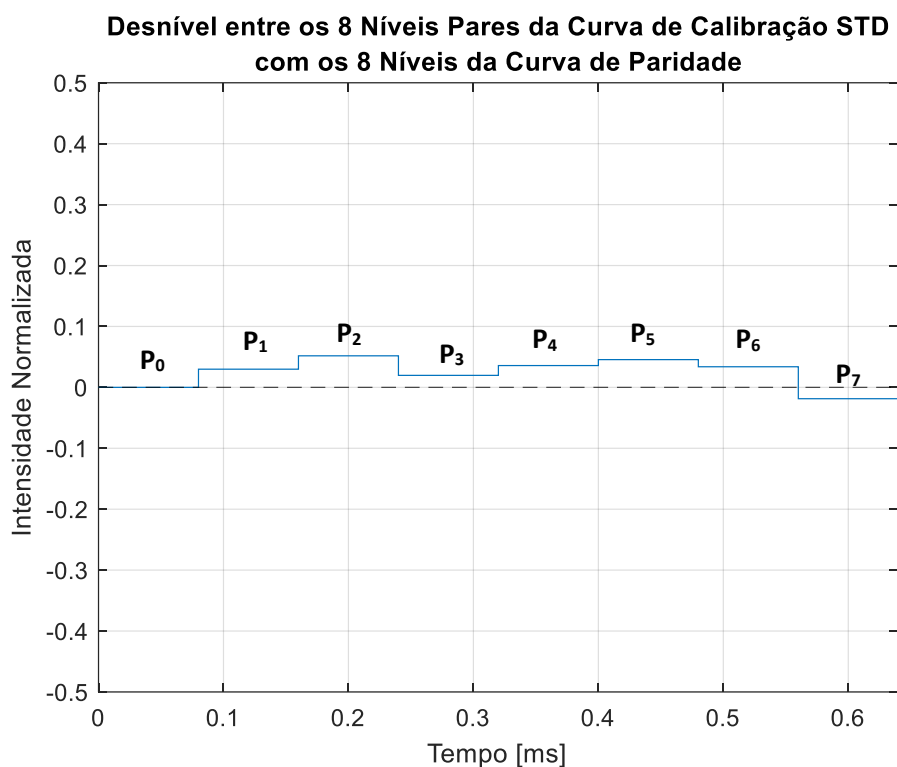


Figura 63 - Representação da intensidade normalizada do desnível entre os 8 níveis pares, da curva de calibração *standard*, com os 8 níveis da curva de paridade.

Analisando a Figura 63, é possível observar que a intensidade normalizada correspondente aos níveis P₀, P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, P₆, P₈ da curva de calibração de paridade têm um desnível comparado com os níveis pares da curva de calibração *standard*, respectivamente, 0, 0.0298, 0.0517, 0.0197, 0.0358, 0.0455, 0.0338 e -0.0186. Desta forma, pode-se concluir que os níveis de paridade P₂ e P₅, que correspondem, respectivamente, aos níveis S₄ [G] e S₁₀ [RB] da curva *standard*, são os que contêm maior desnível.

6.3 Cenário de teste de uma comunicação bidirecional

Foi decodificada a comunicação bidirecional apresentada no capítulo anterior, de forma a ser testada a eficácia do decodificador e do controlo de erros. Assim sendo, foi simulado, de novo, o cenário ilustrado na Figura 64, que consiste na deslocação do utilizador 7261 (representado a vermelho), que se localiza na região *footprint* #1 da célula $C_{(4,3,1)}$, até ao encontro do seu amigo, utilizador 3009 (representado a verde), que se localiza na região *footprint* #6 da célula $C_{(4,4,1)}$. O primeiro utilizador desloca-se pelas regiões *footprint* #1, #3, #1 e #6 nos instantes t_0 , t_1 , t_2 e t_3 . Já o segundo, permanece sempre na mesma região, *footprint* #6.

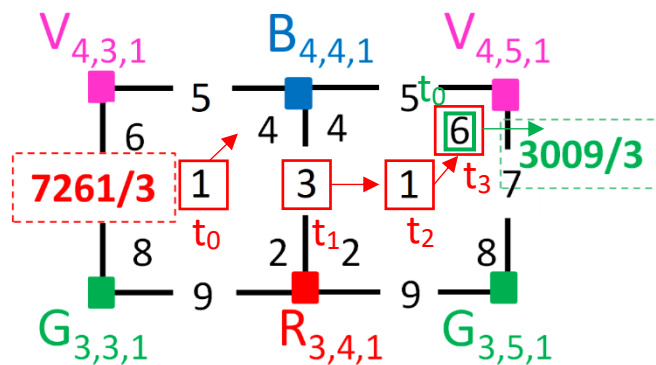


Figura 64 - Representação dos percursos e direções dos utilizadores 7261 e 3009, ilustrados, respetivamente, pelas setas e retângulos a vermelho e a verde. O primeiro desloca-se pelas regiões *footprint* #1, #3, #1 e #6 nos instantes t_0 , t_1 , t_2 e t_3 . O segundo permanece sempre na mesma região, *footprint* #6.

6.4 Reestruturação do bloco de informação codificada

A codificação é realizada usando a modulação OOK, mas devido às limitações do *software* de laboratório, foi necessário reestruturar o bloco de informação codificada, apresentada no capítulo 4. Por conseguinte, como se pode verificar na Tabela 11, a estrutura de 6 sub-blocos de informação mantém-se, mas a informação do sub-bloco *Payload Data* fica reduzida apenas a 3 *bits*, ou seja, passamos a ter uma dimensão total do bloco de 64 para 32 *bits*.

Tabela 11 - Constituição dos 6 sub-blocos do bloco de 32 *bits* de informação codificada.

<i>Sync</i>	$ID_{(x,y,z)}$	<i>PIN1</i> (<i>User ID</i>)	<i>PIN2</i> (<i>Meeting code</i>)	<i>Angle</i>	<i>Payload Data</i>	Total de <i>bits</i>
5 <i>bits</i>	(12 <i>bits</i>) (ID_x, ID_y, ID_z) (4,4,4) <i>bits</i>	(4 <i>bits</i>) número decimal de 0-9, por canal RGBV	(4 <i>bits</i>) 0, se for realizado nenhum encontro	4 <i>bits</i>	3 <i>bits</i>	32 <i>bits</i>

6.5 Utilizador 7261 em t_0 - Resultados obtidos a nível prático

Posteriormente ao ajuste das curvas de calibração *standard* e paridade, representadas na Figura 60, foram introduzidos no *software* de laboratório, os sinais transmitidos pelos dois conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Assim, os dois conjuntos P_{t_0} e S_{t_0} transmitem os sinais R_P, G_P, B_P, V_P e R_S, G_S, B_S, V_S , respetivamente, para o fotodíodo do utilizador 7261, no instante t_0 . Posteriormente, o fotodíodo multiplexa os sinais transmitidos, de forma a originar os sinais recebidos S_{STD} , provenientes do conjunto S_{t_0} , e o sinal S_P , proveniente do conjunto P_{t_0} , representados na Figura 65.

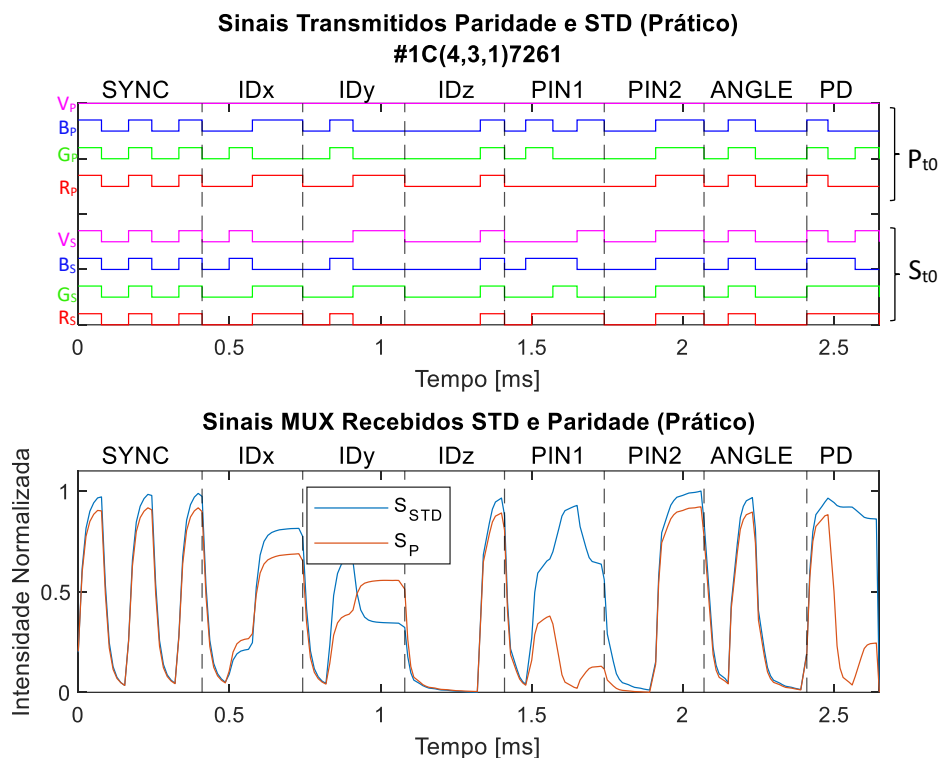


Figura 65 - Representações obtidas a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 7261 no instante t_0 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são obtidos, respetivamente, através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t_0} e P_{t_0} , e pré-calibrados com as curvas *standard* e paridade, da Figura 60.

Analisando a Figura 65, verifica-se que o sinal recebido S_P tem valor de intensidade normalizada máxima menor do que o sinal S_{STD} . Isto acontece, porque o sinal recebido S_{STD} é obtido através da transmissão do conjunto de sinais S_{t_0} para o fotodíodo do utilizador 7261 em t_0 e, como nesse instante o utilizador está na região *footprint* #1, é abrangido pelo raio de todos os LEDs. Desta forma, os 4 canais (R_S, G_S, B_S, V_S e G_S) participam na comunicação com o fotodíodo, fazendo com que este receba um sinal proporcionalmente intenso. No entanto, o sinal recebido S_P é obtido através da transmissão do conjunto de sinais P_{t_0} , e este, através da realização da paridade do sinal S_{t_0} , ou seja, o LED violeta encontra-se sempre desligado. Assim sendo, o canal V_P nunca participa na comunicação, fazendo com que o fotodíodo receba uma intensidade menor que a do S_{STD} .

6.6 Utilizador 7261 em t_0 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação

De modo a facilitar a realização da descodificação, devido ao ruído do meio em que foi realizada a simulação e às variações abruptas de intensidade normalizada dos sinais recebidos, S_{STD} e S_P (Figura 65), foi necessário realizar a média e o desvio padrão de cada uma das 6 amostras que perfazem um *bit*. Desta forma, procedeu-se à subtração ou soma da média com o desvio padrão, consoante o declive da reta (formada por 6 amostras) tivesse um valor negativo ou positivo. Assim, foram obtidos os valores de intensidade normalizada representados na Figura 66.

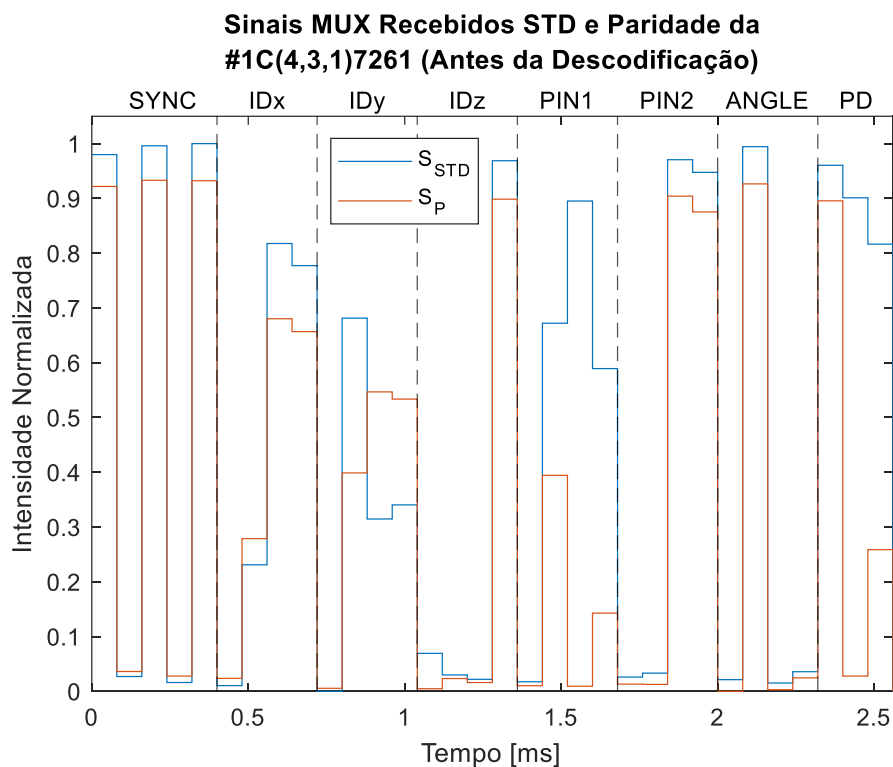


Figura 66 - Representações obtidas, antes da descodificação, relativas ao utilizador 7261 no instante t_0 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são obtidos através da média +/- desvio padrão dos sinais recebidos, da Figura 65.

Analisando a Figura 66, como os sinais S_{STD} e S_P são apenas a média e o desvio padrão dos sinais recebidos, obtidos laboratorialmente e representados na Figura 65, é possível verificar um comportamento semelhante. Por conseguinte, a intensidade normalizada máxima do sinal S_{STD} é maior em relação à do S_P . No entanto, ambos são agora apresentados em forma de escada, devido à diminuição do número de amostras, passando de 192 (na realidade são 207 devido ao ruído) para 32 amostras.

6.7 Processo de descodificação e controlo de erros do sinal recebido “real”

O processo de descodificação, sem erros, do sinal S_{STD} , recebido pelo fotodíodo e representado na Figura 66, para a obtenção do sinal S_{t0} , transmitido pelos LEDs brancos RGBV e representado nas Figuras 65, está esquematizada na Figura 67.

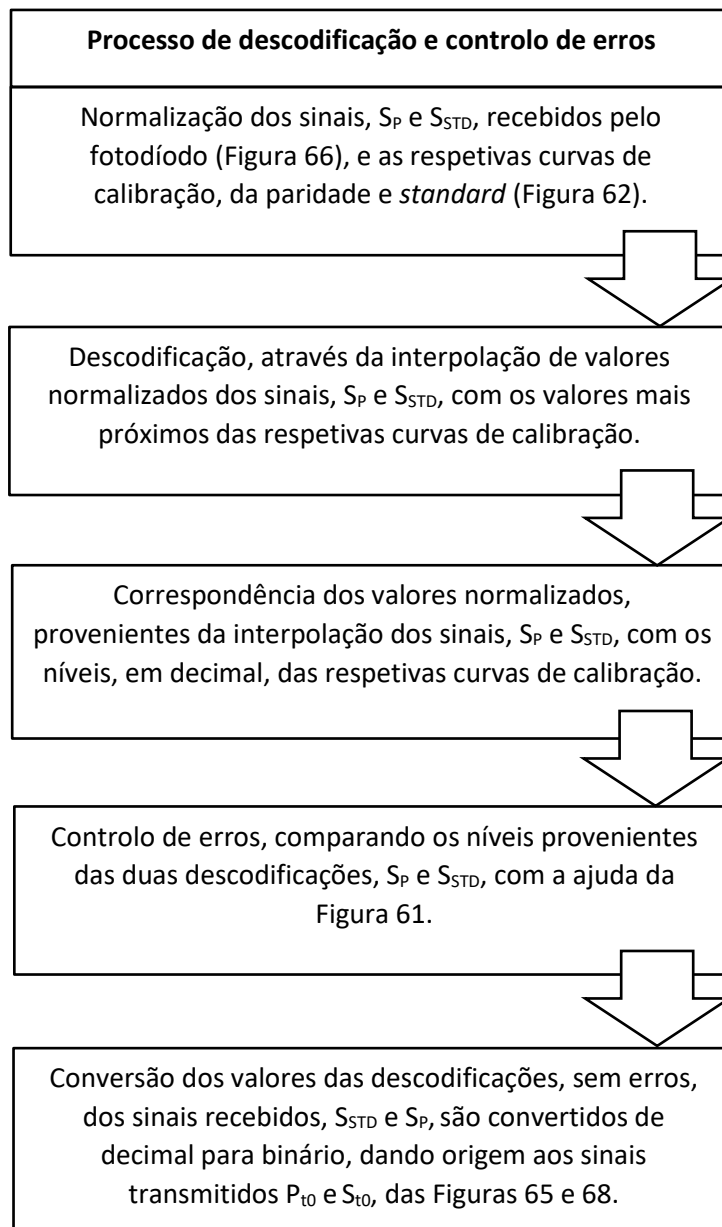


Figura 67 - Processo de descodificação e controlo de erros.

Inicialmente, é realizada a normalização dos sinais recebidos pelo fotodíodo (S_P e S_{STD}), representados na Figura 66, e das suas respetivas curvas de calibração, da paridade e *standard*, ilustradas na Figura 62. Em seguida, é realizada a descodificação, através da interpolação de

valores normalizados dos sinais, S_P e S_{STD} , com os valores mais próximos das suas respectivas curvas de calibração. Desta forma, é possível corresponder os valores normalizados, provenientes da interpolação dos sinais, S_P e S_{STD} , com os níveis, em decimal, das respectivas curvas de calibração.

O controlo de erros é realizado através da comparação dos níveis provenientes das duas descodificações, S_P e S_{STD} , com a ajuda da Figura 61. Por exemplo, tomando-se o primeiro *bit* do sinal S_P da Figura 66, se o seu valor normalizado, equivaler à intensidade normalizada do nível P_7 da curva de calibração da paridade, segundo a Figura 61, o primeiro *bit* do sinal S_{STD} corresponde, apenas, ao nível S_1 ou S_{15} , de intensidade normalizada, da respetiva curva de calibração. Caso a condição não se verifique, deteta-se a presença de um *bit* errado e, nesse caso, é verificado se o seu nível correspondente está mais próximo do S_1 ou do S_{15} .

Para tornar o controlo de erros ainda mais robusto, além do descrito, também é verificado se o nível correspondente ao sinal recebido da paridade está correto. Recorrendo ao exemplo descrito, se o valor normalizado, correspondente ao primeiro *bit* do sinal S_P , equivaler ao nível P_7 da curva de calibração da paridade, é verificado se está mais próximo do seu nível superior ou inferior. Neste caso, como o nível P_7 é o máximo da curva, não existe nível superior ao seu, pelo que só é verificado o nível inferior, P_6 . Assim, é confirmado se o valor normalizado, correspondente ao primeiro *bit* do sinal S_{STD} , está mais próximo do nível S_8 ou S_6 , da curva de calibração *standard* representada na Figura 61. Em caso afirmativo, o nível do sinal S_P é corrigido para P_6 e o do sinal S_{STD} é retificado para o nível mais próximo correspondente. Em caso negativo, volta-se a fazer a verificação exemplificada no parágrafo anterior. Este procedimento é repetido para os restantes 31 *bits*, de forma a obter uma descodificação sem erros.

No final da descodificação e controlo de erros, os valores dos respetivos níveis dos sinais recebidos, S_{STD} e S_P , são convertidos de decimal para binário. Tomando o caso negativo do exemplo anterior, se o primeiro *bit* do sinal S_P corresponde ao nível da curva de paridade P_7 (S_{14} da curva de calibração *standard* da Figura 62), então o seu valor em binário é 1110 [RGBV], ou seja, só o canal violeta é que se encontra desligado. O mesmo procedimento é implementado na descodificação do sinal S_{STD} . Ou seja, se o nível S_{15} for o mais próximo do valor normalizado do primeiro *bit* do sinal, então o valor em binário corresponde a 1111 [RGBV], significando que todos os canais estão ligados. Consequentemente, é possível descodificar, sem erros, os sinais S_{STD} e S_P , recebidos pelo fotodíodo e ilustrados na Figura 66, e obter os sinais transmitidos P_{t0} , e S_{t0} , representados nas Figuras 65 e 68.

6.8 Utilizador 7261 em t_0 - Obtenção dos sinais transmitidos após a descodificação

Após a descodificação, relativa ao utilizador 7261 no instante t_0 , dos sinais recebidos, S_{STD} e S_P , representados na Figura 66, foi possível obter os conjuntos de sinais transmitidos, P_{t_0} , S_{t_0}' e S_{t_0} , representados na Figura 68.

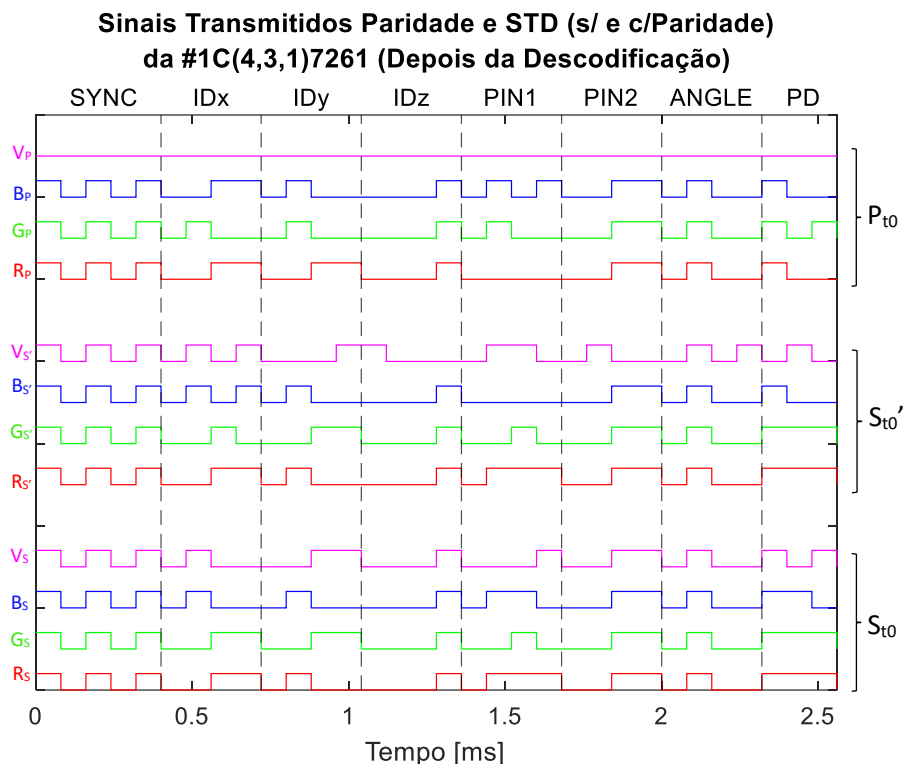


Figura 68 - Representações obtidas depois da realização da descodificação, relativas ao utilizador 7261 no instante t_0 . Os sinais transmitidos pelos LEDs, P_{t_0} e S_{t_0} , são obtidos, respetivamente, através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodiodo PIN/PIN (Figura 66), S_P e S_{STD} , com as curvas de calibração, da paridade e *standard* (Figura 62). O sinal S_{t_0} contém controlo de erros. Já o S_{t_0}' , é obtido com alguns *bits* errados.

Analisando as Figura 68, observa-se que o conjunto de sinais descodificados sem controlo de erros, S_{t_0}' , contém alguns *bits* errados. Nomeadamente, os canais azul ($B_{S'}$) e violeta ($V_{S'}$) com, respetivamente 4 e 14 erros, e uma BER de 0.125 e 0.438. Já os canais vermelho ($R_{S'}$) e verde ($G_{S'}$) contêm, respetivamente, 0 e 1 *bits* errados, e uma BER de 0 e 0.031. O descrito acontece, porque o nível de ruído no sinal transmitido por cada LED depende da intensidade do sinal ótico. Como a intensidade do LED vermelho é a mais elevada, este é o canal que contém, praticamente sempre, menos ou nenhum ruído. Seguem-se depois os canais verde, azul e violeta por ordem decrescente de intensidade e crescente de ruído.

Na Figura 69 mostra-se a descodificação, sem a intervenção do controlo de erros (paridade), do sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, quando o utilizador 7261 se encontra no instante t_0 . Assim, apresentam-se o sinal transmitido (R_s' , G_s' , B_s' e V_s'), por cada canal, os *bits* errados e a BER, por canal e no total dos 4 canais.

```

**S/CONTROLO DE ERROS (#1C(4,3,1)7261)**
-----
Rs' (10101001101000001011100110100111)
Bits errados[] (0)
BER(0)
-->LED Verde
Gs' (10101001000110001001000110100111)
Bits errados[9] (1)
BER(3.125000e-02)
-->LED Azul
Bs' (10101010101000001000000110100100)
Bits errados[9 19 20 31] (4)
BER(1.250000e-01)
-->LED Violeta
Vs' (10101010100011000011001000101010)
Bits errados[9 12 14 17 19 20 21 23 24 25 29 30 31 32] (14)
BER(4.375000e-01)

NºTotal bits errados(19)
BER Total da FP(1.484375e-01) (15%)

```

Figura 69 - Descodificação, sem a intervenção do controlo de erros (paridade), do sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, quando o utilizador 7261 se encontra no instante t_0 . Número de *bits* errados e BER, por canal e total dos 4 canais.

É possível verificar, através do conjunto de sinais S_{t_0}' da Figura 68, que o *bit* 9, nos canais R_s' , G_s' , B_s' e V_s' , corresponde ao valor binário 1011. Contudo, com a ajuda da Figura 69, conclui-se que a descodificação desse *bit* apenas está correta no canal de LED vermelho, uma vez que o valor, em binário, não coincide com o valor 1100, nos canais (R_s , G_s , B_s e V_s), correspondentes ao sinal com a descodificação sem erros, S_{t_0} . Também é possível verificar o erro no *bit* 9 de valor binário 1011, obtendo a sua paridade e comparando-a com o valor do conjunto de sinais da paridade P_{t_0} . Assim, confirma-se a descodificação incorreta, uma vez que a paridade no *bit* 9 no conjunto de sinais S_{t_0}' tem o valor de 1000 e já no P_{t_0} , corresponde a 1010.

Na Figura 70 mostra-se a descodificação, com a intervenção do controlo de erros, do sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN e a sua paridade, quando o utilizador 7261 se encontra no instante t_0 . Assim, apresentam-se o sinal transmitido (R_s , G_s , B_s e V_s) e a sua paridade (R_p , G_p , B_p e V_p), por cada canal, os *bits* errados e a BER, por canal e no total dos 4 canais.

```

-----
**C/CONTROLO DE ERROS (#1C(4,3,1)7261)**
-----
-->LED Vermelho
Rp(10101001100110001000000110100100)
Rs(10101001101000001011100110100111)
Bits errados[] (0)
BER(0)
-->LED Verde
Gp(10101010001000001010000110100101)
Gs(10101001100110001001001000110100111)
Bits errados[] (0)
BER(0)
-->LED Azul
Bp(10101001101000001010100110100100)
Bs(10101010001000001011000110100110)
Bits errados[] (0)
BER(0)
-->LED Violeta
Vp(00000000000000000000000000000000)
Vs(10101010000110001000100110100101)
Bits errados[] (0)
BER(0)

NºTotal bits errados(0)
BER Total da FP(0) (0%)

```

Figura 70 - Descodificação, com a intervenção do controlo de erros, do sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN e a sua paridade, quando o utilizador 7261 se encontra no instante t_0 . Número de *bits* errados e BER, por canal e total dos 4 canais.

Em suma, foi possível descodificar, com e sem controlo de erros (Figuras 69 e 70), os sinais recebidos, S_{STD} e S_P , no instante t_0 , em que o utilizador 7261 se encontrava na *footprint* #1 da célula $C_{(4,3,1)}$. Assim, verifica-se uma percentagem de eficácia de 100%, na descodificação do sinal recebido, S_{STD} , com controlo de erros. Contudo, esta descodificação tem algum impacto no tempo de execução do código, produzido em *software MatLab*. Por outro lado, efetuando uma descodificação sem controlo de erros, apura-se uma percentagem de insucesso de 15%, uma vez que são detetados 19 erros num total de 128 *bits* nos 4 canais (32 *bits*/canal). No entanto, esta descodificação tem pouco impacto no tempo de execução do código.

6.9 Utilizador 7261 em t_1 - Resultados obtidos a nível prático

Após o ajuste das curvas de calibração *standard* e paridade, representadas na Figura 60, foram introduzidos, no *software* de laboratório, os sinais transmitidos pelos dois conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Desta forma, os dois conjuntos, P_{t_1} e S_{t_1} , transmitem, respetivamente, os sinais R_p , G_p , B_p , V_p e R_s , G_s , B_s , V_s , para o fotodíodo do utilizador 7261, no instante t_1 . Posteriormente, o fotodíodo multiplexa os sinais transmitidos, de forma a originar os sinais recebidos S_{STD} , provenientes do conjunto S_{t_1} , e o sinal S_p , proveniente do conjunto P_{t_1} , representados na Figura 71.

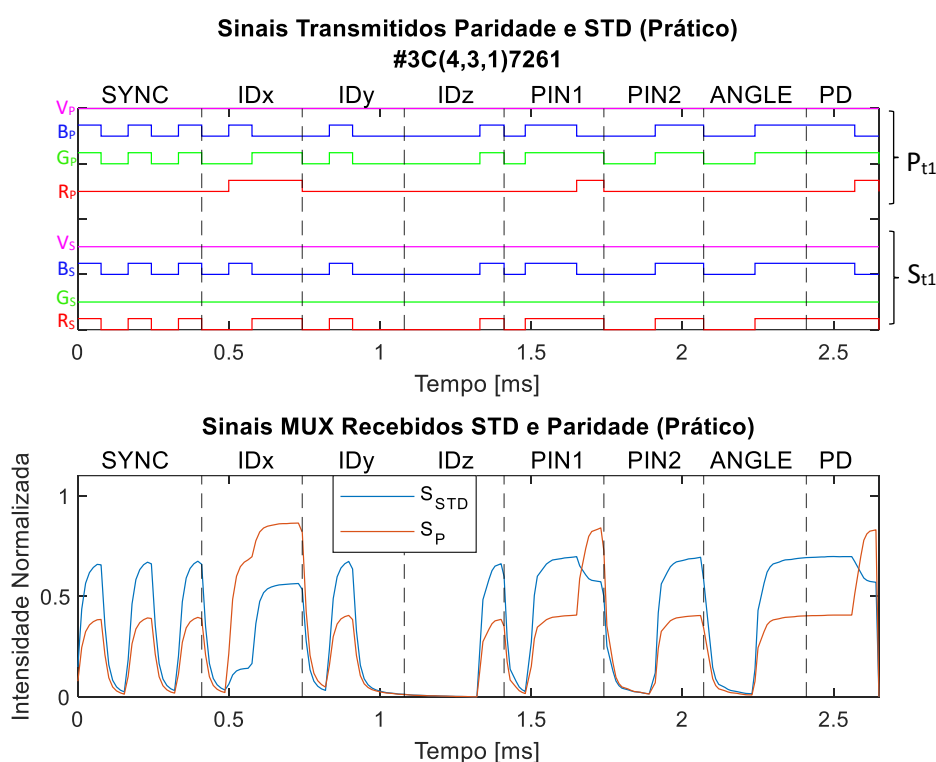


Figura 71 - Representações obtidas, a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 7261, no instante t_1 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_p , são obtidos, respetivamente, através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t_1} e P_{t_1} , e pré-calibrados com as curvas *standard* e paridade, da Figura 60.

Analisando a Figura 71, verifica-se que o sinal recebido, S_p , tem um valor de intensidade normalizada máxima maior do que a do sinal S_{STD} . Isto acontece porque o sinal recebido, S_{STD} , é obtido através da transmissão do conjunto de sinais, S_{t_1} , para o fotodíodo do utilizador 7261 em t_1 e como nesse instante o utilizador está na região *footprint* #3, só é abrangido pelo raio dos LEDs de cor vermelha e verde. Desta forma, os canais V_s e G_s estão desligados, e apenas os canais R_s e B_s participam na comunicação com o fotodíodo, fazendo com que este receba um sinal, proporcionalmente, menos intenso. No entanto, o sinal recebido, S_p , é obtido através da transmissão do conjunto de sinais, P_{t_1} , e este, através da realização da paridade do conjunto S_{t_1} , ou seja, o LED violeta encontra-se sempre desligado. Consequentemente, o canal V_p nunca participa na comunicação fazendo com que o fotodíodo receba uma intensidade menor, mas, ainda assim maior que a do S_{STD} .

6.10 Utilizador 7261 em t_1 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação e obtenção dos sinais transmitidos depois da descodificação

A representação, na Figura 72, do sinal recebido pelo fotodíodo, S_{STD} , é obtida através da subtração, ou soma, da média com o desvio padrão do sinal ilustrado com a cor azul, na Figura 71. Após a descodificação do sinal S_{STD} , de intensidade normalizada e relativa ao utilizador 7261 no instante t_1 , foi possível obter o conjunto de sinais transmitidos, sem e com controlo de erros, representados, respetivamente, pelo conjunto de sinais S_{t_1}' e S_{t_1} , da Figura 72.

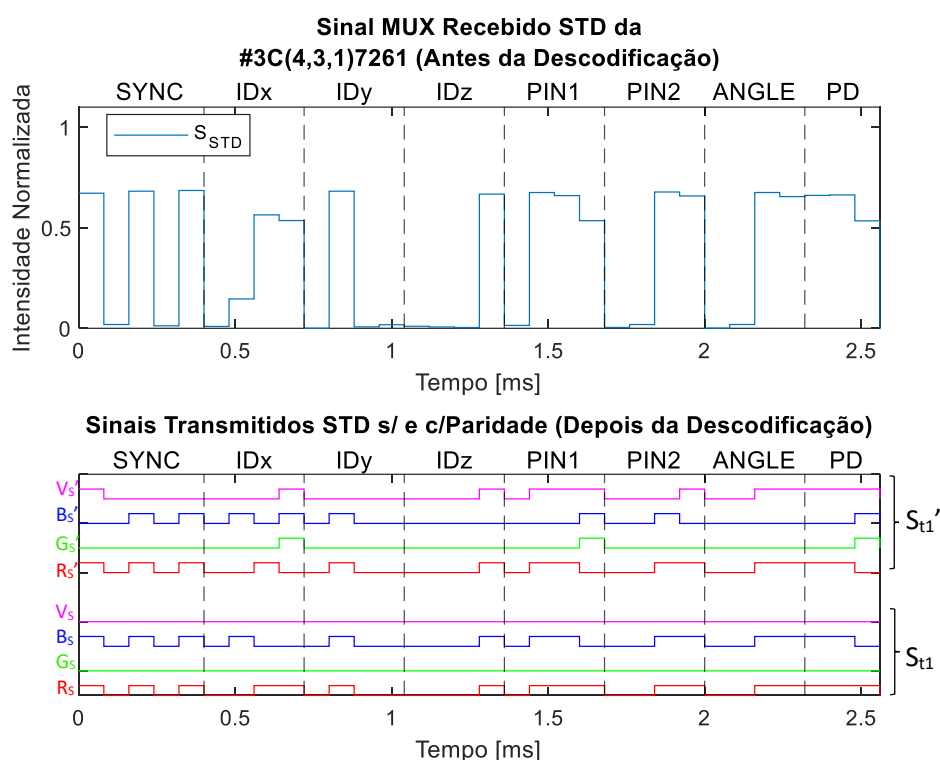


Figura 72 - Representações obtidas, antes e depois da descodificação, relativas ao utilizador 7261 no instante t_1 . O sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} , é obtido através da média +/- desvio padrão do sinal recebido, ilustrado pela cor azul, na Figura 71. O sinal transmitido pelos LEDs, S_{t_1} , é obtido através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo com a curva de calibração *standard*, da Figura 62. O sinal S_{t_1} contém controlo de erros. Já o S_{t_1}' , é obtido com alguns *bits* errados.

Comparando o conjunto de sinais S_{t_1} , obtidos a nível prático e através da descodificação com controlo de erros, das Figuras 71 e 72 respetivamente, é possível observar que são idênticos. Desta forma, conclui-se que o controlo de erros teve um êxito de 100%, uma vez que não ocorrem erros na descodificação do sinal recebido, S_{STD} , conforme se mostra na Figura 72.

Analisando só a Figura 72, é possível verificar, comparativamente ao sinal S_{t_1} , que a descodificação do sinal S_{STD} , sem controlo de erros, representada pelo conjunto de sinais S_{t_1}' , contém 30 erros, no total. Nomeadamente, os canais azul (B_s') e violeta (V_s') contém, cada um, 12 erros de descodificação. Apesar dos sinais transmitidos pelos LEDs de cor vermelha (R_s') e

verde (G_s') serem mais intensos, ambos contêm erros. Os canais vermelho e verde contêm, cada um, 3 erros de decodificação.

6.11 Utilizador 7261 em t_2 - Resultados obtidos a nível prático

Posteriormente ao ajuste das curvas de calibração *standard* e paridade, representadas na Figura 60, foram introduzidos, no *software* de laboratório, os sinais transmitidos pelos dois conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Desta forma, os dois conjuntos P_{t_2} e S_{t_2} transmitem respetivamente os sinais, R_p, G_p, B_p, V_p e R_s, G_s, B_s, V_s para o fotodíodo do utilizador 7261, no instante t_2 . Posteriormente, o fotodíodo multiplexa os sinais transmitidos, de forma a originar os sinais recebidos S_{STD} , provenientes do conjunto S_{t_2} , e o sinal S_p , resultante do conjunto P_{t_2} , representados na Figura 73.

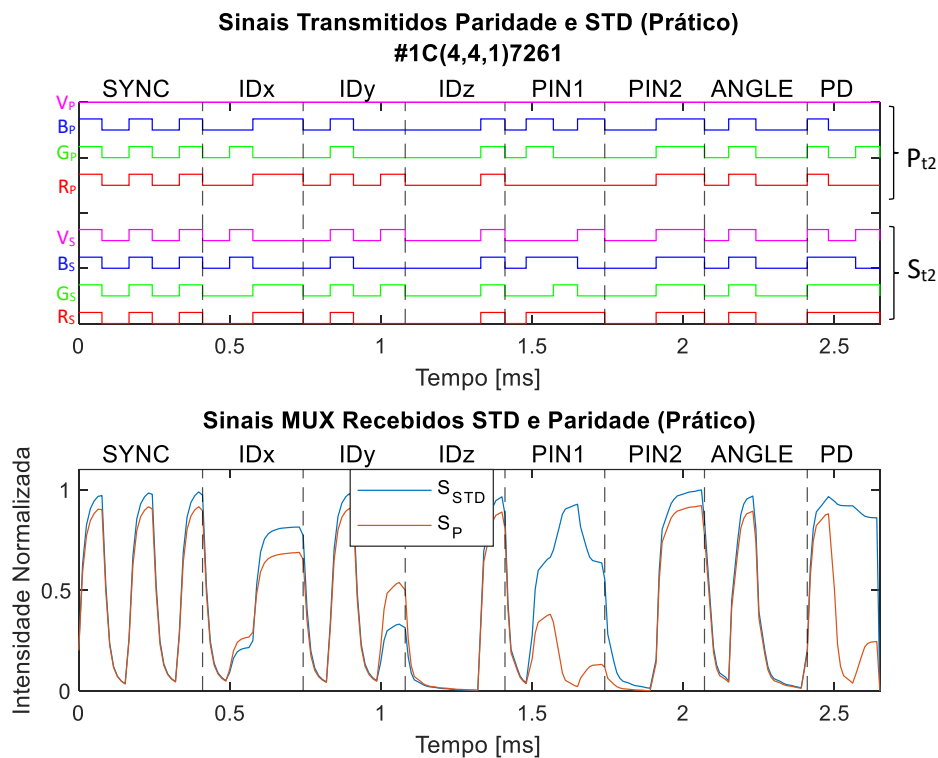


Figura 73 - Representações obtidas, a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 7261, no instante t_2 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_p , são obtidos, respetivamente, através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t_2} e P_{t_2} , e pré-calibrados com as curvas *standard* e paridade da Figura 60.

Analisando a Figura 73, verifica-se que o sinal recebido S_p tem um valor de intensidade normalizada máxima menor do que o sinal S_{STD} . Isto porque, o sinal recebido S_{STD} é obtido através da transmissão do conjunto de sinais S_{t_2} para o fotodíodo do utilizador 7261 em t_2 e, como nesse instante o utilizador está na região *footprint* #1, é abrangido pelo raio de todos os LEDs. Desta forma, os 4 canais (R_s, G_s, B_s e V_s) participam na comunicação com o fotodíodo, fazendo com que este receba um sinal, proporcionalmente, intenso. No entanto, o sinal recebido S_p é obtido através da transmissão do conjunto de sinais P_{t_2} , e este através da realização da paridade do sinal S_{t_2} , ou seja, o LED violeta encontra-se sempre desligado. Por conseguinte, o canal V_p nunca

participa na comunicação, fazendo com que o fotodíodo receba uma intensidade menor que a do S_{STD} .

6.12 Utilizador 7261 em t_2 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação e obtenção dos sinais recebidos depois da descodificação

A representação, na Figura 74, do sinal recebido pelo fotodíodo, S_{STD} foi obtida através da subtração, ou soma, da média com o desvio padrão do sinal ilustrado com a cor azul, na Figura 73. Após a descodificação do sinal S_{STD} , de intensidade normalizada e relativa ao utilizador 7261 no instante t_2 , foi possível obter o conjunto de sinais transmitidos sem e com controlo de erros, representados, respetivamente, pelo conjunto de sinais S_{t_2}' e S_{t_2} , da Figura 74.

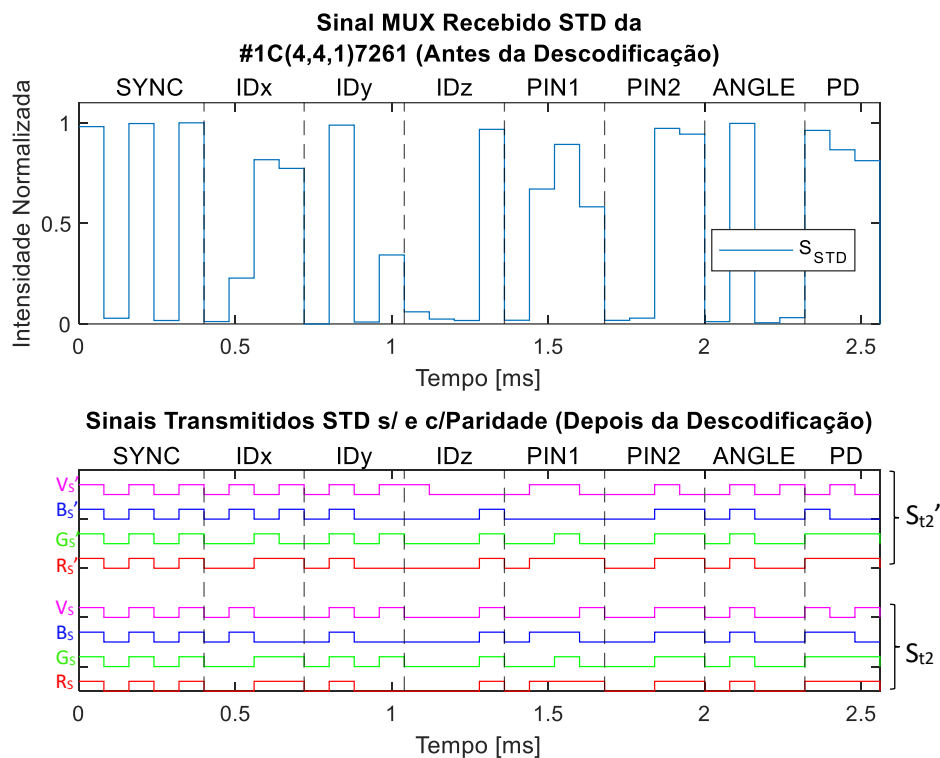


Figura 74 - Representações obtidas, antes e depois da descodificação, relativas ao utilizador 7261 no instante t_2 . O sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} , é obtido através da média +/- desvio padrão do sinal recebido, ilustrado pela cor azul, na Figura 73. O sinal transmitido pelos LEDs, S_{t_2} , é obtido através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo com a curva de calibração *standard*, da Figura 62. O sinal S_{t_2} contém controlo de erros. Já o S_{t_2}' é obtido com alguns *bits* errados.

Comparando o conjunto de sinais S_{t_2} , obtidos a nível prático e através da descodificação com controlo de erros, das Figuras 73 e 74 respetivamente, é possível observar que são idênticos. Desta forma, conclui-se que o controlo de erros teve um êxito de 100%, uma vez que não se presencia erros na descodificação do sinal recebido, S_{STD} , da Figura 74.

Analisando só a Figura 74, é possível verificar, comparativamente ao sinal S_{t_2} , que a descodificação do sinal S_{STD} , sem controlo de erros, representada pelo conjunto de sinais S_{t_2}' ,

contém 16 erros, no total. Nomeadamente, os canais azul (B_s') e violeta (V_s') apresentam, respetivamente, 4 e 11 erros de decodificação. Apesar dos sinais transmitidos pelos LEDs de cor vermelha (R_s') e verde (G_s') serem mais intensos, apenas o primeiro não contém erros. Conclui-se que, o canal verde contém 1 erro de decodificação.

6.13 Utilizador 7261 em t_3 - Resultados obtidos a nível prático

Após o ajuste das curvas de calibração *standard* e paridade, representadas na Figura 60, foram introduzidos, no *software* de laboratório, os sinais transmitidos pelos dois conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Desta forma, os dois conjuntos P_{t_3} e S_{t_3} transmitem os sinais R_P , G_P , B_P , V_P e R_S , G_S , B_S , V_S , respetivamente, para o fotodíodo do utilizador 7261, no instante t_3 . Posteriormente, o fotodíodo multiplexa os sinais transmitidos, de forma a originar os sinais recebidos S_{STD} , provenientes do conjunto S_{t_3} , e o sinal S_P , proveniente do conjunto P_{t_3} , representados na Figura 75.

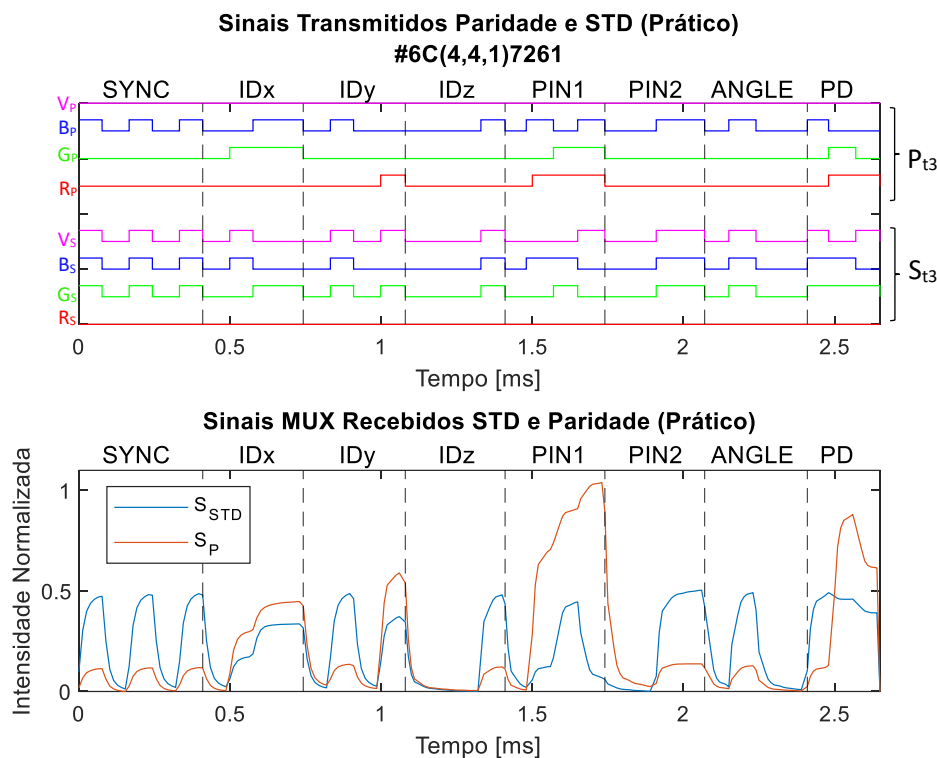


Figura 75 - Representações obtidas, a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 7261, no instante t_3 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_P , são obtidos, respetivamente, através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t_3} e P_{t_3} , e pré-calibrados com as curvas *standard* e paridade, da Figura 60.

Analisando a Figura 75, verifica-se que o sinal recebido S_P tem um valor de intensidade normalizada máxima maior do que o sinal S_{STD} . Isto porque, o sinal recebido S_{STD} é obtido através da transmissão do conjunto de sinais S_{t_3} para o fotodíodo do utilizador 7261, em t_3 , e como nesse instante o utilizador está na região *footprint* #6, só não é abrangido pelo raio do LED de cor vermelha. Desta forma, apenas o canal R_S está desligado e os restantes participam na comunicação com o fotodíodo, fazendo com que este receba um sinal menos intenso. No

entanto, o sinal recebido S_P é obtido através da transmissão do conjunto de sinais P_{t_3} , e este, através da realização da paridade do sinal S_{t_3} . Ou seja, o LED violeta encontra-se sempre desligado. Conclui-se que, o canal V_P nunca participa na comunicação, fazendo com que o fotodíodo receba uma intensidade menor. Contudo, mas ainda assim, maior que a do S_{STD} , uma vez que a intensidade da luz produzida pelo LED violeta é muito menor que a do vermelho.

6.14 Utilizador 7261 em t_3 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação e obtenção dos sinais recebidos depois da descodificação

A representação, na Figura 76, do sinal recebido pelo fotodíodo, S_{STD} , foi obtida através da subtração, ou soma, da média com o desvio padrão do sinal, ilustrado com a cor azul, na Figura 75. Após a descodificação do sinal S_{STD} , de intensidade normalizada e relativa ao utilizador 7261 no instante t_3 , foi possível obter o conjunto de sinais transmitidos sem e com controlo de erros, representados, respetivamente, pelo conjunto de sinais S_{t_3}' e S_{t_3} , da Figura 76.

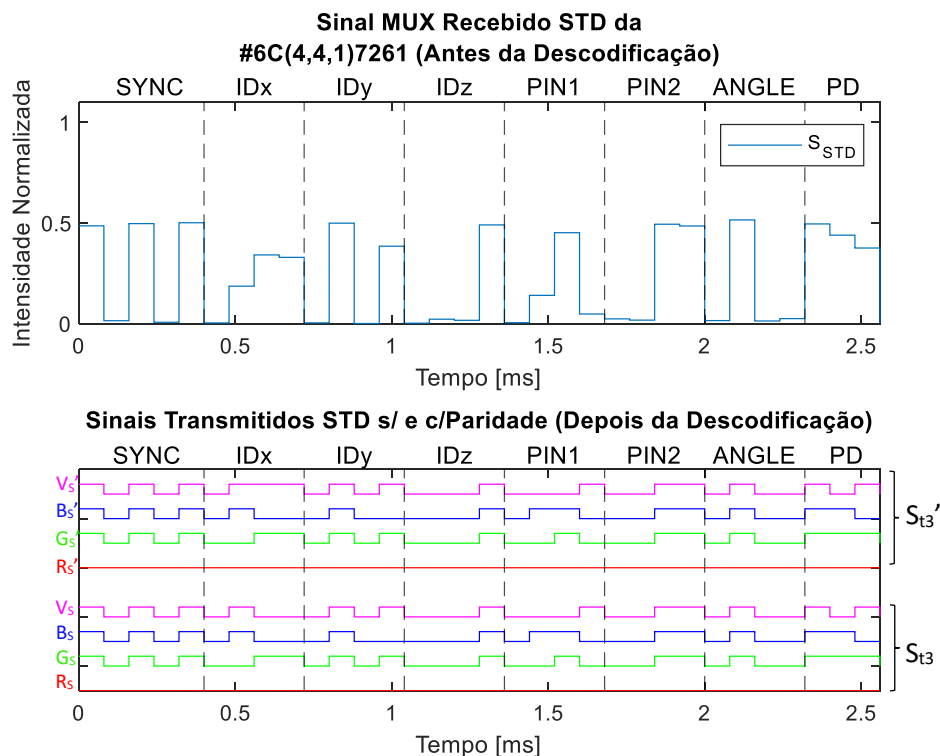


Figura 76 - Representações obtidas, antes e depois da descodificação, relativas ao utilizador 7261, no instante t_3 . O sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} , é obtido através da média +/- desvio padrão do sinal recebido, ilustrado pela cor azul, na Figura 75. O sinal transmitido pelos LEDs, S_{t_3} , é obtido através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo com a curva de calibração *standard*, da Figura 62. O sinal S_{t_3} contém controlo de erros. Já o S_{t_3}' é obtido com alguns *bits* errados.

Comparando o conjunto de sinais S_{t_3} , obtidos a nível prático e através da descodificação com controlo de erros, das Figuras 75 e 76 respetivamente, é possível observar que são

idênticos. Assim, conclui-se que o controlo de erros teve um êxito de 100%, uma vez que não se presenciaram erros na descodificação do sinal recebido, S_{STD} , da Figura 76.

Analisando apenas a Figura 76, é possível verificar, comparativamente ao sinal S_{t3} , que a descodificação do sinal S_{STD} , sem controlo de erros, representada pelo conjunto de sinais S_{t3}' , contém 2 erros, no total. Especificamente, no canal violeta (V_s') com 2 erros de descodificação. Em contraste, como os sinais transmitidos pelos LEDs de cor vermelha (R_s'), verde (G_s') e azul (B_s') contém maior intensidade, do que o anterior, não contém erros de descodificação.

6.15 Utilizador 3009 em t_0 - Resultados obtidos a nível prático

Após o ajuste das curvas de calibração *standard* e paridade, representadas na Figura 60, foram introduzidos, no *software* de laboratório, os sinais transmitidos pelos dois conjuntos de 4 LEDs brancos RGBV. Desta forma, os dois conjuntos P_{t0} e S_{t0} transmitem os sinais, respetivamente R_p, G_p, B_p, V_p e R_s, G_s, B_s, V_s para o fotodíodo do utilizador 3009 no instante t_0 . Posteriormente, o fotodíodo multiplexa os sinais transmitidos de forma a originar os sinais recebidos S_{STD} , provenientes do conjunto S_{t0} , e o sinal S_p , proveniente do conjunto P_{t0} , representados na Figura 77.

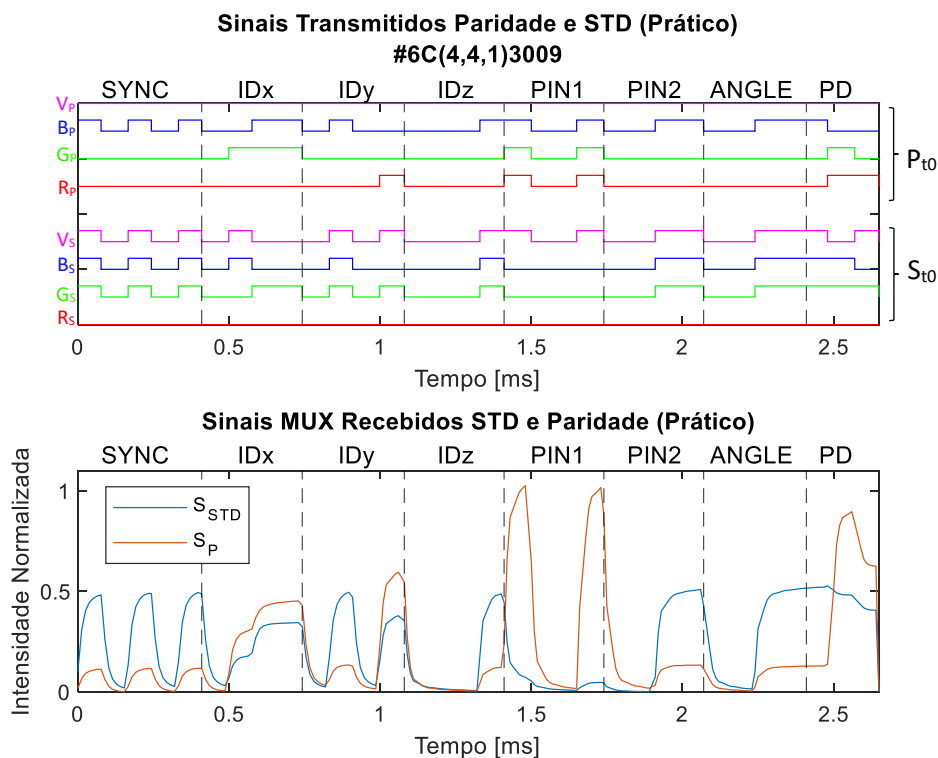


Figura 77 - Representações obtidas a nível prático, de uma comunicação bidirecional, relativas ao utilizador 3009 no instante t_0 . Os sinais recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} e S_p , são, respetivamente, obtidos através da multiplexação de dois conjuntos de 4 sinais (transmitidos pelos LEDs brancos RGBV), S_{t0} e P_{t0} , e pré-calibrados com as curvas *standard* e paridade da Figura 60.

Analisando a Figura 77, verifica-se que o sinal recebido S_p tem um valor de intensidade normalizada máxima maior do que o sinal S_{STD} . Isto porque, o sinal recebido S_{STD} é obtido através

da transmissão do conjunto de sinais S_{t_0} para o fotodíodo do utilizador 3009, em t_0 , e como nesse instante o utilizador está na região *footprint* #6, só não é abrangido pelo raio do LED de cor vermelha. Consequentemente, apenas o canal R_s está desligado e os restantes participam na comunicação com o fotodíodo, fazendo com que este receba um sinal menos intenso. No entanto, o sinal recebido S_p é obtido através da transmissão do conjunto de sinais P_{t_0} , e este, através da realização da paridade do sinal S_{t_0} . Ou seja, o LED violeta encontra-se sempre desligado. Assim, o canal V_p nunca participa na comunicação, fazendo com que o fotodíodo receba uma intensidade menor, ainda assim, maior que a do S_{STD} , pelo facto da intensidade da luz produzida pelo LED violeta ser muito menor que a do vermelho.

6.16 Utilizador 3009 em t_0 - Preparação dos sinais recebidos para a descodificação e obtenção dos sinais recebidos depois da descodificação

A representação, na Figura 78, do sinal recebido pelo fotodíodo, S_{STD} , foi obtida através da subtração, ou soma, da média com o desvio padrão do sinal ilustrado com a cor azul, na Figura 77. Após a descodificação do sinal S_{STD} , de intensidade normalizada e relativa ao utilizador 3009 no instante t_0 , foi possível alcançar o conjunto de sinais transmitidos, sem e com controlo de erros, representados, respetivamente, pelo conjunto de sinais S_{t_0}' e S_{t_0} , da Figura 78.

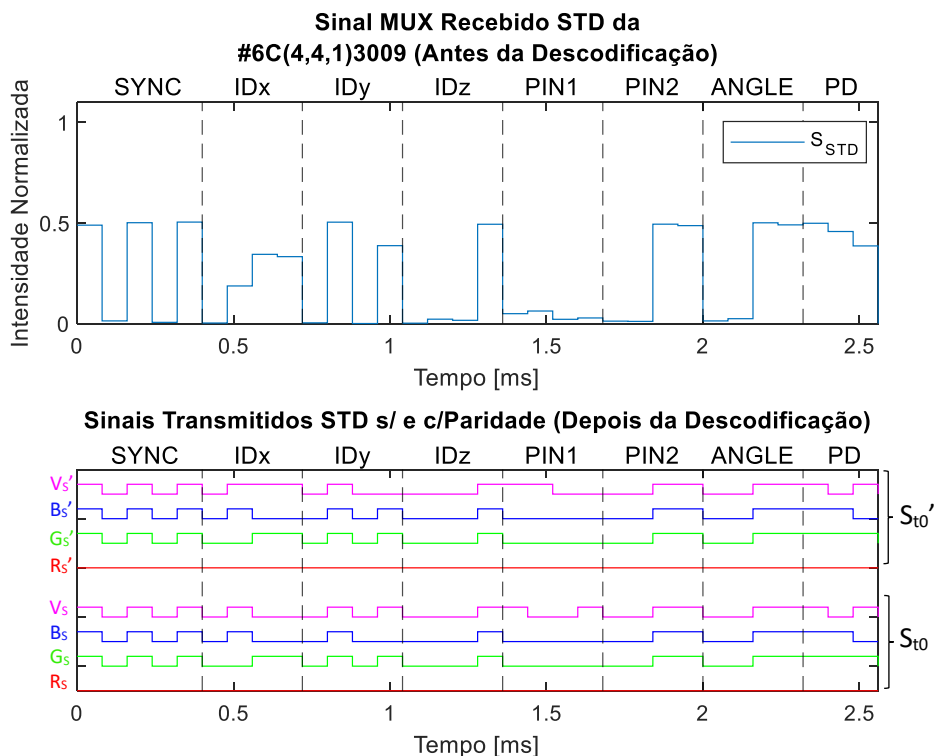


Figura 78 - Representações obtidas, antes e depois da descodificação, relativas ao utilizador 3009, no instante t_0 . O sinal recebido pelo fotodíodo PIN/PIN, S_{STD} , é obtido através da média +/- desvio padrão do sinal recebido, ilustrado pela cor azul, na Figura 77. O sinal transmitido pelos LEDs, S_{t_0} , é obtido através da interpolação dos sinais recebidos pelo fotodíodo com a curva de calibração *standard*, da Figura 62. O sinal S_{t_0} contém controlo de erros. Já o S_{t_0}' é obtido com alguns *bits* errados.

Comparando o conjunto de sinais S_{t_0} obtidos, a nível prático e através da descodificação com controlo de erros, das Figuras 77 e 78 respetivamente, é possível observar que são idênticos. Desta forma, conclui-se que o controlo de erros teve um êxito de 100%, uma vez que não se presenciaram erros na descodificação do sinal recebido, S_{STD} , da Figura 78.

Analisando apenas a Figura 78, é possível verificar, comparativamente ao sinal S_{t_0} , que a descodificação do sinal S_{STD} , sem controlo de erros, representada pelo conjunto de sinais S_{t_0}' , contém 6 erros, no total. Especificamente, nos canais azul (B_S') e violeta (V_S') com 1 e 5 erros de descodificação, respetivamente. Em contraste, como os sinais transmitidos pelos LEDs de cor vermelha (R_S') e verde (G_S') são mais intensos, não contêm erros de descodificação.

6.17 Resumo do desempenho da descodificação, com e sem controlo de erros

De forma a sintetizar o desempenho da descodificação com e sem controlo de erros, referente à deslocação do utilizador 7261, em diferentes instantes de tempo (t_0 , t_1 , t_2 , t_3), foi representada abaixo a Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo do número de *bits* errados e BER, provenientes da descodificação, sem e com a intervenção do controlo de erros (paridade) do sinal recebido, pelo fotodiodo PIN/PIN, quando o utilizador 7261 se encontra nas regiões *footprint* #1 (t_0), #3 (t_1), #1 (t_2) e #6 (t_3).

Utilizador 7261		R'	R	G'	G	B'	B	V'	V	Total	Total
		(s/p)	(c/p)	(s/p)	(c/p)	(s/p)	(c/p)	(s/p)	(c/p)	(s/p)	(c/p)
#1 (t_0)	Nº <i>bits</i>	[-] (0)	[-] (0)	[9] (1)	[-] (0)	[9,19,20,31] (4)	[-] (0)	[9,12,14,17,19,20,21,23,24,25,29,30,31,32] (14)	[-] (0)	19	0
	BER	0	0	0.0313	0	0.1250	0	0.4375	0	0.1484 (15%)	0 (0%)
#3 (t_1)	Nº <i>bits</i>	[9,21,32] (3)	[-] (0)	[9,21,32] (3)	[-] (0)	[1,9,17,19,20,21,25,28,29,30,31,32] (12)	[-] (0)	[1,9,17,19,20,21,25,28,29,30,31,32] (12)	[-] (0)	30	0
	BER	0.0938	0	0.0938	0	0.3750	0	0.3750	0	0.2344 (23%)	0 (0%)
#1 (t_2)	Nº <i>bits</i>	[-] (0)	[-] (0)	[9] (1)	[-] (0)	[9,19,20,31] (4)	[-] (0)	[9,14,17,19,20,21,25,29,30,31,32] (11)	[-] (0)	16	0
	BER	0	0	0.0313	0	0.1250	0	0.3438	0	0.1250 (13%)	0 (0%)
#6 (t_3)	Nº <i>bits</i>	[-] (0)	[-] (0)	[-] (0)	[-] (0)	[-] (0)	[-] (0)	[8,9] (2)	[-] (0)	2	0
	BER	0	0	0	0	0	0	0.0625	0	0.0156 (2%)	0 (0%)

Analisando a Tabela 12, é possível observar o número de erros e a BER da descodificação, relativa ao instante t_0 , em que o utilizador 7261 se encontrava na *footprint* #1 da célula $C_{(4,3,1)}$. Assim, a descodificação sem controlo de erros apresentou 19 erros e uma BER de 0.1484, ou seja, contém uma eficácia de 85%. Mais especificamente, nos canais verde (G'), azul (B') e violeta (V'), com 1, 4 e 14 erros, respetivamente. Já na descodificação com controlo de erros, observou-se uma eficácia de 100%, isto é, apresentou 0 erros.

Observando a descodificação, relativa ao instante t_1 , é possível verificar o número de erros e a BER de quando o utilizador 7261 se encontrava na *footprint* #3 da célula $C_{(4,3,1)}$. Portanto, a descodificação sem controlo de erros apresentou 30 erros e uma BER de 0.2344, ou seja, contém uma eficácia de 77%. Especificamente, nos canais vermelho (R'), verde (G'), azul (B') e violeta (V'), com 3, 3, 12 e 12 erros, respetivamente. Com a descodificação com controlo de erros, obteve-se uma eficácia de 100%, por não terem ocorrido erros.

Analisando a descodificação, relativa ao instante t_2 , é possível verificar o número de erros e a BER de quando o utilizador 7261 se encontrava na *footprint* #1 da célula $C_{(4,4,1)}$. Desta forma, a descodificação sem controlo de erros apresentou 16 erros e uma BER de 0.1250, ou seja, uma eficácia de 87%. Nomeadamente, nos canais verde (G'), azul (B') e violeta (V'), com 1, 4 e 11 erros, respetivamente. Novamente, na descodificação com controlo de erros, não se observaram erros, o que equivale a uma eficácia de 100%.

Por fim, na descodificação, relativa ao instante t_3 , é possível verificar o número de erros e a BER de quando o utilizador 7261 se encontrava na *footprint* #6 da célula $C_{(4,4,1)}$. A descodificação sem controlo de erros apresentou, apenas no canal violeta (V'), 2 erros e uma BER de 0.0156, ou seja, eficácia de 98%. Já na descodificação com controlo de erros, não se detetaram erros, o que corresponde a uma eficácia de 100%.

Com o objetivo de ilustrar o desempenho da descodificação com e sem controlo de erros, referente à deslocação do utilizador 3009 no instante de tempo t_0 , os dados relativos a esta descodificação encontram-se resumidos na Tabela 13.

Tabela 13 - Resumo do número de *bits* errados e BER, provenientes da descodificação sem e com a intervenção do controlo de erros (paridade) do sinal recebido, pelo fotodiodo PIN/PIN, quando o utilizador 3009 se encontra na região *footprint* #6 (t_0).

Utilizador 3009		R' (s/p)	R (c/p)	G' (s/p)	G (c/p)	B' (s/p)	B (c/p)	V' (s/p)	V (c/p)	Total (s/p)	Total (c/p)
#6 (t_0)	Nº <i>bits</i>	[0] (0)	[0] (0)	[0] (0)	[0] (0)	[13] (1)	[0] (0)	[8,9,13,19,21] (5)	[0] (0)	6	0
	BER	0	0	0	0	0.0313	0	0.1563	0	0.0469 (5%)	0 (0%)

Analisando a Tabela 13, é possível observar o número de erros e a BER da descodificação, relativa ao instante t_0 , em que o utilizador 3009 se encontrava na *footprint* #1 da célula $C_{(4,4,1)}$. Assim, a descodificação sem controlo de erros apresentou 6 erros e uma BER de 0.0469, ou seja, contém uma eficácia de 95%. Nomeadamente, nos canais violeta (V') e azul (B') com 1 e 5 erros, respetivamente. Já na descodificação com controlo de erros, não se detetaram erros, o que corresponde a uma eficácia de 100%.

Em suma, é possível verificar, através das duas tabelas, que na descodificação de 640 *bits* codificados (128 *bits*/ região *footprint*), relativa à movimentação dos dois utilizadores,

apenas ocorreram erros em 14% (BER 0.1426), ou seja, contém uma eficácia de 86%. No entanto, na descodificação com a presença do controlo de erros já foi possível observar uma eficácia de 100%. Desta forma, conclui-se que a localização e posterior orientação de um recetor, através da comunicação entre LEDs brancos RGBV e um fotodíodo PIN/PIN, foi realizada com sucesso.

7^o Capítulo

Conclusão e trabalho futuro

7.1 Conclusão

Atualmente, os métodos de posicionamento em ambientes interiores baseiam-se, principalmente, em tecnologias RF (UWB, WLANs, Wi-Fi, *Bluetooth*, RFID, A-GPS, NFC e RADAR), Ultra-sons e Infravermelho. O método de posicionamento Wi-Fi torna-se numa opção dispendiosa, uma vez que precisa de uma densa cobertura de pontos de acesso Wi-Fi e sensores de alto desempenho, para garantir uma localização com exatidão. A tecnologia Li-Fi veio preencher esta lacuna. Esta comunica através de luz visível, ao utilizar a luz proveniente de LEDs existentes no meio, para iluminar o meio ambiente e comunicar sem fios (wireless) com dispositivos providos de fotodetetores, transmitindo a informação e a posição exata dos mesmos. Contudo, a grande vantagem de usar, para localização em espaços fechados, Li-Fi em vez de Wi-Fi, é a obtenção de melhor desempenho, a um preço menor. Isto porque, no interior típico de um edifício existem dez vezes mais LEDs, em comparação com os pontos de acesso Wi-Fi. Assim, os LEDs permitem uma triangulação mais rápida e precisa, do dispositivo móvel, fazendo com que o seu aproveitamento para comunicação os torne numa opção mais sustentável. A localização baseada em Wi-Fi, quando é acessível, tem uma precisão baixa. Mesmo com a eficiência espectral e a reutilização de frequência, o espectro RF torna-se cada vez mais limitado e restrito, perante o crescente aumento de tráfego e ao controlo das entidades reguladoras. Por outro lado, o espectro do visível, no qual o VLC se baseia, encontra-se totalmente livre, sem quaisquer licenças adquiridas pelas operadoras de telecomunicações. Devido à sua alta frequência, a rede baseada em VLC possibilita, ligações que superam os 1 *Gbps* e não permite comunicações através de obstáculos opacos, tornando-a mais segura e com menos interferências.

Por estas razões, a tecnologia VLC, no qual o Li-Fi se baseia, estará na vanguarda dos futuros serviços baseados em localização *indoor* e constitui uma das tecnologias que o 6G irá incluir.

Um dos requisitos cruciais para o bom funcionamento de um sistema VLC é a não alteração da iluminação proveniente do LED, devido ao uso em simultâneo com a comunicação. Assim, existem dois tipos de LEDs brancos que transmitem comunicação e iluminação em simultâneo, o LED azul, que é revestido por fósforo, e o LED RGB. Ambos transmitem uma luz branca, no entanto, o segundo é preferível para o uso num sistema VLC, visto que permite variar a intensidade de iluminação, a uma taxa mais rápida que o LED com revestimento de fósforo, aumentando a velocidade de comunicação e reduzindo eventuais efeitos de *flickering*.

O recetor VLC deve consumir pouca energia, para poder ser alimentado pela bateria de um dispositivo móvel e, ao mesmo tempo, permitir comunicações através de luz visível, a velocidades elevadas. Deste modo, existem dois recetores que podem ser usados para receber o sinal transmitido por um LED, um fotodetetor ou um sensor de imagem. Todavia, o fotodetetor permite receber comunicações, utilizando luz visível, a um ritmo mais rápido que o sensor de imagem, visto que a velocidade dos sensores das câmaras está limitada, de forma a proporcionar imagens de alta resolução.

Numa rede *indoor* baseada em VLC, o recetor está sujeito à falta de FOV, devido ao desalinhamento, causado pelas várias ações do utilizador, entre o transmissor e o recetor. O mesmo também pode ser obscurecido por diferentes objetos e sofrer interferência, devido à interferência entre as células, o que pode causar uma degradação severa no SINR, para os utilizadores nesta posição.

Num sistema VLC, ao contrário de outras comunicações, não basta que a modulação atinja altos valores de débito binário, sendo ainda necessário e fundamental a preservação da

luz de iluminação para os utilizadores, de modo a eliminar efeitos de *dimming* e *flickering*. A modulação OOK é a mais simples de implementar, mas só suporta *dimming* não resolve o problema de *flickering* e tem um débito binário baixo. A modulação OFDM tem uma complexidade alta, uma vez que o LED não é linear, pelo que não suporta *dimming* e não resolve o problema de *flickering*, porém permite um débito binário alto e suporta MIMO. Por fim, a modulação CSK requer um transmissor LED RGB, mas reduz as interferências inter-simbólica e entre as células. Também suporta *dimming*, resolve o problema de *flickering* e permite um débito binário elevado. Neste trabalho por uma questão de simplicidade da implementação laboratorial instalada foi analisada a modulação OOK.

A transmissão *uplink* a partir dos dispositivos móveis é difícil, uma vez que seria necessário, para além de um fotodíodo (utilizado para *downlink*), um LED, que poderia causar distúrbios no utilizador e degradação de desempenho do *smarthphone* (ex. bateria). Desta forma, podem utilizar-se transmissões baseadas em RF, uma vez que o Wi-Fi já está omnipresente, especialmente em ambientes *indoor*. A utilização de células VLC com raio reduzido, dentro da cobertura das células Wi-Fi, também garantem comunicação sem interrupção, quando o VLC não está disponível. Assim, as comunicações VLC e RF, como não se interferem, podem-se complementar para integrar uma rede móvel de alta capacidade e mais resiliente.

No capítulo 3, de forma a simular o funcionamento da localização do recetor, através de luz visível, em ambientes interiores, foram propostos cenários que usam as topologias quadrangular e hexagonal. Nestes foram utilizados um LED branco RGBV, como transmissor, e um fotodíodo PIN/PIN, como recetor.

Cada LED é utilizado para transmitir, em simultâneo, luz branca e informação em *downlink*. O transmissor forma uma única célula/ponto de acesso no qual o dispositivo móvel tem de pertencer para receber a informação. Esta é codificada, modulada e convertida em sinais luminosos pelo transmissor.

A utilização de um LED branco RGBV permite modular a informação, separadamente, nos quatro comprimentos de onda ($\lambda_R=626\text{ nm}$, $\lambda_G=530\text{ nm}$, $\lambda_B=470\text{ nm}$ e $\lambda_V=390\text{ nm}$). Assim, é possível implementar a técnica de WDM no recetor, *frequency hopping* e, conseqüentemente, assegurar débitos binários mais elevados.

O fotodíodo PIN/PIN oferece sensibilidade elevada na zona do visível e produz um sinal elétrico relacionado com a intensidade do sinal ótico recebido, transformando, assim, sinais luminosos em sinais elétricos. Conseqüentemente, sob iluminação estacionária, o dispositivo comporta-se não só como fotodetector mas também como um filtro ativo com a sensibilidade seletiva ao comprimento de onda incidente.

Foi utilizada a modulação OOK, para codificar a informação transmitida pelo LED. Nesta modulação, os dados dos bits 1 e 0 são codificados, ligando e desligando o LED, respetivamente.

Para criar um protocolo de comunicação e ultrapassar algumas restrições da tecnologia, foram criadas duas estruturas, com 64 bits de informação codificada. Estruturas de 5 sub-blocos, transmitidos pelos LEDs, e de 6 sub-blocos, transmitidos pelo controlador local.

A distância estimada, entre o LED e o recetor, é usada para originar um círculo (célula) à volta de cada transmissor, em que cada dispositivo tem de estar localizado de forma a receber a informação codificada, transmitida pelo LED.

Como foram usadas as topologias quadrangular e hexagonal, existem respetivamente, nove pontos de referência/regiões *footprint* em cada quadrado e dezoito em cada hexágono, ou seja, doze nos vértices e seis nos centros, dos seis triângulos equiláteros, que constituem um hexágono.

A topologia hexagonal é mais precisa do que a quadrangular, uma vez que tem mais pontos de referência, o que permite determinar com maior exatidão a posição final do recetor. No entanto, ambas têm a sua utilidade, dependendo do meio em questão. A topologia hexagonal é mais indicada para locais em que o utilizador se pode mover mais “livremente”. Já a topologia quadrangular, é mais apropriada para locais cujos movimentos do utilizador são “ortogonais”, ou seja, horizontal, vertical ou em ambas as direções.

Depois de definidos os cenários de estudo e caracterizado os transmissores, os recetores e as formas de codificação do sinal ótico, passou-se ao estudo do canal VLC, conforme descrito no capítulo 4. Para o efeito usou-se o modelo *Lambertiano* para caracterizar a distribuição de sinal ótico do LED. O ganho do canal foi calculado assumindo uma configuração quadrangular dos LEDs tetracromáticos. Foi determinada a cobertura do sinal e as respetivas *footprints* dentro de cada célula unitária, o que permitiu estimar o sinal multiplexado recebido pelo fotodetector. As simulações foram desenvolvidas em *MatLab*, tendo sido realizada uma GUI para facilitar a interação com o utilizador. O modelo foi inicialmente testado e otimizado ajustando curvas de calibração do sistema com dados experimentais.

A fim de simplificar e obter a curva de calibração *standard* teórica, foi considerado o modelo de um sistema VLC, com linha de vista (LOS) nas duas direções, ou seja, a transmissão da comunicação e iluminação, entre o transmissor (LED branco RGBV) e o recetor (fotodíodo PIN/PIN), foi realizada através da linha de vista direta, sem a contabilização de obstáculos. Desta forma, com o intuito de se realizar, idealmente, a calibração dos LEDs, foi proposto o cenário *indoor*. O cenário foi constituído por uma área de 4.25x4.25 cm, dividida por quatro células unitárias, com topologia quadrangular, e 9 LEDs brancos RGBV, em cada vértice das mesmas, cujo raio de transmissão de cada foi de 2 cm. Assim sendo, o utilizador provido com um fotodíodo instalado no seu dispositivo móvel, moveu-se livremente por todo o cenário. No entanto para receber, simultaneamente, a informação e iluminação provenientes dos LEDs, o utilizador teve de se encontrar no interior da área *indoor* e no raio de transmissão de pelo menos um LED, uma vez que a luz não penetra obstáculos opacos.

De forma a prever-se a cobertura em *downlink*, entre o transmissor (LED branco RGBV) e o recetor (fotodíodo), foi necessário calcular a potência recebida pelo fotodíodo. Esta foi obtida através da soma entre a potência transmitida pelos LEDs, o ganho de receção do fotodíodo, e o ganho de transmissão dos LEDs, subtraindo a atenuação de propagação, desde o transmissor ao recetor.

Com a calibração dos LEDs RGBV, a partir do ajuste minucioso do ganho do fotodíodo e da potência transmitida, foi possível obter a potência recebida e, conseqüentemente, uma curva de calibração *standard* teórica (“ideal”) com 16 níveis, representando as 2⁴ combinações possíveis, ligando (*bit* a 1) ou desligando (*bit* a 0) os 4 LEDs. Posto isto, foi possível perceber que as 9 regiões *footprint* de uma célula unitária são obtidas quando o utilizador se encontra no raio dos LEDs que cobrem essa região. Por conseguinte, a região *footprint* #1 corresponde ao nível 15 (1111), onde o utilizador se encontra coberto pelo raio dos 4 LEDs, ou seja, localiza-se no centro da célula unitária. As restantes regiões *footprint* #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8 e #9, correspondem, aos níveis da escada 14, 10, 11, 3, 7, 5, 13 e 12, respetivamente.

Através da curva de calibração *standard* teórica, foram determinados os coeficientes de cada LED, para se compreender a contribuição/“ganho” individual dos quatro canais RGBV, quando estes estão ligados “1”. Os coeficientes de cada LED, R_C, G_C, B_C, V_C , correspondem, respetivamente, ao nível 9 (1000) da curva de calibração com apenas a contribuição do LED vermelho, ao nível 5 (0100) que contém a contribuição do LED verde, ao nível 3 (0010) que contém a contribuição do LED azul e, por fim, o coeficiente do LED violeta corresponde ao nível 2 (0001) da curva de calibração.

Assim, definindo os sinais, R_S, G_S, B_S, V_S , que cada LED transmite, foi possível obter o sinal recebido pelo fotodíodo ($MUX_{(STD)}$), que resulta da multiplexação da multiplicação do sinal transmitido com o coeficiente, correspondente a cada canal. Para além disso, efetuando a paridade dos sinais transmitidos através da operação lógica XOR, para se obter a paridade dos mesmos (R_P, G_P, B_P) e multiplicando-os pelo coeficiente respetivo de cada LED, conseguiu-se obter a paridade do sinal multiplexado ($MUX_{(SP)}$). Assim, foi possível conferir e corrigir a existência de erros, numa descodificação não ideal do sinal recebido pelo fotodíodo.

Foi utilizada a modulação OOK para codificar a informação transmitida pelo LED. Esta modulação apesar de não permitir um débito binário elevado, em contrapartida, beneficia de um melhor desempenho a nível de BER. Para criar um protocolo de comunicação e ultrapassar algumas restrições da tecnologia, foi criada uma estrutura constituída por 6 sub-blocos do bloco de informação codificada. Desta forma, o sub-bloco *Sync* é constituído por 5 bits, o *ID* por 12 bits, o *PIN1* por 4 bits, o *PIN2* por 4 bits, o *Angle* por 4 bits e por fim o sub-bloco *Payload Data* por 35 bits (34 bits de informação mais 1 bit de paragem), perfazendo, na totalidade dos sub-blocos, 64 bits.

A descodificação foi realizada através da interpolação dos valores normalizados dos níveis da curva de calibração *standard* e do sinal recebido, ideal, pelo fotodíodo. Convertendo os valores resultantes da interpolação para binário foi possível obter os sinais transmitidos pelos LEDs.

Por fim, foi apresentada uma aplicação que consiste na simulação, simplificada, de uma navegação assistida por LEDs, num sistema Li-Fi, em ambientes interiores. A partir da mesma, foi possível, obter a nível teórico e prático, as curvas de calibração *standard* e prática, realizar a simulação dos sinais transmitidos pelos LEDs brancos RGBV e recebidos pelo fotodíodo PIN/PIN, e as suas descodificações. Assim, foi possível saber, num determinado instante de tempo, a localização de um utilizador provido de um fotodíodo, que recebe e multiplexa os sinais codificados, provenientes dos LEDs brancos RGBV, situados em cada vértice de uma célula unitária, com topologia quadrangular.

No capítulo 5, foram explorados possíveis trajetos de modo a simular e a validar a codificação e descodificação num cenário interior de um sistema Li-Fi, em comunicações unidirecional e bidirecional. Foram apresentados e comparados, os dados obtidos nas simulações produzidas através do modelo do canal VLC implementado na aplicação com os dados obtidos laboratorialmente. Os sinais multiplexados obtidos nas simulações foram descodificados para permitir a obtenção dos sinais transmitidos por cada canal de comunicação.

Com o intuito de ser testada uma comunicação unidirecional em *downlink*, ou seja, dos LEDs brancos RGBV (transmissor) para o fotodíodo (recetor/utilizador), foi proposto um cenário, no qual o recetor quer saber a sua localização enquanto se desloca, nos instantes t_0, t_1 e t_2 , pelas regiões *footprint* #1 e #4 da célula $C_{(4,3,1)}$ e *footprint* #4 da célula $C_{(4,4,1)}$.

Por outro lado, de forma a ser testada uma comunicação bidirecional, isto é, dos LEDs para o fotodetector e vice-versa, foi proposto o cenário, que consiste na deslocação do utilizador 7261, que se localiza na região *footprint* #1 da célula $C_{(4,3,1)}$, até ao encontro do seu amigo, utilizador 3009, que se localiza na região *footprint* #6 da célula $C_{(4,4,1)}$. Este encontro foi possível, com a ajuda do controlador local, que indicou ao utilizador 7261, o caminho mais curto para se encontrar com o utilizador 3009.

No capítulo 6, foi apresentada a descodificação do sinal e a implementação dos bits de paridade para controlo e correção de erros, com o *software* desenvolvido em *MatLab*.

A intensidade normalizada da curva de calibração *standard*, conteve 16 níveis distintos e o seu respetivo sinal de paridade conteve apenas 8 níveis distintos, que se assemelharam aos níveis pares da curva *standard*. Isto aconteceu porque a paridade dos 16 níveis de calibração,

relativos às 2^4 regiões possíveis de cobrir com 4 LEDs [RGBV], resultou apenas em dois conjuntos “simétricos” de 8 níveis, dos quais o LED violeta se encontrava sempre desligado. Desta forma, foi possível cobrir apenas 2^3 regiões com 3 LEDs [RGB].

Nestas curvas e para todos os níveis da curva de calibração *standard* cada *bit* foi representado pela média das 13 amostras que perfazem um *bit*. Na curva de calibração da paridade, foi necessário, devido às suas variações abruptas e consequente variação de declive, incluir o desvio padrão para a representação dos níveis.

Devido alguma assimetria entre os 8 pares de níveis da curva de paridade, foi necessário obter, dos dois conjuntos de 8 níveis, a curva de paridade com os 8 níveis mais próximos dos níveis pares, da curva de calibração *standard* de 16 níveis. Desta forma, a intensidade normalizada dos 8 níveis, da curva de calibração de paridade, foi ajustada pela proximidade à curva de calibração de sinal.

Foi descodificada a comunicação bidirecional, apresentada no capítulo 5, de forma a ser testada a eficácia do descodificador e do controlo de erros. Portanto, foi simulado, de novo, o cenário que consiste na deslocação do utilizador 7261, que se localiza na região *footprint* #1 da célula $C_{(4,3,1)}$, até ao encontro do seu amigo, utilizador 3009, que se localiza na região *footprint* #6 da célula $C_{(4,4,1)}$. O primeiro utilizador desloca-se pelas regiões *footprint* #1, #3, #1 e #6 nos instantes t_0 , t_1 , t_2 e t_3 . Já o segundo, permanece sempre na mesma região, *footprint* #6.

Relativamente à codificação, a mesma foi feita usando a modulação OOK, mas devido às limitações do *software* de laboratório, foi necessário reestruturar o bloco de informação codificada, apresentada no capítulo 4. Por conseguinte, a estrutura de 6 sub-blocos de informação manteve-se, mas a informação do sub-bloco *Payload Data* ficou reduzida apenas a 3 *bits*, ou seja, passou-se a ter uma dimensão total do bloco de 64 para 32 *bits*.

No que diz respeito à descodificação, inicialmente, foi realizada a normalização dos sinais recebidos pelo fotodíodo (S_p e S_{STD}), e das suas respetivas curvas de calibração, da paridade e *standard*. Em seguida, foi realizada a descodificação, através da interpolação de valores normalizados dos sinais, S_p e S_{STD} , com os valores mais próximos das suas respetivas curvas de calibração. Assim, foi possível corresponder os valores normalizados, provenientes da interpolação dos sinais, S_p e S_{STD} , com os níveis, em decimal, das respetivas curvas de calibração.

O controlo de erros foi realizado através da comparação dos níveis provenientes das duas descodificações, S_p e S_{STD} . Para tornar o controlo de erros ainda mais robusto, além do descrito, também foi verificado se o nível correspondente ao sinal recebido da paridade estava correto.

No final da descodificação e controlo de erros, os valores dos respetivos níveis dos sinais recebidos, S_{STD} e S_p , foram convertidos de decimal para binário. Assim, foi possível descodificar, sem erros, os sinais S_{STD} e S_p , recebidos pelo fotodíodo e obter os sinais inicialmente transmitidos pelos LEDs, P_{tx} e S_{tx} .

Analisando os resultados obtidos, observou-se que os conjuntos de sinais descodificados, sem controlo de erros, S_{tx}' , continham alguns *bits* errados. Nomeadamente, nos canais azul (B_s') e violeta (V_s'). Já os canais vermelho (R_s') e verde (G_s') continham sempre um número de erros menor ou inexistente. Isto aconteceu, porque o nível de ruído no sinal transmitido por cada LED depende da intensidade do sinal ótico. Como a intensidade do LED vermelho é mais elevada, este foi o canal que apresentou menor ruído. Seguem-se depois os canais verde, azul e violeta, por ordem decrescente de intensidade e crescente de ruído.

Da descodificação de 640 *bits* codificados (128 *bits*/ região *footprint*), relativa à movimentação dos dois utilizadores, apenas ocorreram erros em 14%, ou seja, conteve uma eficácia de 86%. No entanto, na descodificação com a presença do controlo de erros já foi possível observar uma eficácia de 100%. Desta forma, conclui-se que a localização e posterior

orientação de um recetor, através da comunicação entre LEDs brancos RGBV e um fotodíodo PIN/PIN, foi realizada com sucesso.

7.2 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, seria relevante corrigir a conversão da altura do fotodíodo para o cálculo do ganho transmitido pelos LEDs. Assim, o valor h_{PH} passará de 1 m para 0.01 m e consequentemente terá de ser feito um novo ajuste minucioso do ganho de receção (interação transmissor/detetor) e da potência transmitida por cada LED RGBV por forma a obter as mesmas potências recebidas pelo fotodíodo e uma curva de calibração *standard*, com 16 níveis, semelhante à obtida laboratorialmente.

Seria interessante, aumentar a escala do cenário interior e definir um cenário que contabilize obstáculos. Assim, terá de ser escolhido o modelo NLOS, num sistema VLC, que representa um modelo mais realista do ambiente envolvente, não existindo uma linha de vista direta entre o transmissor e o recetor. Consequentemente, este modelo não sofre de *shadowing*, mas devido à contabilização das múltiplas reflexões, quando o feixe do transmissor incide sobre os obstáculos e reflete para múltiplas direções, sofre claramente o efeito de múltiplos caminhos.

Seria relevante, a nível laboratorial, calibrar melhor as curvas *standard* e paridade, de forma a que os níveis pares da curva *standard* coincidam com os 8 níveis distintos da curva da paridade, diminuindo o desnível entre eles. Deste modo, quanto melhor estiverem niveladas as curvas, maior será a eficiência da descodificação e do controlo de erros.

Seria, ainda, útil explorar tanto a nível prático como teórico, a comunicação VLC em *uplink*, do recetor para o transmissor, colmatando assim as várias perturbações possíveis quando se instala, para além de um recetor, fotodetetor, um transmissor, LED, no dispositivo móvel do utilizador para transmitir informação.

Por fim, seria proveitoso testar outras alternativas para modular o sinal transmitido pelos LEDs. Existem outras modulações, para além da OOK, que suportam a comunicação através de luz visível, como as modulações OFDM e CSK, que cumprem os requisitos de preservação da luz para os utilizadores e permitem um débito binário mais elevado do que a modulação utilizada.

Bibliografia

Referências

- [1] C. Laoudias, G. Constantinou, M. Constantinides, S. Nicolaou, D. Zeinalipour-Yazti e C. G. Panayiotou, "The Airplace Indoor Positioning Platform for Android Smartphones," IEEE, 2012, pp. 312-315.
- [2] H. Koyuncu e S. H. Yang, "A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems," vol. 10, 2010.
- [3] R. Mautz, "Overview of current indoor positioning systems," vol. 35, 2009.
- [4] W. Zhang e M. Kavehrad, "Comparison of VLC-based indoor positioning techniques," vol. 8645, 2013.
- [5] A. Dogra, R. K. Jha e S. Jain, "A Survey on beyond 5G Network with the Advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies," vol. 9, 2021.
- [6] C. LED, "Cree® PLCC4 3-in-1 SMD LED PRODUCT FAMILY DATA SHEET," 2014. [Online]. Available: <https://cree-led.com/media/documents/CLVBAFKA.pdf>.
- [7] M. Vieira, P. Louro, M. Fernandes, M. A., A. Fantoni e J. Cost, "Three Transducers Embedded into One Single SiC Photodetector: LSP Direct Image Sensor, Optical Amplifier and Demux Device," 2011.
- [8] P. Louro, M. Vieira, M. A., M. Fernandes e J. Cost, "Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications," 2011.
- [9] Y. Gu, A. Lo e I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," vol. 11, 2009.
- [10] B. Ozdenizci, V. Coskun e K. Ok, "NFC internal: An indoor navigation system," vol. 15, 2015.
- [11] J. Hightower e G. Borriello, "A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing," vol. 34, 2001.
- [12] P. Louro, M. Vieira e M. A. Vieira, "Geolocalization and navigation by visible light communication to address automated logistics control," *Optical Engineering*, vol. 61, nº 1, pp. 1 - 16, 2022.
- [13] M. Vieira, M. Vieira, P. Louro e P. Vieira, "Positioning and advertising in large indoor environments using visible light communication," *Optical Engineering*, vol. 58, nº 6, pp. 1 - 8, 2019.
- [14] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu e P. Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, nº 4, 2015.
- [15] M. Vieira, M. A. Vieira, P. Louro, A. Fantoni e P. Vieira, "Light-fidelity (Li-Fi) optical sensing and detection in large indoor environments," em *SENSORDEVICES 2018--The Ninth*

International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, IARIA, 2018, pp. 54-59.

- [16] C. Elliott, M. Yamada, J. Penning, S. Schober e K. Lee, "Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications," 12 2019.
- [17] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. J. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A. E. Kelly, G. Faulkner e others, "A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride μ LEDs," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, n^o 7, pp. 637-640, 2014.
- [18] Y. Tanaka, S. Haruyama e M. Nakagawa, "Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links," em *11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No. 00TH8525)*, vol. 2, 2000, pp. 1325-1329.
- [19] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light," *IEEE Std 802.15.7-2011*, pp. 1-309, 2011.
- [20] M. F. Keskin, A. D. Sezer e S. Gezici, "Localization via Visible Light Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, n^o 6, 2018.
- [21] Y. Zhuang, L. Hua, L. Qi, J. Yang, P. Cao, Y. Cao, Y. Wu, J. Thompson e H. Haas, "A survey of positioning systems using visible LED lights," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, n^o 3, 2018.
- [22] D. Zhu e C. J. Humphreys, "Solid-state lighting based on light emitting diode technology," *Optics in Our Time*, 2016.
- [23] C. Danakis, M. Afgani, G. Povey, I. Underwood e H. Haas, "Using a CMOS camera sensor for visible light communication," 2012.
- [24] B. Xie, K. Chen, G. Tan, M. Lu, Y. Liu, J. Wu e T. He, "LIPS: A light intensity-based positioning system for indoor environments," vol. 12, 2016.
- [25] K. Cui, G. Chen, Z. Xu e R. D. Roberts, "Line-of-sight visible light communication system design and demonstration," 2010.
- [26] Z. Ghassemlooy, W. Popoola e S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: System and channel modelling with MATLAB[®]*, 2017.
- [27] T. Komine e M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, n^o 1, pp. 100-107, 2004.
- [28] H. Farahneh, C. Mekhiel, A. Khalifeh, W. Farjow e X. Fernando, "Shadowing effects on visible light communication channels," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vols. 1 de 2016-October, 2016.

- [29] T. Komine e M. Nakagawa, "A study of shadowing on indoor visible-light wireless communication utilizing plural white LED lightings," *1st International Symposium on Wireless Communication Systems 2004, Proceedings ISWCS '04*, 2004.
- [30] A. Khalifeh, K. Alakappan, J. Prabakaran, P. Nagaradjane e others, "A Simulation Analysis for LED Spatial Distribution for Indoor Visible Light Communication," 2021.
- [31] S. M. Berman, D. S. Greenhouse, I. L. Bailey, R. D. Clear e T. W. Raasch, "Human electroretinogram responses to video displays, fluorescent lighting, and other high frequency sources," vol. 68, nº 8, 1991.
- [32] N. Fujimoto e H. Mochizuki, "477 Mbit/s visible light transmission based on OOK-NRZ modulation using a single commercially available visible LED and a practical LED driver with a pre-emphasis circuit," em *National Fiber Optic Engineers Conference*, 2013, pp. JTh2A-73.
- [33] S. Muthu e J. Gaines, "Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design," em *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.*, vol. 1, 2003, pp. 515-522.
- [34] K. Samian, L. Weimin e C. Douglas, "VLC Dimming Proposal IEEE 802.15- 15-09-0641-00-0007," 2009. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/09/15-09-0641-00-0007-vlc-dimming-proposal.pdf>.
- [35] H. Burchardt, N. Serafimovski, D. Tsonev, S. Videv e H. Haas, "VLC: Beyond point-to-point communication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, nº 7, pp. 98-105, 2014.
- [36] C. CIE, "Commission internationale de l'eclairage proceedings, 1931," *Cambridge University, Cambridge*, 1932.
- [37] A. Yokoi, J. Son e T. Bae, "CSK constellation in all color band combinations," *IEEE 802.15 contribution 15-11-0247-00-0007*, 2011.
- [38] J. Vucic, C. Kottke, K. Habel e K.-D. Langer, "803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary," em *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 2011, pp. 1-3.
- [39] R. Singh, T. O'Farrell e J. P. David, "An enhanced color shift keying modulation scheme for high-speed wireless visible light communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, nº 14, pp. 2582-2592, 2014.
- [40] M. Vieira, M. A. Vieira, P. Louro, A. Fantoni e P. Vieira, "Wayfinding in complex buildings using visible light communication," em *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXVIII*, vol. 11274, Bernd Witzigmann and Marek Osiński and Yasuhiko Arakawa, 2020, pp. 275 - 284.
- [41] M. Vieira, M. A. Vieira, P. Louro, A. Fantoni e P. Vieira, "Geolocation and communication in unfamiliar indoor environments through visible light," em *Light-Emitting Devices*,

Materials, and Applications XXV, vol. 11706, Jong Kyu Kim and Michael R. Krames and Martin Strassburg, 2021, pp. 58 - 68.

- [42] M. Vieira, M. Vieira, P. Louro, J. Rodrigues e P. Vieira, "Indoor self-localization and wayfinding services using visible light communication: a model," em *SENSORDEVICES 2021: The Twelfth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications*, IARIA, 2021, pp. 67-72.
- [43] P. Louro, M. Vieira, P. Vieira, J. Rodrigues e M. de Lima, "Geo-localization using indoor visible light communication," 2021.
- [44] P. Louro, M. Vieira, M. Vieira, M. d. Lima, J. Rodrigues e P. Vieira, "Footprint model in a navigation system based on visible light communication," em *SENSORDEVICES 2021: The Twelfth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications*, IARIA, 2021, pp. 92-97.
- [45] I. Raza, S. Jabeen, S. Chaudhry, S. A. Hussain, A. Saeed, M. Bhatti e M. Raza, "Optical wireless channel characterization for indoor visible light communications," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, nº 22, p. 1, 2015.
- [46] M. A. Vieira, M. Vieira, P. Louro e P. Vieira, "Redesign of the trajectory within a complex intersection for visible light communication ready connected cars," *Optical Engineering*, vol. 59, nº 9, pp. 1 - 16, 2020.