

**Inatel**

*Instituto Nacional de Telecomunicações*

**Sistema VLC Aplicado às  
Redes 5G**

**Marco Aurélio de Oliveira**

**Novembro/2020**



## **Sistema VLC Aplicado às Redes 5G**

Marco Aurélio de Oliveira

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

Santa Rita do Sapucaí

2020

Oliveira, Marco Aurélio de  
O482s Sistema VLC Aplicado às Redes 5G. / Marco Aurélio de Oliveira –  
Santa Rita do Sapucaí, 2020.  
95 p.

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior.  
Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional  
de Telecomunicações – INATEL.  
Inclui bibliografia e anexo.

1. 5G 2. NR 3. LED 4. VLC 5. WDM 6. Mestrado em  
Telecomunicações. I. Sodré Junior, Arismar Cerqueira. II. Instituto Nacional de  
Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

Ficha Catalográfica elaborada pelo Bibliotecário da Instituição  
CRB6-2718 – Paulo Eduardo de Almeida

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_, pela  
comissão julgadora:

---

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

INATEL

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria José Pontes

Universidade Federal do Espirito Santo

---

Prof. Dr. Luciano Leonel Mendes

INATEL

---

Coordenador do Curso de Mestrado  
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

*“A persistência é o caminho do  
êxito.”*

---

*Charles Chaplin*

*À minha mãe Maria do Carmo de  
Oliveira e à minha esposa Diana  
Rodrigues Sarcinelli dos Santos que  
me apoiaram neste desafio.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me iluminar durante a realização deste trabalho, me concedendo saúde, força e fé para superar todas as dificuldades.

À minha mãe Maria do Carmo de Oliveira, pelos ensinamentos, amor, incentivos e apoio incondicional em todos os momentos de minha vida. Aos amigos e familiares que compartilham os momentos bons e difíceis desta trajetória.

À minha esposa Diana Rodrigues Sarcinelli dos Santos, por todo amor, companheirismo, incentivos, paciência e compreensão que foram essenciais para conclusão deste trabalho. Te amo!

Aos meus amigos e companheiros de trabalho do Laboratório WOCA por todos os ensinamentos compartilhados, suporte, amizade, momentos fora do laboratório e por estarem presentes nos momentos difíceis de minha vida. Em especial ao grupo de óptica, nomeadamente: Eduardo, Matheus, Luiz Augusto, Celso e Ramon, e também aos amigos Lucas, Luciano e Andreia.

Ao Instituto Nacional de Telecomunicações pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado e por toda a estrutura oferecida. A todos os professores do mestrado que contribuíram para minha formação acadêmica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior, pela oportunidade, confiança, ensinamentos e todo suporte. Muito obrigado!

Às empresas Rohde & Schwarz e Venturus pela parceria e empréstimos de equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Ao órgão de fomento à pesquisa FAPEMIG, pelo apoio financeiro.



# Índice

Índice .....	ix
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas .....	xiv
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	xv
Lista de Símbolos .....	xix
Lista de Publicações .....	xxiii
Resumo .....	xxiv
Abstract.....	xxv
Capítulo 1.....	1
Introdução .....	1
1.1 Motivação e Contextualização .....	1
1.2 Revisão bibliográfica.....	5
1.3 Contribuições .....	11
Capítulo 2.....	12
Fundamentos Teóricos.....	12
2.1 Sistemas VLC.....	12
2.1.1 LEDs e Transmissão de Dados.....	13
2.1.2 Conversores Eletro-Ópticos .....	18
2.1.3 Modulação por Intensidade e Detecção Direta.....	21
2.1.4 Fontes de Ruído.....	22
2.1.5 Perdas no Canal VLC com Visada Direta .....	24

2.2 Sinal 5G NR .....	26
Capítulo 3.....	31
Sistemas VLC Baseados em WDM.....	31
3.1 Análises Numéricas.....	31
3.2 Caracterização dos Componentes .....	37
3.3 Resultados Experimentais .....	42
3.3.1 VLC Monocanal .....	42
3.3.2 VLC WDM.....	46
Capítulo 4.....	52
Compartilhamento das <i>Attocells</i> Ópticas por Diferentes Tecnologias .....	52
4.1 Arranjos Experimentais.....	54
4.2 Resultados Experimentais .....	56
Capítulo 5.....	59
Conclusões e Trabalhos Futuros .....	59
5.1 Conclusões .....	59
5.2 Trabalhos Futuros.....	61
Referências Bibliográficas.....	62

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> – Estimativa de crescimento dos dados móveis [adaptado de [1]]. .....	2
<b>Figura 2</b> – Exemplos de aplicações de sistemas VLC.....	4
<b>Figura 3</b> - Espectro de luz de UV até IR [16].....	5
<b>Figura 4</b> - Potência óptica normalizada emitida em função do comprimento de onda: a) LED branco [adaptado de [45]]; b) LED RGBA [adaptado de [46]]. .....	8
<b>Figura 5</b> - Ilustração do sistema VLC [63]. .....	13
<b>Figura 6</b> - Curva de desempenho da potência óptica de saída e corrente de excitação [adaptado de [63]]. .....	14
<b>Figura 7</b> - Função sensibilidade do olho normalizada em função do comprimento de onda [66]. .....	16
<b>Figura 8</b> - Característica de três diferentes tipos de materiais de fotodiodo em função do comprimento de onda: a) coeficiente de absorção óptico; b) responsividade. ....	20
<b>Figura 9</b> - Diagrama em blocos do sistema de comunicação óptica com modulação e detecção direta. ....	22
<b>Figura 10</b> - a) Modelo de transmissão[adaptado de [62]]; b) Padrão de irradiação da fonte Lambertiana na escala logarítmica para diferentes $\phi_{12}$ . ....	26
<b>Figura 11</b> – Estrutura frame, sub frame e slot do 5G NR[adaptado de [76]]. ....	28
<b>Figura 12</b> - Esquemático do diagrama em blocos usado nas análises numéricas.....	32
<b>Figura 13</b> – Diagrama de transmissão OptiSystem®. ....	32
<b>Figura 14</b> – Bloco LOS Channel e quadro para configuração dos valores. ....	33
<b>Figura 15</b> – Conjunto em bloco do receptor do OptiSystem®. ....	34
<b>Figura 16</b> – Curva de BER na escala logarítmica em função da distância. a) QPSK; b) 16-QAM. ....	35
<b>Figura 17</b> – Curva de BER na escala logarítmica em função da distância para diferentes valores de $\phi_{1/2}$ .....	36

<b>Figura 18</b> – LED RGBA. a) Antes das modificações; b) Com refletor e conectores SMA. ....	38
<b>Figura 19</b> – Equalizador baseado em circuito RCL. a) diagrama do circuito; b) fotografia c) resposta em frequência. ....	39
<b>Figura 20</b> – Potência elétrica normalizada medida na recepção em função da frequência, com e sem o uso de circuito de equalização. ....	39
<b>Figura 21</b> – Fotodiodo PIN de silício ET-2030 [adaptado de [94]]. ....	40
<b>Figura 22</b> – Conjunto micro posicionador, lente e fotodiodo.....	41
<b>Figura 23</b> - Potência óptica e responsividade para os comprimentos de onda vermelho, verde, azul e âmbar.....	42
<b>Figura 24</b> - Arranjo experimental do enlace VLC operando com o LED vermelho. a) Diagrama em blocos. b) fotografia. PD – fotodiodo; Eq.- equalizador; EAs – amplificadores elétricos.....	43
<b>Figura 25</b> - EVM <sub>RMS</sub> em função da corrente de bias. A- constelação 16-QAM LED verde; B- constelação 16-QAM LED azul; C- constelação 16-QAM LED vermelho. ...	44
<b>Figura 26</b> – Vazão efetiva em função da distância. a) 10 MHz de largura de faixa. b) 50 MHz de largura de faixa. ....	45
<b>Figura 27</b> - Arranjo experimental enlace VLC operando com três LED. a) Diagrama em blocos; b) fotografia do arranjo em 0,75m. ....	46
<b>Figura 28</b> - EVM <sub>RMS</sub> em função da vazão efetiva para sinal 5G NR, em 0,75 cm. a) LED vermelho; b) LED azul; c) LED verde.....	48
<b>Figura 29</b> – Diagrama em blocos sistema DPD implementado por W1416 [adaptado de [98]] .....	49
<b>Figura 30</b> - EVM <sub>RMS</sub> em função da vazão efetiva para o sinal M-QAM com DPD, em 0,75 cm. a) LED vermelho; b) LED azul; c) LED verde.....	50
<b>Figura 31</b> - Ilustração do compartilhamento do feixe de luz por diferentes padrões de telecomunicações.....	53
<b>Figura 32</b> - Diagrama em blocos do Arranjo <sub>1</sub> . ....	54
<b>Figura 33</b> - Diagrama em blocos do Arranjo <sub>2</sub> . ....	55
<b>Figura 34</b> - Espectro elétrico na recepção de duas CWs transmitidas pelo LED azul e pelo LED vermelho. a) Maximizando a potência do LED azul; b) Mantando as potência no mesmo nível.....	55
<b>Figura 35</b> - Fotografia do Arranjo <sub>2</sub> .....	56

**Figura 36** - Espectro dos sinais recebidos com as respectivas constelações aferidas, para o Arranjo<sub>1</sub> e Arranjo<sub>2</sub>..... 57

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Comparação dos sistemas OWC com os sistemas RoF.....	6
<b>Tabela 2</b> – Revisão bibliográfica dos sistemas VLC aplicados às redes 5G. ....	10
<b>Tabela 3</b> – índice de numerologia e os respectivos SCS e CP [77].....	28
<b>Tabela 4</b> - Alocação de RB em função de BW e SCS para o FR1[84]. ....	30
<b>Tabela 5</b> - Ordem de modulação e respectivos $EVM_{RMS}$ segundo 3GPP.....	30
<b>Tabela 6</b> - Valores de BER para o B2B elétrico e o B2B óptico.....	34
<b>Tabela 7</b> – Características do LED RGBA utilizado de acordo com [90].....	37
<b>Tabela 8</b> – Características dos amplificadores de RF utilizados. ....	41
<b>Tabela 9</b> – Valores de $EVM_{RMS}$ e corrente de bias nos pontos A, B, C e D. ....	44
<b>Tabela 10</b> - Parâmetros utilizados para máxima vazão efetiva no padrão 5G NR. ....	48
<b>Tabela 11</b> - Parâmetros utilizados para máxima vazão efetiva com o sinal M-QAM com DPD. ....	51

## Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>3GPP</b>	<i>3<sup>th</sup> Generation Partnership Project</i>
<b>4G</b>	sistema de telefonia móvel de quarta geração
<b>5G</b>	sistema de telefonia móvel de quinta geração
<b>5G NR</b>	<i>5G new radio</i>
<b>6G</b>	sistema de telefonia móvel de sexta geração
<b>AC</b>	<i>alternating current</i>
<b>ADC-OFDM</b>	<i>asymmetrically clipped DC biased optical OFDM</i>
<b>APD</b>	<i>avalanche photodiode</i>
<b>AWG</b>	<i>arbitrary waveform generator</i>
<b>BER</b>	<i>bit error rate</i>
<b>BS-ILC</b>	<i>beam-steered infrared light communication</i>
<b>BW</b>	<i>bandwidth</i>
<b>BWP</b>	<i>bandwidth part</i>
<b>CC</b>	corrente contínua
<b>CD</b>	<i>coherent detection</i>
<b>CP</b>	<i>cyclic prefix</i>
<b>CO</b>	<i>central office</i>
<b>CP-OFDM</b>	<i>cyclic prefix OFDM</i>
<b>CSK</b>	<i>color-shift-keying</i>
<b>CW</b>	<i>continuous wave</i>
<b>DC</b>	<i>direct current</i>

<b>DCO-OFDM</b>	<i>DC-biased optical OFDM</i>
<b>DD</b>	<i>direct detection</i>
<b>DPD</b>	<i>digital predistortion</i>
<b>DWT-OFDM</b>	<i>discrete wavelet transform OFDM</i>
<b>E/O</b>	<i>elétro-óptica</i>
<b>EM</b>	<i>external modulation</i>
<b>eMBB</b>	<i>enhanced mobile broadband</i>
<b>eMTC</b>	<i>enhanced machine type communications</i>
<b>EVM<sub>RMS</sub></b>	<i>root mean square error vector magnitude</i>
<b>FBMC</b>	<i>filter bank multi carrier</i>
<b>FER</b>	<i>frame error rate</i>
<b>FFT</b>	<i>fast fourier transform</i>
<b>F-OFDM</b>	<i>filtered-OFDM</i>
<b>FOV</b>	<i>field-of-view</i>
<b>FR1</b>	<i>frequency range 1</i>
<b>FR2</b>	<i>frequency range 2</i>
<b>FSO</b>	<i>free-space optical</i>
<b>GaAs</b>	<i>arseneto de gálio</i>
<b>GaN</b>	<i>nitreto de gálio</i>
<b>GaP</b>	<i>fosfeto de gálio</i>
<b>GFDM</b>	<i>generalized frequency division multiplexing</i>
<b>HFRFT</b>	<i>higler frequency reuse fator based</i>
<b>IF</b>	<i>infrared</i>
<b>IFFT</b>	<i>inverse fast fourier transform</i>
<b>IM</b>	<i>intensity modulation</i>
<b>InGa</b>	<i>arseneto de gálio</i>
<b>InGaAs</b>	<i>arseneto de gálio e índio</i>



<b>IoT</b>	<i>Internet of things</i>
<b>ISI</b>	<i>inter-symbol-interference</i>
<b>LDPC</b>	<i>low-density parity-check</i>
<b>LED</b>	<i>light emission diode</i>
<b>LOS</b>	<i>line-of-sight</i>
<b>LTE</b>	<i>long term evolution</i>
<b>MIMO</b>	<i>multiple-input multiple-output</i>
<b>mMTC</b>	massive machine-type communication
<b>NF</b>	<i>noise figure</i>
<b>NSA</b>	<i>non-standalone</i>
<b>O/E</b>	<i>óptica-elétrica</i>
<b>OC</b>	<i>central office</i>
<b>OFDM</b>	<i>orthogonal frequency division multiplexing</i>
<b>OOK</b>	<i>on-off key</i>
<b>OWC</b>	<i>optical wireless communication</i>
<b>PAM</b>	<i>pulse-amplitude modulation</i>
<b>PIN</b>	<i>positive-intrinsic-negative</i>
<b>PLC</b>	<i>power line communication</i>
<b>p-n</b>	<i>positive-negative</i>
<b>PSK</b>	<i>phase-shift keying</i>
<b>QAM</b>	<i>quadrature and amplitude modulation</i>
<b>RF</b>	<i>radiofrequency</i>
<b>RGB</b>	<i>red, green and blue</i>
<b>RGBA</b>	<i>red, green, blue and amber</i>
<b>RLC</b>	resistivo, indutivo e capacitivo
<b>RoF</b>	<i>Radio over fiber</i>
<b>SCS</b>	<i>subcarrier spacing</i>

<b>SEFDM</b>	<i>spectrally efficient frequency division multiplexing</i>
<b>Si</b>	<i>silício</i>
<b>SINR</b>	<i>signal-to-interference-plus-noise ratio</i>
<b>SNR</b>	<i>signal-to-noise ratio</i>
<b>TCM</b>	<i>trellis-coded modulation</i>
<b>UFMC</b>	<i>universal frequency multcarrier</i>
<b>URLLC</b>	<i>ultra-reliable low-latency communication</i>
<b>UFR</b>	<i>unity frequency reuse</i>
<b>UV</b>	<i>ultravioleta</i>
<b>VLC</b>	<i>visible light communication</i>
<b>VLCC</b>	<i>Visible Light Communications Consortium</i>
<b>VSA</b>	<i>vector signal analyser</i>
<b>VSG</b>	<i>vector signal generator</i>
<b>VT</b>	<i>vectored transmission</i>
<b>WDM</b>	<i>wavelength-division multiplexing</i>
<b>WICR</b>	<i>wireless infrared communications</i>

## Lista de Símbolos

$\eta_{in}$	eficiência quântica interna
$R_r$	taxa de recombinação dos pares elétrons-lacunas que geram irradiação
$N_{in}$	número de fótons gerado
$N_j$	número de fótons que atravessa a junção p-n
$R_{nr}$	taxa de recombinação dos pares elétrons-lacunas que não geram irradiação
$\tau_r$	tempo de recombinação dos pares elétrons-lacunas que geram irradiação
$\tau_{nr}$	tempo de recombinação dos pares elétrons-lacunas que não geram irradiação
$I$	corrente elétrica
$q$	carga elétrica elementar
$h$	constante de Plank
$f$	frequência de irradiação
$P_{in}$	potência óptica interna
$\eta_{ex}$	eficiência quântica externa
$\eta_t$	eficiência óptica
$\eta_p$	eficiência de potência do LED
$P_{ex}$	potência óptica que sai do LED
$P_{ele}$	potência elétrica que entra no LED
$V$	tensão elétrica
$F$	fluxo luminoso
$L(\lambda)$	função sensibilidade do olho humano

$\eta_{lu}$	eficiência luminosa
$\tau$	tempo de recombinação dos pares elétrons-lacunas
$H(\omega)$	função de transferência do LED
$\omega$	frequência angular
$f_{op}$	frequência de corte óptica
$f_{el}$	frequência de corte elétrica
$I_f$	fotocorrente
$P_{rec}$	potência óptica que chega ao fotodiodo
$\alpha$	coeficiente de absorção óptico do material
$W$	largura da região intrínseca do material semiconductor
$\Gamma$	coeficiente de reflexão entre o ar e a face do dispositivo
$\eta_f$	eficiência quântica do fotodiodo
$\xi$	responsividade
$\lambda$	comprimento de onda
$c$	velocidade de propagação da luz no vácuo
$E_g$	energia de <i>bandgap</i>
$\tau_{tr}$	tempo de trânsito dos portadores na região de depleção
$\tau_{RC}$	constante de tempo resistiva-capacitiva
$M$	ganho de corrente
$I_M$	corrente fotodiodo APD
$\xi_{APD}$	responsividade do APD
$R_L$	resistor de carga
$\sigma_T^2$	variância do ruído térmico
$B$	banda do receptor
$k$	constante de Boltzmann
$T$	temperatura absoluta

$\sigma_{\text{shot}}^2$	variância do ruído de disparo no PIN
$\sigma_{\text{dark}}^2$	variância do ruído provocado pela corrente escura
$\sigma_{\text{light}}^2$	variância provocada pela potência óptica incidente no PIN
$I_d$	corrente escura
$S_{\text{iso}}$	potência de uma esfera isotrópica
$D$	diretividade da onda irradiante
$A_{\text{eff}}$	área efetiva de captação de energia irradiante
$P_{\text{rec}}$	potência que chega ao receptor
$d$	raio da esfera isotrópica
$P_{\text{tx}}$	potência de transmissão
$\phi$	ângulo de transmissão
$m$	ordem de diretividade do feixe de luz
$\phi_{1/2}$	semiângulo de meia potência do feixe de luz
$\psi$	ângulo de incidência
$A_R$	área geométrica de captação de luz do fotodetector
$R(\phi)$	diagrama de irradiação do LED
$\psi_c$	ângulo do campo de visada da lente concentradora
$n$	índice de refração
$Y(\psi)$	função filtro passa-faixa
$j$	número de portadoras agregadas
$v_{\text{Layers}}^{(j)}$	número de camadas para aplicações MIMO
$Q_m^{(j)}$	quantidade de bits por símbolo
$R_{\text{max}}$	máxima taxa de codificação
$\beta^{(j)}$	fator escala
$N_{\text{PRB}}^{\text{BW}}$	número máximo de blocos de recurso alocados por banda
$\mu$	numerologia

$OH^{(j)}$  fator cabeçalho utilizado para sinalização

$T_S^\mu$  tempo médio de símbolo por numerologia

# Lista de Publicações

## Periódicos:

- [1] **M. A. de Oliveira**, E. S. Lima, M. S. P. Cunha, M. Abreu, Arismar Cerqueira S. Jr “RGB-based VLC System Using 5G NR Standard”. *Optics Communications*, Volume 481, 15 February 2021, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126542>.
- [2] R. M. Borges, C. H. S. Lopes, E. S. Lima, **M. A. de Oliveira**, M. S. B. Cunha, L. C. Alexandre, L. G. da Silva, L. A. M. Pereira<sup>1</sup>, D. H. Spadoti, M. A. Romero, Arismar Cerqueira S. Jr., “Integrating Optical and Wireless Techniques towards Novel Fronthaul and Access Architectures in a Non-standalone 5G NR Framework”. Submitted to *Optics Communications*, October, 2020.

## Congressos:

- [3] **Marco Aurélio de Oliveira**; Matheus Sêda Borsato Cunha; Marcelo Abreu; Arismar Cerqueira Sodré Junior, “Enlaces VLC Baseados no Novo Padrão 5G NR”. MOMAG 2020 - MOMAG 2018 - 19º SBMO Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e ao 14º CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2020.
- [4] **M. A. de Oliveira**, E. S. Lima, M. Abreu e Arismar Cerqueira S. Jr, “Sistemas VLC 4G/5G baseados em Agregação de Portadoras” Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia (ENCOM 2020), 2020.

# Resumo

Este trabalho tem por objetivo reportar implementações de sistemas de comunicação por luz visível (VLC – *visible light communication*) com o novo padrão de telefonia móvel 5G NR (*new radio*). O sistema proposto baseia-se no uso de diodos emissores de luz (LED – *light emission diode*), modulados diretamente para transmissão de sinais no espaço livre em enlaces de visada direta. Avaliou-se quatro portadoras ópticas, presentes no LED RGBA (*red, green, blue and amber*), e implementou-se um sistema de alta vazão por meio da técnica de multiplexação de comprimentos de onda. As análises de desempenho foram realizadas em tempo real em termos de  $EVM_{RMS}$  (*root mean square error vector magnitude*), seguindo as especificações técnicas do 3GPP (3<sup>th</sup> *Generation Partnership Project*) e em função dos seguintes parâmetros: corrente de polarização do LED, distância do enlace e vazão efetiva. Visando compensar a resposta não linear dos amplificadores elétricos empregados no enlace VLC WDM, implementou-se a técnica pré-distorção digital (DPD - *digital predistortion*) em um sinal *M*-QAM. Obteve-se 872 Mbit/s com o sinal 5G NR e 1,92 Gbit/s com o sinal *M*-QAM em conjunto com técnica DPD. Além disso, analisou-se a transmissão simultaneamente de diferentes formas de ondas por um único ponto de acesso, objetivando atender diversas tecnologias em um mesmo ambiente interno. Por fim, propôs-se o conceito e demonstrou-se o uso da técnica de agregação de portadoras em *attocell* ópticas.

**Palavras chaves:** 5G NR; LED; VLC; WDM.



# Abstract

This work reports experimental analyses of a visible light communication (VLC) system using the new standard for the fifth generation of mobile networks (5G NR). The proposed system is based on the use of directly-modulated light emitting diodes (LEDs) to transmit signals to line-of-sight free space links. Four optical carriers, from a RGBA (red, green, blue, and amber) LED, were individually evaluated, aiming to deploy a high-throughput system based on different colors. The system performance investigation has been realized in terms of root mean square error vector magnitude ( $EVM_{RMS}$ ) and as a function of the LED bias currents, link length and throughput. In order to compensate the electric amplifiers non-linear response, the digital pre-distortion (DPD) technique has been implemented in an M-QAM signal. At 75 cm, 872 Mbit/s and 1.92 Gbit/s throughput were obtained with the 5G NR standard and DPD-based M-QAM signal, respectively. In addition, a simultaneous transmission of different waveforms has been analyzed using a single access point, with the purpose of enabling multiple technologies in the same indoor environment. Finally, the carrier aggregation concept was proposed and demonstrated in an optical attocell.

**Keywords:** 5G NR; LED; VLC; WDM.

# Capítulo 1

## Introdução

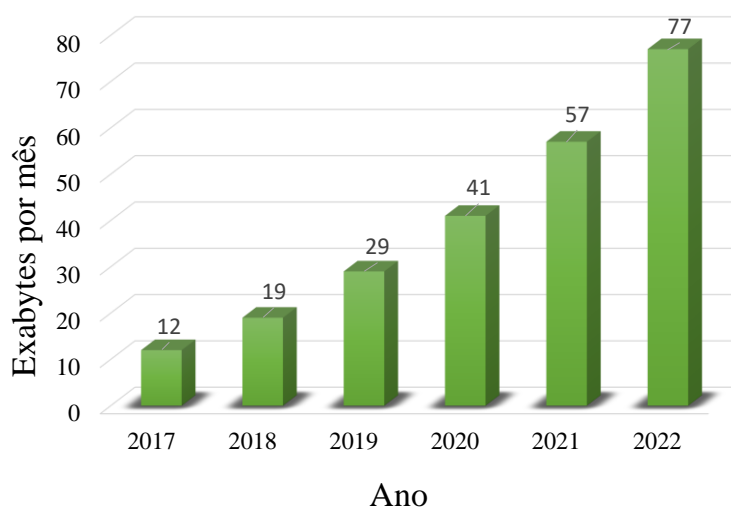
Este capítulo introdutório foi dividido em três partes. Inicialmente, serão apresentadas a motivação da pesquisa e a contextualização sobre as demandas e desafios das redes de telefonia móveis de quinta geração, incluindo os sistemas de comunicação por luz visível (VLC - *visible light communication*) baseado em diodos emissores de luz (LED - *light emitting diode*). Na sequência, diferentes tecnologias de comunicação óptica sem fio serão explanadas com destaque para evolução da tecnologia VLC. Por fim, serão mostradas as contribuições deste trabalho.

### 1.1 Motivação e Contextualização

O aumento do consumo de dados, juntamente com as exigências de alta confiabilidade, baixa latência e ubiquidade de cobertura, tem exigido cada vez mais dos atuais sistemas de telecomunicações. Estima-se que o tráfego de dados móveis atinja 77 Exabytes por mês até 2022 [1], o que representa um aumento anual de aproximadamente 45% a partir de 2017, conforme mostra a Figura 1. Esse forte crescimento é impulsionado, principalmente, pelo consumo massivo de dados exigidos pelas plataformas de *streaming* de alta qualidade como [2-4]: vídeo-chamadas, realidade aumentada, realidade virtual, filmes, séries e TV.

Para atender à crescente demanda de dados móveis, torna-se necessário adequar a infraestrutura dos sistemas de telecomunicações e/ou redesenhar as arquiteturas de rede já existentes. Pensando nisso, surgiu o conceito de quinta geração de telefonia móvel (5G– *fifth-generation mobile communication*) [3,4] que promete atender de

forma satisfatória os novos pré-requisitos de rede e aumentar a capacidade dos atuais sistemas de comunicação móvel, comumente chamado de quarta geração (4G – *fourth-generation mobile communication*), em até 1000 vezes [4]. A nova rede 5G visa atender os seguintes cenários [3-6]: baixa latência e alta confiabilidade (URLLC – *ultra-reliable low-latency communication*) para possibilitar cirurgias remotas, comunicações de veículos autônomos, controle de processos industriais, etc.; fluxo massivo e ininterrupto de dados na ordem de Gigabit por segundo por usuário (eMBB – *enhanced mobile broadband*) para assegurar os acessos a conteúdos multimídias de alta qualidade, vídeo-chamada, etc.; incorporação e suporte do enorme número previsto de dispositivos de IoT (mMTC – *massive machine-type communication*), desde os mais simples, como sensores e atuadores, até os mais complexos, como equipamentos médicos.



**Figura 1** – Estimativa de crescimento dos dados móveis [adaptado de [1]].

Um dos grandes desafios para atingir os pré-requisitos propostos pela rede 5G é a escassez do espectro de rádio frequência (RF – *radiofrequency*) para aumentar a vazão de dados e a incorporação de novos dispositivos à rede, uma vez que o espectro de RF, responsável pelo acesso dos dispositivos móveis, está cada dia mais congestionado [7-9]. Para contornar essa situação, a rede 5G prevê o uso mais eficiente do espectro de RF além da exploração de faixas de frequência acima de 20 GHz [3,4,10]. Entretanto, o custo de infraestrutura do sistema depende da frequência de operação, pois quanto maior a frequência, maior é o custo dos dispositivos de RF e menor é a área de cobertura por célula [7,9].

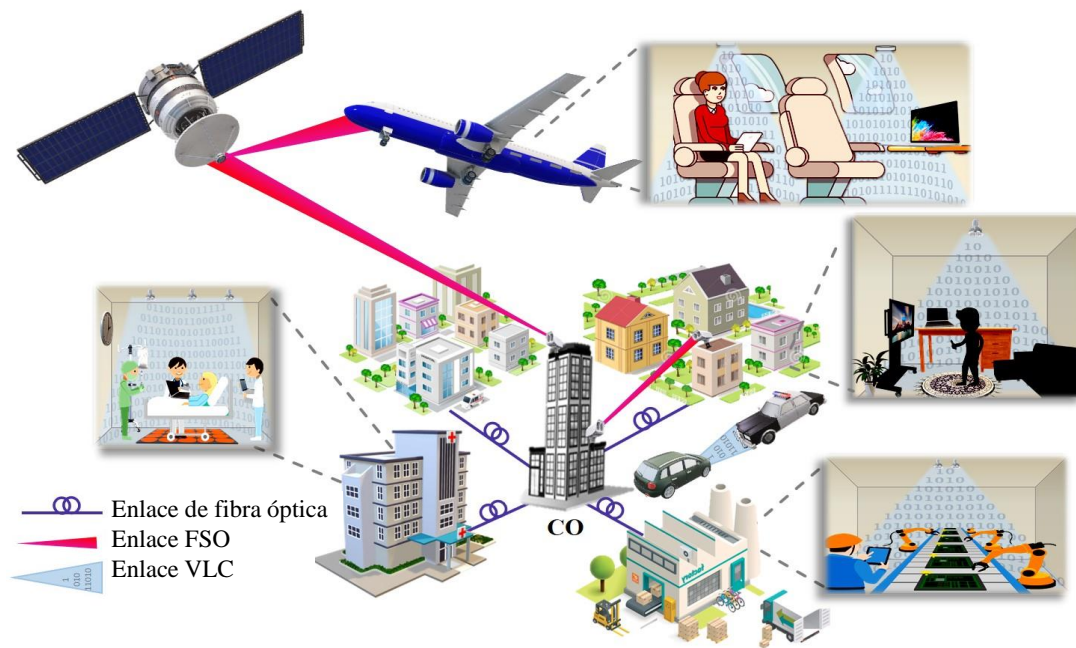
Buscando minimizar o impacto financeiro e garantir a ubiquidade do sinal, a rede 5G prevê a exploração de duas faixas de frequência distintas [11-13]: o FR1

(*frequency range 1*) para frequências de 450 MHz até 6 GHz, com maior cobertura e menor vazão de dados e o FR2 (*frequency range 2*) para frequências de 24,25 GHz até 52,2 GHz, com maior vazão de dados por usuário e menor cobertura. Estima-se que cerca de 90% do consumo de dados ocorrerá em ambientes internos (*indoor*) [14,15], como residências e escritórios, ou seja, em ambientes com as mesmas características previstas para o FR2. Esse tipo de ambiente é classificado pelas redes 5G como ponto de acesso em ambientes internos (*indoor hotspots*) [3].

A comunicação óptica sem fio (OWC – *optical wireless communication*) é uma alternativa aos tradicionais sistemas de RF para suprir as crescentes demandas de fluxo de dados sem abrir mão da mobilidade. Nesse tipo de comunicação, as informações são incorporadas no feixe de luz e, posteriormente, transmitidas no espaço livre. Algumas vantagens dos sistemas OWC em relação aos sistemas de RF são [7,16,17,18]: i) não exige licenciamento com os órgãos de regulamentação; ii) permite operação em áreas restritivas para comunicação de RF, como hospitais e aeronaves; iii) maior faixa de espectro disponível para exploração; iv) maior segurança contra espionagem, pois o confinamento do feixe de luz em um determinado ambiente impede a interceptação do mesmo; v) imunidade à interferência eletromagnética causadas pelas fontes de RF.

Entre as tecnologias OWC emergentes, destaca-se o sistema de comunicação sem fio por luz visível (VLC – *visible light communication*) que empregam diodos emissores de luz (LED - *light emitting diode*). A tecnologia VLC permite alcançar taxas de transmissão na ordem de Gigabits por segundo, utilizando dispositivos de baixo custo e com a possibilidade de utilizar a mesma fonte de iluminação do ambiente para transmitir dados [17-19]. Ademais, a divergência do feixe de luz permite cobrir uma determinada área por alguns poucos metros de distância. Essas peculiaridades tornam o uso dos LEDs oportuno para a transmissão de dados em ambientes internos, nos quais o transmissor está localizado relativamente próximo do receptor. Em virtude dessas características, os enlaces VLC baseados em LED representam uma atraente alternativa para suprir as demandas de dados e conectividade das redes 5G, principalmente em relação aos enlaces de RF previstos para operar na faixa FR2 e em áreas onde há restrição para transmissão de sinais de RF, como hospitais e aeronaves [20,21]. Além disso, o uso dessa tecnologia também é considerado promissor nas redes veiculares para comunicação entre veículos devido à presença cada vez maior de LEDs nos

automóveis [22]. A Figura 2 exibe alguns exemplos da versatilidade dos sistemas VLC baseados em LEDs para iluminação e transporte de dados simultaneamente.



**Figura 2** – Exemplos de aplicações de sistemas VLC.

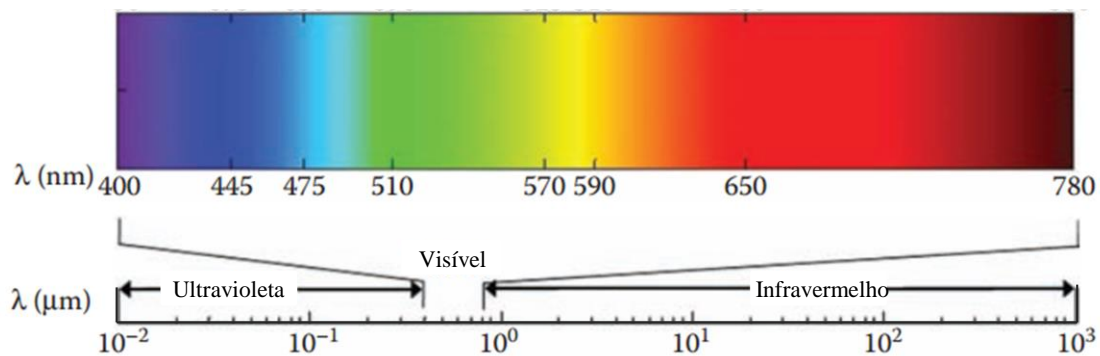
Na Figura 2, a central de serviço (CO – *central office*) distribui os dados para os diversos pontos de acesso, conhecidos também como *attocell* óptica [23]. As conexões entre a CO e as *attocell*, denominadas *fronthaul*, são representadas por enlaces de fibra óptica e enlaces ópticos no espaço livre (FSO – *free-space optical*). Assim como os enlaces de fibra óptica, os enlaces FSO propiciam transmissão em distâncias maiores que 10.000 km [24]. Entretanto, as atenuações provocadas pelas condições atmosféricas representam um grande desafio para a implementação desses enlaces, principalmente em longas distâncias [25,26]. Destaca-se também, na Figura 2, o sistema de comunicação por satélite considerado uma promissora solução para a transmissão do sinal 5G em áreas remotas e aeronaves [27].

Os sistemas VLC também podem atuar em conjunto com os sistemas de RF permitindo plena conectividade dos dispositivos móveis. Por exemplo, o *downlink* poderia ser realizado por feixes de luz, enquanto o *uplink* seria realizado por sistema de RF [18,23]. Essa integração reduziria a sobrecarga nos enlaces de RF permitindo o aumento da vazão de dados juntamente com a incorporação de novos dispositivos. Adicionalmente, os enlaces VLC podem atuar como redundância dos enlaces de RF para aumentar a confiabilidade das redes 5G e garantir ubiquidade de cobertura. Nesse

contexto, as operadoras de telefonia poderiam instalar suas próprias *attocell* ópticas em pontos estratégicos e/ou atuar como provedora de sinal 5G para *attocell* ópticas particulares. Desta forma, os sistemas VLC representam uma solução promissora para compor não somente a camada física das redes 5G, mas também as futuras gerações de telefonia móvel [20,28].

## 1.2 Revisão bibliográfica

O espectro dos sistemas OWC se estende do comprimento de onda ultravioleta (UV – *ultravioleta*) até o comprimento de onda infravermelho (IR – *infrared*) [17]. A Figura 3 mostra o espectro de luz correspondente aos comprimentos de onda UV e IR com destaque para o espectro visível ao olho humano.



**Figura 3** - Espectro de luz de UV até IR [16].

Os sistemas OWC recebem nomenclaturas diferentes de acordo com o tipo de aplicação e os tipos de componentes empregados [7]. Enlaces ponto-a-ponto em ambientes externos (*outdoor*) operando no comprimento de onda de IR são conhecidos como FSO. Esse tipo de comunicação utiliza laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) como fonte de luz para estabelecer comunicação em enlaces terrestres e/ou espaciais e, por conseguinte, seu desempenho está atrelado às condições atmosféricas [29]. Comunicações em ambientes internos (*indoor*) no comprimento de onda de IR são representadas em [21] como WIRC (*wireless infrared communications*). Tipicamente, em ambientes *indoor* utiliza LED como fonte de luz, mas é possível encontrar trabalhos recentes utilizando lasers no comprimento de IR com direcionamento do feixe para aplicação em ambientes *indoor*. De acordo com [18], esses sistemas são representados como BS-ILC (*beam-steered infrared light communication*).

Sistemas OWC, empregando LED ou laser, que operam no comprimento de onda de luz visível, são conhecidos como VLC. Conforme mencionado anteriormente, os LEDs podem ser utilizados em ambientes *indoor*, para iluminação e transmissão de dados simultaneamente [17]. A utilização de LEDs em ambiente *outdoor*, para prover dados, ainda é pouco difundida devido ao curto alcance dessas fontes. Contudo, encontra-se na literatura enlaces VLC *outdoor* com LED para aplicações de longa distância (distância maiores que 3 m para enlaces VLC baseado em LED) [30]. Para atender a este cenário, faz-se necessário um conjunto de lentes para tornar o feixe de luz do LEDs altamente diretivo [31], e/ou a fabricação de um tipo de LED específico para maximizar o desempenho do transmissor [30].

A Tabela 1 mostra algumas características dos principais tipos de sistemas OWC, comparando-os com o sistema rádio sobre fibra (RoF - *radio over fiber*), que utiliza fibra óptica para transportar o sinal de RF. Os valores de vazão e distância referem-se a apenas uma portadora óptica e foram levantados com base em publicações atuais publicadas até a data de elaboração deste trabalho. O valor de 10 Mbit/s, na Tabela 1, refere-se à mínima vazão de dados estabelecida pelo padrão em desenvolvimento IEEE 802.11bb [32].

**Tabela 1** - Comparação dos sistemas OWC com os sistemas RoF.

	VLC		WIRC	FSO	RoF
	Laser	LED	Laser	Laser	Laser
Comprimento de onda (nm)	400 - 700	400 - 700	1530 - 1565 [33]	780 - 850 e 1520 -1600 [29]	Bandas S, L e C
Vazão (Gbit/s)	0,01 – 10,5 [34]	0,01 – 10 [35]	0,01 – 112 [33]	0,01 - 320 [36]	295 [37]
Distância (m)	0,3 – 50+	0,3 - 20 [35]	0,3 - 3,4 [33]	50 - 10000+	100 - 10000+
Protocolos de acesso	não	sim	não	não	não
Impacto do alinhamento	crítico	pequeno	crítico	crítico	não se aplica

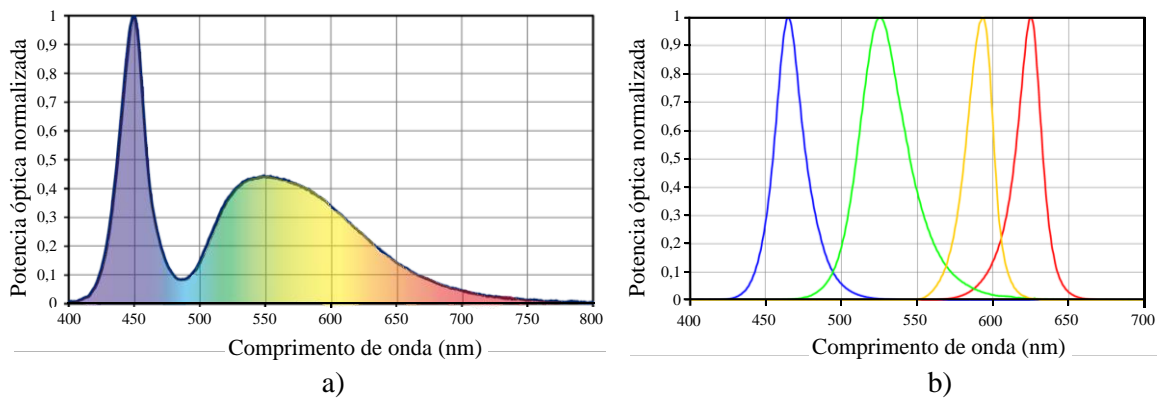
O sistema de comunicação VLC empregando LED como fonte de luz iniciou-se no Japão, com o consórcio de comunicação de luz visível (VLCC - *Visible Light Communications Consortium*) e tem se espalhado pelo mundo graças à popularização dos diodos emissores de luz [17,38]. Em comparação com outras fontes de luzes artificiais, como as lâmpadas incandescentes e fluorescentes, os LEDs apresentam maior durabilidade e eficiência luminosa. Ou seja, além de durarem mais, gastam menos energia para gerar o mesmo fluxo luminoso, apresentando vantagens que impulsionam o uso dos LED em iluminação de ambientes [39]. Além disso, os LEDs são compatíveis com a tecnologia PLC (*power line communication*) que faz uso da infraestrutura de energia elétrica para transporte de dados e alimentação do dispositivo simultaneamente [40].

O principal fator limitante da vazão de dados nos sistemas VLC é a largura de faixa disponível para modulação da fonte transmissora [41,42]. A maioria dos LEDs brancos comercializados é na verdade LEDs azuis dopados com fósforo. Essa dopagem permite a emissão de luzes em outros comprimentos de onda visíveis, gerando assim a luz branca [41,43]. Entretanto, o decaimento lento do fósforo impede o aumento da frequência de operação, limitando a largura de faixa disponível e, por conseguinte, a vazão de dados. Filtros podem ser utilizados na recepção para diminuir os efeitos causados pela dopagem do LED com fósforo [39,41]. Também é possível combinar LEDs de diferentes cores (emissão de luz em diferentes comprimentos de onda) para gerar a luz branca. Esse conjunto de LEDs é comercializado tipicamente como LED RGB (*red green blue*) e/ou LED RGBA (*red green blue and ambar*). Apesar de mais custosos, os LEDs RGB/RGBA dispõem de maior largura de faixa para modulação, pois suas estruturas são desprovidas de fósforo. Além disso, pode-se modular separadamente cada comprimento para aumentar a vazão de dados [38,44]. A Figura 4 ilustra a representação típica da potência óptica normalizada emitida em função do comprimento de onda para dois diferentes tipos de LEDs comerciais: (a) LED branco Engin LZ1-00CW02 [45], (b) LED RGBA Engin LZ4-00MA00 [46].

Nota-se, na Figura 4 (a), um pico de potência referente ao comprimento de onda de cor azul e emissões em outros comprimentos de onda provocadas pela dopagem do LED com fósforo, enquanto que na Figura 4 (b), quatro LEDs distintos (com emissões em diferentes comprimentos de onda) se combinam para formar a luz branca. Há também LEDs desenvolvidos, especificamente, para melhorar o desempenho dos



enlaces VLC, como é o caso do micro LED baseado em nitreto de gálio (GaN), encontrado em [30].



**Figura 4** - Potência óptica normalizada emitida em função do comprimento de onda: a) LED branco [adaptado de [45]]; b) LED RGBA [adaptado de [46]].

Algumas estratégias são adotadas para aumentar a vazão de dados nos enlaces VLC *indoor* baseados em LEDs comerciais. Entre elas podemos citar [41]: emprego de filtros para eliminar a emissão de luz indesejada causada pela dopagem do LED; uso de equalização no transmissor para aumentar a largura de faixa dos LEDs; equalização no receptor feita para compensar a degradação do sinal causada pelo canal; aumento do número de bits enviados por Hz, ou seja, utilização de ordem de modulação mais elevada; multiplexação de comprimentos de ondas (WDM – *wavelength-division multiplexing*); utilização de sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO - *multiple-input multiple-output*).

É possível observar a evolução dos sistemas VLC *indoor* baseados em LED comerciais em diversos trabalhos na literatura. Em 2008, Le Minh *et al.* [47] publicaram os resultados de um experimento VLC com vazão de 80 Mbit/s em uma distância de 40 cm, por meio da codificação OOK (*on-off keying*) e utilizando um sistema de pré-equalização. Huang *et al.* (2015) [42] alcançaram 750 Mbit/s em uma distância de 2,5 m utilizando um LED vermelho modulado em 64-QAM (*quadrature and amplitude modulation*) com OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*) e utilizando um circuito de pré-equalização. O trabalho de Jiang *et al.* publicado em 2015 [48] apresenta resultados numéricos e experimentais da interferência entre as *attocells* ópticas adjacentes na transmissão de vídeo de alta qualidade para terminais móveis. Nesse trabalho, compararam-se três diferentes técnicas de transmissão: UFR (*unity frequency reuse*), HFRFT (*highler frequency reuse fator based*) e VT (*vectored transmission*).

Constatou-se que técnica VT teve melhor desempenho em termos de vazão, consumo de energia, atraso e degradação do pico de SNR (*signal-to-noise ratio*).

Em 2016, Cui *et al.* [49] reportaram um trabalho experimental de um enlace com 5,2 Gbit/s em 30 cm de distância, multiplexando 12 comprimentos de onda codificados em OOK. No mesmo ano, Wang *et al.* [44] publicaram um trabalho experimental empregando a modulação SEFDM (*spectrally efficient frequency division multiplexing*) em conjunto com a técnica de processamento de sinais para sistemas MIMO. Nesse trabalho, alcançou-se uma vazão de 2,4 Gbit/s em 2,5 m multiplexando três comprimentos de onda. Em 2017, Sifaou *et al.* [50] demonstram numericamente os benefícios, em termos de SINR (*signal-to-interference-plus-noise ratio*), do uso de técnicas de pré-codificação e de receptores com diversos ângulos aplicados a sistemas com múltiplos usuários MIMO. O trabalho de Vs *et al.* [51], publicado em 2018, demonstrou, experimentalmente, a implementação conjunta das técnicas WDM e MIMO para transmissão de sequência de dados moduladas em DTM (*discrete multi-tone*). Ainda em 2018, Mejia *et al.* [52] apresentaram uma visão geral da modulação por variação de intensidade de cores (CSK - *color-shift-keying*) baseada em LED RGB. Diferentes métodos de codificação foram analisados numericamente com destaque para as codificações CSK TCM (*trellis-coded modulation*) e CSK FSM (*finite-state-machines*), que apresentaram maior SNR. Por fim, em 2019, pesquisadores da Universidade de Londrina publicaram um trabalho experimental utilizando as técnicas de pré-distorção digital (DPD – *digital predistortion*) e pré-equalização para mitigar os efeitos não lineares degradantes dos sistemas VLC [53].

No contexto de sistemas VLC aplicados às redes 5G, encontram-se os trabalhos dos seguintes pesquisadores: Chou *et al.* [54], Na *et al.* [55], Baig *et al.* [56], Shi *et al.* [57], Vegni *et al.* [58], Wei *et al.* [59], Valluri *et al.* [60] e, por fim, Monteiro *et al.* [61]. A Tabela 2 exibe em ordem cronológica e de maneira concisa, as principais contribuições de cada um desses trabalhos.

**Tabela 2** – Revisão bibliográfica dos sistemas VLC aplicados às redes 5G.

Referência	Tipo de Trabalho	Ano	Principais contribuições	Fonte transmissora	Máxima Vazão	Distância
[54]	Experimental	2016	Implementação e análises dos formatos de onda 4-PAM ( <i>pulse-amplitude modulation</i> ), 8-PSK ( <i>phase-shift keying</i> ) e 16-QAM.	LED com micro monitor de cristal líquido	892 Mbit/s	0,65 m
[55]	Numérico	2018	Análise de desempenho da forma de onda ADC-OFDM ( <i>asymmetrically clipped DC biased optical OFDM</i> ) em um sistema baseado em duas fontes radiantes.	LED	Não se aplica	Não se aplica
[56]	Numérico	2018	Análise de desempenho do formato de onda DWT-OFDM ( <i>discrete wavelet transform OFDM</i> ) para aplicação conjunta das tecnologias PLC e VLC.	LED	Não se aplica	Não se aplica
[57]	Experimental	2018	Implementação do sinal 5G NR ( <i>new radio</i> ).	LED	14,4 Mbit/s	0,55 m
[58]	Numérico	2019	Otimização do número de <i>attocell</i> óptica de acordo com a quantidade de usuário e a vazão requerida.	LED	Não se aplica	Não se aplica
[59]	Experimental	2019	Vazão de dados na ordem de 40,665 Gbit/s por meio de seis lasers em três comprimentos de onda distintos.	Laser	40,665 Gbit/s	2 m
[60]	Experimental	2020	Redução da potência média de pico da forma de onda DCO-OFDM ( <i>DC-biased optical OFDM</i> ) por meio do algoritmo de estimativa de canal.	LED	Não se aplica	1 m
[61]	Experimental	2020	Análise de desempenho dos formatos de onda OFDM, GFDM ( <i>generalized frequency division multiplexing</i> ) e FBMC ( <i>filter bank multi carrier</i> ).	LED	9,94 Mbit/s	2 m

## 1.3 Contribuições

As principais contribuições desta dissertação são:

- Implementação do sinal 5G NR em um sistema VLC WDM com equalização na recepção para compensar a resposta em frequência do LED;
- Utilização da técnica de DPD para compensar os efeitos não lineares dos amplificadores elétricos empregados no sistema VLC WDM;
- Análise do compartilhamento da *attocell* óptica por diferentes tecnologias e a utilização da técnica de agregação de portadoras em sistemas VLC.

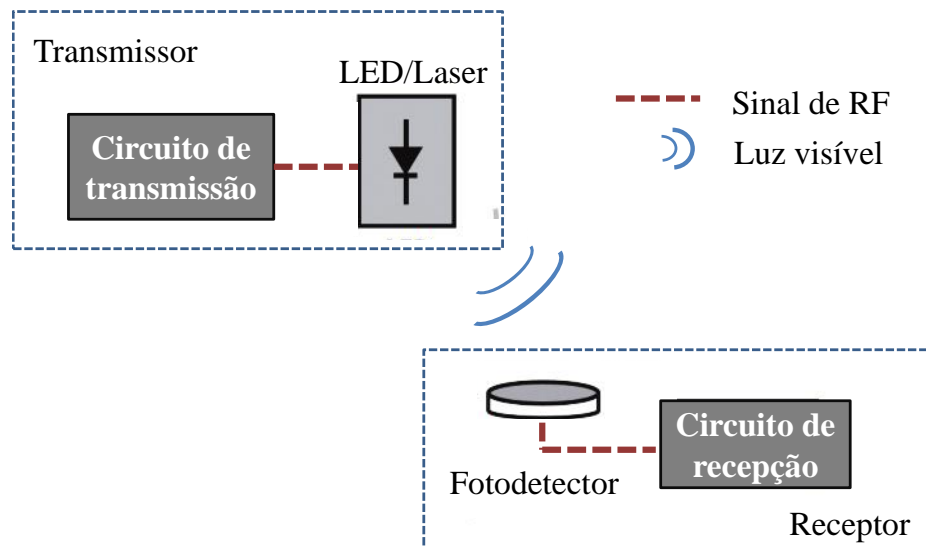
# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

Este capítulo de fundamentos teóricos foi dividido em três partes. Inicialmente, os sistemas VLC serão apresentados, assim como as principais características dos componentes de transmissão e recepção. Na sequência, o cálculo da perda de propagação no canal VLC, em visada direta, será apresentado tomando-se como ponto de partida a equação de Friss. Por fim, será abordada a estrutura do sinal 5G NR de acordo com o Release 15 do 3GPP (*3<sup>th</sup> Generation Partnership Project*).

### 2.1 Sistemas VLC

O espectro de luz visível se estende de 400 a 700 nm, perfazendo aproximadamente 320 THz de largura de faixa para exploração dos sistemas VLC [18]. Ao longo desta faixa espectral óptica, a transmissão do feixe de luz pode ser realizada via LED ou laser. Em comunicações OWC, os lasers são tipicamente utilizados em enlaces ponto-a-ponto e permitem distância e vazão de dados maiores do que os LEDs. Em contrapartida, os lasers são mais caros e demandam um alinhamento preciso entre o transmissor e o receptor [62]. Os LEDs, por outro lado, podem cobrir maiores áreas possibilitando a implementação das topologias de rede ponto-multiponto [62]. Para transmissão no espaço livre, as informações geradas no domínio elétrico são inseridas diretamente na portadora óptica que transporta as informações até os receptores. Para transmissão no espaço livre, a portadora óptica é modulada com os sinais de RF e, em seguida, transporta as informações até os receptores. Na recepção, convertem-se novamente as informações para o domínio elétrico utilizando fotodetectores. A Figura 5 ilustra um sistema VLC simplificado.



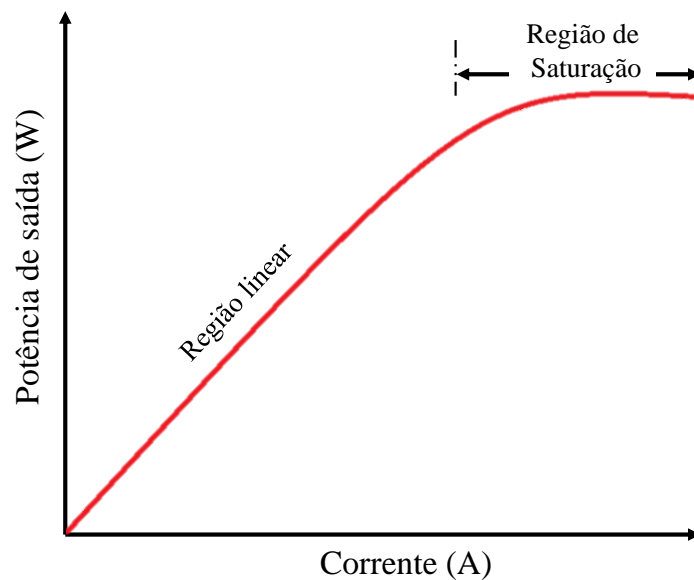
**Figura 5** - Ilustração do sistema VLC [63].

Os sistemas VLC são considerados potenciais candidatos para a comunicação em ambientes restritivos, como: hospitais, laboratórios e aviões por que não causam interferências em equipamentos sensíveis a sinais de RF. Além disso, por meio da tecnologia PLC é possível fazer uso da capilaridade das redes elétricas para o transporte de dados até os pontos de acesso VLC, viabilizando assim, uma melhor cobertura. As características dos componentes do sistema VLC baseado em LED, bem como a estimativa da SNR e a modelagem do canal VLC *indoor* com visada direta são descritas ao longo da seção 2.1.

### 2.1.1 LEDs e Transmissão de Dados

Os LEDs são semicondutores de junção *p-n* (*positive-negative*) que emitem luz quando excitados por uma fonte eletrônica [63,64]. Esse processo é descrito microscopicamente da seguinte forma: a energia fornecida pela fonte eleva o nível de energia dos elétrons que constituem o material do LED para um nível de energia instável e quando os elétrons retornam para o seu nível de energia original ocorre a emissão espontânea de energia na forma de fótons. No processo de recombinação de elétrons e lacunas, a energia não irradiada é transformada em calor, por meio da vibração mecânica na rede do material. Comparado com outras fontes de luzes artificiais (incandescente e fluorescente), os LED possuem alta eficiência luminosa, pois na conversão de potência elétrica em potência óptica pouco calor é gerado.

A potência óptica gerada por um LED varia linearmente com a corrente injetada na junção  $p-n$  até um determinado valor. A partir desse ponto, ocorre a saturação do dispositivo devido à geração de calor causada pelo aumento das recombinações elétrons-lacunas não irradiativas. Em consequência, a resposta do LED deixa de ser linear e a eficiência luminosa é reduzida [65]. A Figura 6 mostra a curva característica da potência óptica gerada pela corrente elétrica injetada, em concordância com [63]. Nessa Figura, é possível observar as duas regiões de operação do LED: a região linear e a região de saturação. A corrente elétrica mínima para o início da emissão de potência óptica depende dos materiais semicondutores que constituem o LED e da temperatura de operação do dispositivo [66].



**Figura 6** - Curva de desempenho da potência óptica de saída e corrente de excitação [adaptado de [63]].

O comprimento de onda de irradiação dos fótons também depende do tipo de material do LED. Um exemplo é o pico de emissão de fótons do material fosfeto de gálio (GaP), que ocorre em 470 nm, enquanto que, para o arsenieto de gálio (GaAs), esse pico é em torno de 910 nm [63]. Essa emissão ocorre aleatoriamente sem correlação de fase entre os diferentes fótons, razão pela qual os LEDs são chamados de fonte de luz incoerente [63].

Um importante parâmetro na análise de desempenho do LED consiste na eficiência luminosa desse dispositivo, ou seja, a potência óptica, visível ao olho humano, gerada a partir da potência elétrica consumida. Para o cálculo da eficiência luminosa, faz-se necessária a compreensão de outros conceitos de eficiência,

incluindo [64]: eficiência quântica interna, eficiência quântica externa e eficiência de potência.

A eficiência quântica interna relaciona o número de fótons gerados ( $N_{in}$ ) a partir do número de elétrons que atravessam a junção  $p-n$  ( $N_j$ ). Essa eficiência pode ser calculada pela razão entre a taxa de recombinação dos pares elétrons-lacunas, que geram irradiação pela taxa total de recombinação, ou ainda, em função do tempo de duração das recombinações dos pares, conforme [64]

$$\eta_{in} = \frac{N_{in}}{N_j} = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} = \frac{\tau_r}{\tau_r + \tau_{nr}}, \quad (2.1)$$

onde  $R_r$  e  $R_{nr}$  são as taxas de recombinação dos pares elétrons-lacunas que geram e não geram irradiação, respectivamente, e  $\tau_r$  e  $\tau_{nr}$  são seus respectivos tempos de duração. O número total de recombinações por segundo é igual à corrente elétrica ( $I$ ) que atravessa a junção sobre a carga elétrica elementar ( $q$ ), ou seja,

$$R_r + R_{nr} = \frac{I}{q}. \quad (2.2)$$

Substituindo (2.2) em (2.1) tem-se  $R_r = \eta_{in} I/q$ . A energia irradiada de cada fóton é definida como  $hf$ , onde  $h$  é a constante de Plank e  $f$  a frequência de irradiação. Dessa forma, pode-se definir a potência óptica interna como [67]

$$P_{in} = R_r hf = \eta_{in} \frac{I}{q} hf. \quad (2.3)$$

A eficiência quântica externa ( $\eta_{ex}$ ) leva em consideração apenas os fótons emitidos externamente, ou seja, desconsidera os fótons que não são emitidos para o ambiente, e por isso está sujeita a eficiência óptica ( $\eta_t$ ) do LED. A  $\eta_{ex}$  pode ser calculada por

$$\eta_{ex} = \frac{N_{ex}}{N_j} = \eta_{in} \eta_t, \quad (2.4)$$

onde  $N_{ex}$  é o número de fótons emitidos externamente.

A eficiência óptica do LED depende do índice de refração do dispositivo, do índice de refração do ambiente e do ângulo crítico de emissão interno [64]. Com base em (2.3) e (2.4) é possível calcular a potência externa irradiada como



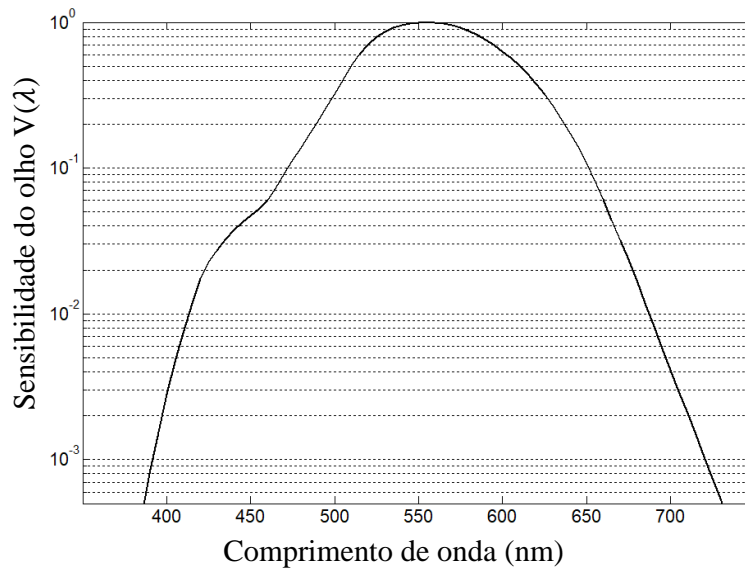
$$P_{\text{ex}} = \eta_{\text{ex}} \frac{I}{q} hf. \quad (2.5)$$

A eficiência de potência do LED ( $\eta_p$ ) é a razão entre a potência óptica que sai do dispositivo ( $P_{\text{ex}}$ ) pela potência elétrica que entra no mesmo ( $P_{\text{ele}}$ ), ou seja, [64]

$$\eta_p = \frac{P_{\text{ex}}}{P_{\text{ele}}} = \frac{\eta_{\text{ex}} \frac{I}{q} hf}{IV} = \eta_{\text{ex}} \frac{hf}{qV}. \quad (2.6)$$

Considerando que a energia do fóton é igual à  $qV$ , tem-se que  $\eta_p \approx \eta_{\text{ex}}$ .

Para o cálculo da eficiência luminosa é necessário conhecer o fluxo luminoso emitido pelo LED. Essa variável leva em consideração a sensibilidade do olho humano para determinadas cores e a potência óptica emitida em função do comprimento de onda. A Figura 7 mostra a função sensibilidade do olho humano em relação ao comprimento de onda, normalizada no valor de pico de 555 nm [63]. O fluxo luminoso em lumens é dado por



**Figura 7** - Função sensibilidade do olho normalizada em função do comprimento de onda [66].

$$F = 683 \int L(\lambda) P_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda, \quad (2.7)$$

onde  $L(\lambda)$  é a função sensibilidade do olho, mostrada na Figura 7. Por fim, a eficiência luminosa ( $\eta_{\text{lu}}$ ) pode ser calculada como [64]

$$\eta_{\text{lu}} = \frac{683 \int L(\lambda) P_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda}{IV} \quad [\text{lm} / \text{W}]. \quad (2.8)$$

Os avanços tecnológicos possibilitaram o aumento da eficiência luminosa dos LEDs nas últimas décadas. Atualmente, a eficiência luminosa dos LEDs brancos comerciais pode atingir valores de 200 lm/W contra 18 lm/W e 95 lm/W das lâmpadas incandescentes e fluorescentes, respectivamente [68].

No contexto de comunicações ópticas, conhecer a resposta em frequência dos LEDs é de suma importância, uma vez que, por meio desse parâmetro, é possível definir a largura de faixa dos LEDs e, por conseguinte, a máxima vazão de dados. Os principais fatores que influenciam na resposta em frequência do LED são o nível de dopagem da junção *p-n*, o tempo de recombinação dos portadores na região ativa e as capacitâncias parasitas da junção [67,69]. Um sinal DC (*direct current*) pode ser acoplado ao sinal AC (*alternating current*), por meio de um combinador de sinais, para mitigar os efeitos das capacitâncias. Consequentemente, a resposta em frequência do LED é limitada apenas pelo tempo de recombinação dos pares elétrons-lacunas ( $\tau$ ), dado por [67,69]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}. \quad (2.9)$$

A Equação (2.10) mostra a função de transferência do LED  $H(\omega)$  [65]:

$$H(\omega) = \frac{P(\omega)}{P(0)} = \frac{1}{1 + i\omega\tau}, \quad (2.10)$$

onde  $P(0)$  é potência óptica emitida pelo LED alimentando-o com um sinal DC e  $P(\omega)$  é a potência óptica emitida pelo LED alimentando esse dispositivo com um sinal de RF na frequência angular  $\omega$ . A frequência de corte óptica ( $f_{op}$ ) pode ser calculada igualando o módulo de  $H(\omega)$  a  $1/2$ , logo [65]:

$$f_{op} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau}. \quad (2.11)$$

Para encontrar a frequência de corte elétrica ( $f_{el}$ ) é preciso igualar  $|H(\omega)|$  a  $1/\sqrt{2}$ , visto que a potência óptica varia linearmente com a corrente (até um determinado ponto) e que a potência elétrica depende da corrente elétrica ao quadrado. Desta forma pode-se calcular  $f_{el}$  por meio de [65]:

$$f_{el} = \frac{1}{2\pi\tau}. \quad (2.12)$$

Nota-se que para estender a largura de faixa dos LEDs torna-se necessário reduzir o tempo de recombinação na região ativa desses semicondutores. Uma solução é

aumentar o nível de dopagem na região. Entretanto, esse aumento também implica na elevação de  $\tau_{nr}$ , acarretando na diminuição da eficiência quântica interna (Equação (2.1)) que, conseqüentemente, reduz a eficiência luminosa [64,65]. Essas dependências evidenciam uma relação de compromisso entre largura de faixa e eficiência luminosa do LED.

## 2.1.2 Conversores Eletro-Ópticos

Os fotodetectores realizam a captação e a conversão óptica elétrica (O/E) dos feixes de luzes que chegam à recepção. Para que o processo de conversão O/E ocorra de forma adequada é necessário que os fotodetectores atendam aos seguintes pré-requisitos: ter alta capacidade de conversão O/E (responsividade), apresentar baixa adição de ruído no sinal convertido, possuir largura de banda suficiente para suportar o aumento da vazão de dados, e ser indiferente à variação de temperatura. Os tipos de fotodetectores que atendem simultaneamente a todos os pré-requisitos citados são os fotodetectores de junção *p-n*, conhecidos como fotodiodos [65,67]. Esses componentes ópticos podem ser divididos em duas classes: os fotodiodos PIN (*positive-intrinsic-negative*) e os fotodiodos APD (*avalanche photodiode*).

Os fotodiodos PIN são fotodetectores de material semiconductor com a junção *p-n* separada por uma região intrínseca (*i*), praticamente desprovida de portadores livres. Em condição normal de funcionamento, um forte campo elétrico é aplicado ao dispositivo por meio de uma tensão de polarização. Quando a energia dos fótons incidentes na região *i* for maior que a energia necessária para elevar o nível de energia do elétron da camada de valência para a banda de condução (energia de *bandgap*), haverá um fluxo de corrente elétrica [65,67]. Essa corrente é conhecida como fotocorrente ( $I_f$ ) e pode ser calculada por [67]

$$I_f = \frac{q}{hf} P_{rec}(1 - e^{-\alpha W})(1 - \Gamma), \quad (2.13)$$

onde a  $P_{rec}$  é a potência óptica que incide no fotodiodo,  $\alpha$  o coeficiente de absorção óptico do material,  $W$  a largura da região intrínseca do material semiconductor e  $\Gamma$  é o coeficiente de reflexão entre o ar e a face do dispositivo. Considerando  $\alpha W \gg 1$  e uma superfície antirreflexo no fotodiodo, a fotocorrente  $I_f$  fica dependente apenas de  $P_{rec}$  e da frequência de irradiação dos fótons. O valor de  $\alpha$  depende das características da

composição do material semiconductor utilizado e varia com o comprimento de onda dos fótons [67].

A eficiência quântica do fotodiodo é definida em função do número de pares elétrons-lacunas gerados ( $N_{el}$ ) pelo número de fótons incidente ( $N_f$ ), e pode ser calculada por [67]

$$\eta_f = \frac{N_{el}}{N_f} = \frac{I_f/q}{P_{rec}/hf}. \quad (2.14)$$

Das Equações (2.13) e (2.14) pode-se definir  $\eta_f$  como sendo

$$\eta_f = (1 - e^{-\alpha W})(1 - \Gamma). \quad (2.15)$$

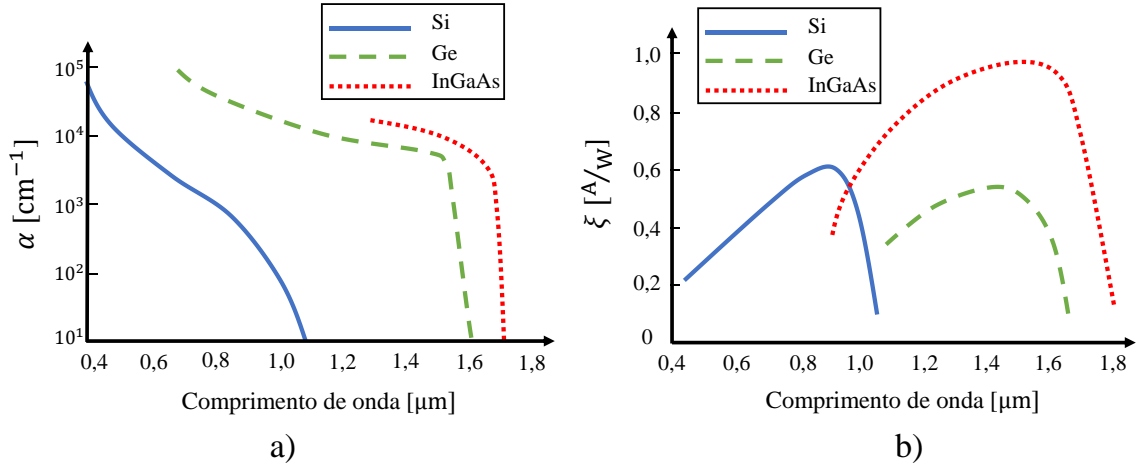
Um importante parâmetro para avaliar o desempenho do fotodiodo é a responsividade ( $\xi$ ). Por meio de  $\xi$  é possível definir o valor da fotocorrente gerada a partir de  $P_{rec}$ . A Equação (2.16) mostra essa relação [67]

$$\xi = \frac{I_f}{P_{rec}} = \eta_f \frac{q}{hf} (1 - \Gamma) \quad [A / W]. \quad (2.16)$$

Substituindo a frequência de irradiação pela velocidade da luz sobre o comprimento de onda ( $c/\lambda$ ) e as constantes  $h$ ,  $q$  e  $c$  pelos seus respectivos valores, pode-se calcular a responsividade do fotodiodo, para uma superfície antirreflexo, como [67]

$$\xi = \frac{\lambda [\mu m]}{1,24} \eta_f. \quad (2.17)$$

A equação (2.17) mostra que a responsividade é diretamente proporcional ao comprimento de onda. Entretanto, essa proporcionalidade não se mantém indefinidamente, uma vez que a energia do fóton decresce com  $\lambda$ . Caso a energia do fóton seja insuficiente para excitar o elétron para a banda de condução, o fotodiodo não irá responder ao estímulo de luz e, nesse momento, a  $\eta_f$  cairá a zero. A variável que relaciona  $\eta_f$  e  $\lambda$  é o coeficiente de absorção óptica do material e seu comportamento pode ser observado na Figura 8 (a) para três diferentes tipos de materiais empregados na construção de fotodiodos [65]. Observa-se na Figura 8 (a), que o  $\alpha$  limita o intervalo de  $\lambda$  em que o material pode operar. A Figura 8 (b) mostra a curva de responsividade em função do comprimento de onda para diferentes semicondutores.



**Figura 8** - Característica de três diferentes tipos de materiais de fotodiodo em função do comprimento de onda: a) coeficiente de absorção óptico; b) responsividade.

Nota-se que a responsividade cresce com o comprimento de onda até um determinado valor de  $\lambda$  e, a partir desse valor, cai bruscamente. O comprimento de onda que torna  $\alpha$  igual a zero é conhecido como comprimento de onda de corte e pode ser calculado por [67]

$$\lambda_c = \frac{1,24}{E_g}, \quad (2.18)$$

onde  $E_g$  é a energia necessária para elevar o nível de energia do elétron da camada de valência para a banda de condução (energia de *bandgap*). Essa energia depende do tipo de material utilizado na fabricação do fotodiodo [67]. Tipicamente, utilizam-se fotodiodos de silício (Si) para os comprimentos de onda entre 380 e 1000 nm, e para os comprimentos de onda acima de 1000 nm, utilizam-se fotodiodos de arseneto de gálio e índio (InGaAs) [29]. Os fotodiodos de germânio (Ge) são pouco utilizados devido ao alto nível de corrente escura gerada por esse material [29]. Economicamente, os fotodetectores de Si são mais acessíveis que os de InGaAs, entretanto apresentam pior conversão O/E [62].

Outro importante parâmetro para avaliar o desempenho dos fotodiodos é o tempo de resposta de dispositivo, ou seja, a velocidade que o fotodiodo responde à variação de potência óptica incidente. A frequência de corte do fotodiodo pode ser calculada por [65]

$$f_{fo} = \frac{1}{2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})}, \quad (2.19)$$

onde  $\tau_{tr}$  é o tempo de trânsito dos portadores na região de depleção e  $\tau_{RC}$  é a constante de tempo resistiva-capacitiva associada ao fotodiodo.

Para melhorar o desempenho do receptor faz-se necessário reduzir  $\tau_{RC}$  e/ou  $\tau_{tr}$ . O valor de  $\tau_{RC}$  pode ser reduzido com a diminuição do valor da capacitância de junção e, para isso é necessário reduzir a área de captação do fotodiodo, o que impacta diretamente na redução de  $P_{rec}$ . Já o valor de  $\tau_{tr}$  é diretamente proporcional a  $W$ , ou seja, para reduzir  $\tau_{tr}$  é necessário diminuir a largura da região intrínseca do material semiconductor. Por outro lado, essa redução provoca a diminuição da  $\eta_f$ . Essas dependências evidenciam a relação de compromisso entre  $f_{fo}$  e  $\xi$ , e devem ser consideradas nos projetos dos fotodiodos [65].

Os fotodiodos tipo APD se diferenciam dos fotodiodos tipo PIN devido ao ganho de corrente interna desse dispositivo. Nesse processo, os pares elétrons-lacunas contribuem para geração de outros novos pares elétrons-lacuna, criando um efeito avalanche [67]. O fenômeno físico associado a esse processo é conhecido como ionização por impacto [65]. O ganho de corrente ( $M$ ) possibilita maior sensibilidade em relação ao fotodiodo PIN, isto é, permite que sinais irradiados com baixa intensidade sejam detectados. Dessa forma a corrente de saída é por

$$I_M = MI, \quad (2.20)$$

onde  $I$  é a corrente gerada sem o ganho de corrente e pode ser igualada a fotocorrente do PIN. A responsividade do APD pode ser calculada substituindo (2.20) em (2.16), resultando em

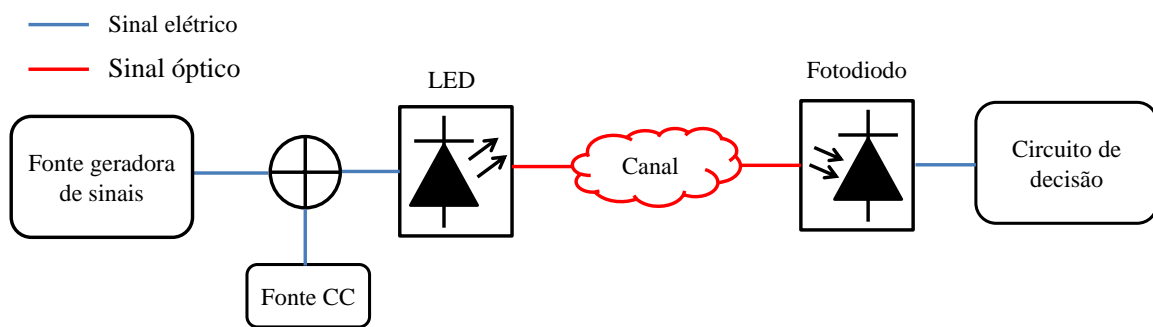
$$\xi_{APD} = M\xi. \quad (2.21)$$

Tipicamente, os valores de  $M$  variam de 50 a 300; possibilitando  $\xi_{APD} > 1$  [63]. Apesar de propiciar um ganho de corrente, esse processo é intrinsicamente ruidoso. Adicionalmente, o ganho de corrente diminui com o aumento da frequência e varia com a temperatura [65,67].

### 2.1.3 Modulação por Intensidade e Detecção Direta

As informações podem ser incorporadas à portadora óptica por meio da modulação por intensidade (IM – *intensity modulation*). Nesse processo, o sinal de RF modula diretamente a portadora óptica variando a geração de fótons por segundo da portadora óptica [70]. As informações transmitidas podem ser convertidas novamente

para o domínio elétrico por meio da técnica de detecção direta (DD – *direct detection*). Nesse processo, as informações são interpretadas pela variação da intensidade da potência óptica que chega ao fotodiodo [70]. Devido à simplicidade e ao baixo custo, as técnicas de IM e DD são os métodos mais populares de modulação e detecção em comunicações ópticas [70,71]. A Figura 9 mostra o diagrama em blocos de um sistema simplificado de comunicação óptica com IM-DD. No diagrama, é possível notar o sinal de RF somado com um sinal de corrente contínua (CC) alimentando diretamente a fonte de luz. Na recepção, o fotodiodo converte diretamente as informações para domínio elétrico, por meio da variação de intensidade de potência óptica.



**Figura 9-** Diagrama em blocos do sistema de comunicação óptica com modulação e detecção direta.

#### 2.1.4 Fontes de Ruído

Conhecer e quantificar as fontes de ruído é importante para determinar a mínima potência óptica detectável nos receptores, isto é, a sensibilidade dos mesmos [67]. A relação entre a potência do sinal recebido e a potência do ruído é definida como SNR e, em um sistema digital, quanto maior for essa relação menor será a taxa de erro de bits BER (*bit error rate*), desde que não haja outros fatores degradantes da BER [67].

O ruído no fotodetector provoca a flutuação da corrente fotodetectada mesmo quando a potência óptica incidente é constante. As principais fontes de ruído no fotodiodo são [65]: ruído térmico e ruído de disparo (*noise shot*). O ruído térmico ocorre em virtude da agitação térmica aleatória dos elétrons em um resistor de carga. Esse ruído provoca a flutuação da corrente elétrica, mesmo na ausência de tensão. A variância do ruído térmico possui distribuição Gaussiana e pode ser calculado por [65,67]

$$\sigma_T^2 = \frac{4kTB}{R_L} \quad (2.22)$$

onde:  $B$  é a banda do receptor,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura absoluta e  $R_L$  é a resistência de carga.

Já o ruído de disparo, também conhecido como ruído quântico, advém do processo de conversão dos fótons em elétrons e pode ser desmembrado em duas partes. A primeira parcela resulta da potência óptica incidente no fotodetector, enquanto a segunda resulta da circulação de corrente no fotodiodo, mesmo quando não há incidência de fótons, e essa corrente é chamada de corrente escura (*dark current*) [72]. O ruído de disparo também possui distribuição Gaussiana e, para um fotodiodo PIN, a variância desse ruído pode ser calculada por

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = \sigma_{\text{light}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 = 2qB(\xi P_{\text{rec}} + I_d), \quad (2.23)$$

onde  $\sigma_{\text{light}}^2$  é variância da parcela referente à potência óptica incidente,  $\sigma_{\text{dark}}^2$  é a variância da parcela referente à corrente escura,  $q$  é a carga elementar do elétron,  $I_d$  é a corrente escura e  $P_{\text{rec}}$  é potência óptica incidente no PIN [67,72].

Por meio da variância total da média quadrática da corrente no receptor é possível encontrar a SNR do sistema de comunicação óptico, sem amplificação. A Equação (2.24) mostra essa relação:

$$\text{SNR} = \frac{(P_{\text{rec}}\xi)^2}{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_T^2}. \quad (2.24)$$

Quando há estágios de amplificação no receptor, a figura de ruído (NF – *noise figure*) de cada estágio deve ser levada em consideração no cálculo final da SNR, pois a NF fornece ganho ao ruído e não ao sinal.

Além do ruído no fotodetector, os enlaces VLC são afetados pela iluminação do ambiente, como por exemplo: luz do sol, lâmpadas fluorescente e incandescente. Essas fontes de luz provocam o aumentando do valor de  $P_{\text{rec}}$  que, por sua vez, provoca o aumento de  $\sigma_{\text{shot}}^2$  [72,73]. Além disso, as lâmpadas fluorescentes também podem causar interferências na detecção de sinais de RF de baixa frequência (menor que alguns kHz), pois a variação temporal da iluminação, imperceptíveis ao olho humano, produz ruído em torno da frequência de oscilação e seus harmônicos [62,73].



### 2.1.5 Perdas no Canal VLC com Visada Direta

Em enlaces de RF, sob condições de espaço livre, utiliza-se a fórmula de Friis para calcular a potência de RF que chega ao receptor a partir de uma fonte irradiante. A fórmula de Friis é deduzida com base nos seguintes parâmetros: densidade de potência de uma esfera isotrópica ( $S_{\text{iso}}$ ), diretividade da onda irradiante ( $D$ ) é a área efetiva de captação de energia irradiante da onda de RF ( $A_{\text{eff}}$ ). Esses mesmos conceitos podem ser utilizados para deduzir uma fórmula para as perdas de propagação de um sistema VLC *indoor* de visada direta (LOS – *line-of-sight*) com modulação por intensidade e detecção direta. De acordo com a fórmula de Friis, a potência que chega ao receptor é dada por [74]

$$P_{\text{rx}} = S_{\text{iso}}DA_{\text{eff}}, \quad (2.25)$$

sendo  $S_{\text{iso}}$  definida como a potência de transmissão sobre a área da superfície de uma esfera de raio  $d$ , ou seja

$$S_{\text{iso}} = \frac{P_{\text{tx}}}{4\pi d^2}, \quad (2.26)$$

onde  $P_{\text{tx}}$  é a potência de transmissão.

Nos sistemas VLC, a irradiação oriunda de um LED pode ser modelada seguindo o diagrama de irradiação de uma fonte Lambertiana dado por [62,63]

$$R(\phi) = \begin{cases} 2(m+1)\cos^m(\phi), & -\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (2.27)$$

onde  $\phi$  é o ângulo de transmissão e  $m$  representa a ordem da diretividade do feixe de luz dado por

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln[\cos(\phi_{1/2})]}, \quad (2.28)$$

onde  $\phi_{1/2}$  é o semi ângulo de meia potência do feixe de luz.

A Figura 10 (a) ilustra um modelo de transmissão VLC *indoor* com visada direta, segundo [62]. Já a Figura 10 (b) mostra o diagrama de irradiação  $R(\phi)$ , em escala logarítmica no plano  $(x,y)$ , para diferentes valores de  $\phi_{1/2}$ .

Desconsiderando as perdas por reflexão e considerando o ângulo de incidência ( $\psi$ ) igual a zero em relação à normal, pode-se igualar  $A_{\text{eff}}$  à área geométrica de captação de luz do fotodetector ( $A_{\text{R}}$ ) [62,63]. Para outros valores de  $\psi$  tem-se

$$A_{\text{eff}} = \begin{cases} A_R \cos(\psi) & \text{para } 0 < \psi \leq \pi/2, \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.29)$$

Considerando  $D = R(\phi)$  e substituindo (2.29) e (2.27) em (2.25), a potência óptica na recepção pode ser expressa por

$$P_{\text{rec}} = \frac{P_{\text{ex}} A_R \cos(\psi) (m + 1) \cos^m(\phi)}{2\pi d^2}. \quad (2.30)$$

Para aumentar a potência recebida e evitar interferência de comprimentos de onda indesejáveis, utilizam-se, respectivamente: lentes concentradoras e filtros ópticos passa-faixa. O valor do ganho com o uso de uma lente concentradora na recepção é dado por

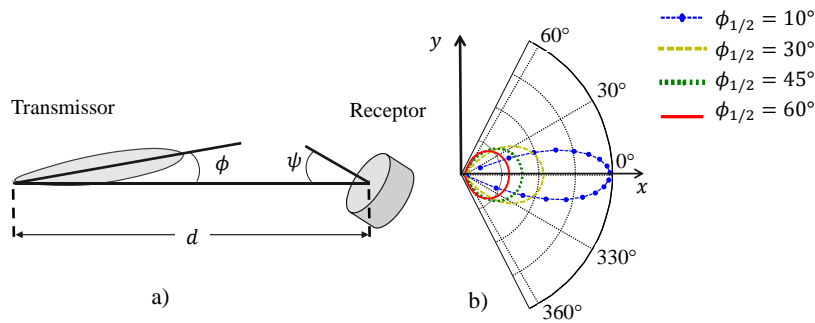
$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\psi_c)}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0, & |\psi| > \psi_c \end{cases}, \quad (2.31)$$

onde  $\psi_c$  é o ângulo do campo de visada (FOV - *field-of-view*) da lente concentradora e  $n$  é o índice de refração da lente. O filtro óptico passa-faixa, representado pela função  $Y(\psi)$ , pode apresentar diferentes respostas, dependendo do fabricante. Inserindo (2.31) e  $Y(\psi)$  em (2.30), obtém-se [62,63]

$$P_{\text{rec}} = \frac{P_{\text{ex}} A_R \cos(\psi) (m + 1) \cos^m(\phi) g(\psi) Y(\psi)}{2\pi d^2}. \quad (2.32)$$

Nota-se que  $P_{\text{rec}}$  independe do comprimento de onda do feixe de luz, ou seja, as perdas de propagação são as mesmas para todo o espectro visível.

É importante ressaltar que (2.32) não considera a presença de fumaça, vapor de água, entre outros gases que possam estar presentes em ambientes internos como cozinhas e banheiros. A presença desses gases, ao longo do enlace de transmissão, atenua a potência óptica transmitida, podendo inviabilizar a operabilidade do sistema VLC, conforme mostrado em [75].



**Figura 10** - a) Modelo de transmissão [adaptado de [62]]; b) Diagrama de irradiação da fonte Lambertiana na escala logarítmica para diferentes  $\phi_{1/2}$ .

## 2.2 Sinal 5G NR

Em 2017, o 3GPP iniciou o processo de padronização da tecnologia sucessora a LTE (*long term evolution*), utilizado pela quarta geração de telefonia móvel. O padrão 5G foi proposto para suprir as demandas globais das redes de telecomunicações móveis em diferentes cenários, como: eMBB, URLLC e mMTC. A primeira fase do 5G, denominada 5G NR, foi oficialmente concluída em junho de 2018 com o lançamento da última versão do Release 15 do 3GPP. Nessa primeira fase, buscou-se atender aplicações eMBB e, em até certo ponto, aplicações URLLC [76]. Para aplicações mMTC, o 3GPP especifica tecnologias baseadas no LTE como eMTC (*enhanced machine type communications*) e NB-IoT (*narrowband IoT*) [76].

Evidenciam-se como as principais vantagens do 5G NR em relação ao LTE [76]: a exploração de bandas de frequências em ondas milimétricas para prover maiores taxa de dados; a redução de interferências no consumo de energia por meio de melhorias em sinais de sincronismo e controle; a compatibilidade com aplicações futuras ainda não implementadas no padrão; a baixa latência para atender casos específicos de aplicação; e a utilização de tecnologias de direcionamento de feixe (*beamforming*) agregado a um número expressivo de antenas para transmissão de sinais de dados e controle.

Com o intuito de diminuir os custos e acelerar o processo de implementação do 5G NR, a Release 15 propôs inicialmente o modo de operação não autônomo (NSA - *non-standalone*), no qual utiliza a infraestrutura existente do LTE para prover acesso aos dispositivos 5G. Dessa forma, realiza-se a interface entre os dispositivos e o núcleo da rede por intermédio de procedimentos LTE e, uma vez estabelecida a conexão, verifica-se a disponibilidade e viabilidade de um canal 5G [77]. Posteriormente foi

proposto o modo de operação autônomo (SA – *standalone*) que utiliza o núcleo da rede 5G para gerenciar e controlar todas as conexões, assim como atender as funcionalidades necessárias para os novos serviços [76,77]. As faixas de frequência previstas para operação do 5G NR são [11,12]: de 450 MHz até 6 GHz para o FR1 e de 24,25 GHz até 52,2 GHz para o FR2. Embora o espectro de luz não esteja previsto para operação 5G NR, este trabalho demonstra a operabilidade do sinal 5G NR em um sistema VLC.

O documento TS 138.300 define a modulação CP-OFDM (*cyclic prefix OFDM*) para o sinal 5G NR [78]. Essa forma de onda é vastamente difundida nos sistemas de comunicação sem fio como LTE e família IEEE 802.11 [79]. No processo de modulação OFDM, divide-se a sequência de dados a ser transmitida em várias subsequências, que paralelamente, são mapeadas e transmitidas simultaneamente por subportadoras ortogonais. A modulação e a demodulação das subportadoras são feitas via transformadas discretas de Fourier inversa e direta, respectivamente, ou seja, é aplicado a IFFT (*inverse fast Fourier transform*) para a multiplexação e a FFT (*fast Fourier transform*) para a demultiplexação [80]. Essa estratégia de transmissão de sinais surgiu como uma alternativa para combater os fenômenos de multipercurso, típicos da transmissão sem fio, que são causados pelos diferentes atrasos introduzidos pelos diferentes percursos entre o transmissor e o receptor [80].

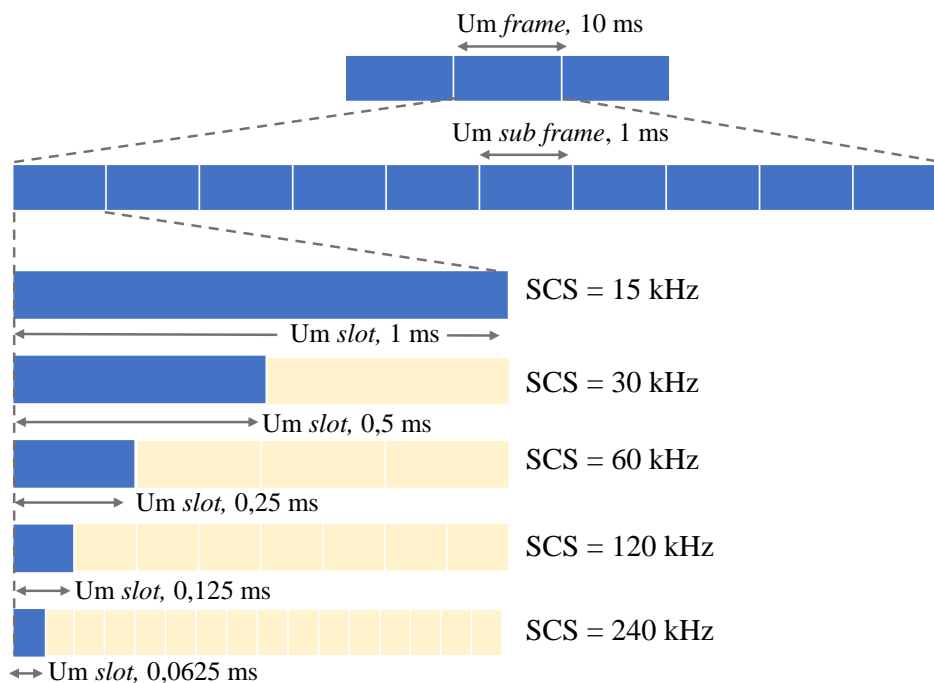
O padrão 5G NR faz uso do conceito de numerologia flexível, o qual apresenta o escalonamento dos seguintes itens: espaçamento de subportadoras (SCS - *subcarrier spacing*); duração de símbolo; prefixo cíclico (CP - *cyclic prefix*); duração de *slot*. Diferentemente do LTE, o SCS no 5G NR não é mais fixado em 15 kHz e pode assumir valores de 15, 30 e 60 kHz para o FR1, e 30, 60, 120 e 240 kHz para o FR2 [77]. Essa estratégia implica em diferentes durações de símbolos e permite atender a serviços como QoS (*quality of service*), pré-requisitos de latência e faixa de frequência [81]. O CP também assume diferentes durações e pode ser configurado com o comprimento normal ou estendido, porém, no 5G NR, a configuração estendida só está disponível para o espaçamento de 60 kHz [77]. O *slot* padrão do 5G NR é composto por 14 símbolos OFDM utilizando o CP normal e 12 símbolos OFDM para o CP estendido. Desta forma a duração do *slot* depende do SCS empregado [76,77]. Diferentes numerologias podem ser empregadas em uma mesma portadora do sinal 5G NR para aumentar a flexibilidade do sistema. Para tal, implementa-se o conceito de BWP (*bandwidth part*) que segmenta a largura de faixa (BW – *bandwidth*) disponível em

partes menores. A Tabela 3 mostra os índices de numerologia ( $\mu$ ) e os correspondentes SCS, CP e o número de símbolos OFDM por *slot*, de acordo com o 3GPP.

O sinal 5G NR possui quadros (*frame*) de tamanho fixo de 10 ms e cada *frame* é dividido em *frames* menores (*sub frame*) com duração igual a 1 ms. O *sub frame* pode ser constituído por 1, 2, 4, 8 ou 16 *slots* dependendo da numerologia empregada. A Figura 11 ilustra a estrutura, no domínio do tempo, do *frame*, *sub frame* e *slot* do sinal 5G NR para os possíveis valores de SCS.

**Tabela 3** – índice de numerologia e os respectivos SCS e CP [77].

Índice de numerologia ( $\mu$ )	SCS	Tipo de CP	Número símbolo OFDM por <i>slot</i>
0	15 kHz	normal	14
1	30 kHz	normal	14
2	60 kHz	normal	14
3	60 kHz	estendido	12
3	120 kHz	normal	14
4	240 kHz	normal	14



**Figura 11** – Estrutura *frame*, *sub frame* e *slot* do 5G NR[adaptado de [76]].

Além dos *slots* de tamanho padrão (14 e 12 símbolos OFDM), o 5G NR define tamanhos de *slots* menores, propícios para aplicações que necessitam de baixa latência [82]. Esses *slots*, denominados *mini-slot*, possuem 2, 4 ou 7 símbolos OFDM e podem ser inseridos imediatamente, mesmo quando outro *slot* já está sendo transmitido [76]. Ademais, os *mini-slot* também são importantes para a coexistência com o LTE e para o *beamforming* [81].

De acordo com [83], a quantidade máxima de dados úteis ( $V_E$  - vazão efetiva) do 5G NR em Mbit/s transmitida da estação rádio base até o usuário final pode ser aproximada por

$$V_E = 10^{-6} \sum_{j=1}^j \left( v_{\text{Layers}}^{(j)} Q_m^{(j)} \beta^{(j)} R_{\text{max}} \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu} 12}{T_s^\mu} (1 - \text{OH}^{(j)}) \right), \quad (2.33)$$

na qual  $j$  representa o número de componentes de portadoras agregadas na banda de operação ou em combinação de bandas, sendo o máximo de 16 componentes para agregação [77];  $v_{\text{Layers}}^{(j)}$  denota o número máximo de camadas de rádio, devido ao uso de sistemas MIMO;  $Q_m^{(j)}$  é a quantidade de bits transmitido por símbolo;  $R_{\text{max}}$  é a taxa máxima de codificação com valor igual a 948/1024, assumindo o uso de códigos de verificação de paridade de baixa densidade (LDPC - *low-density parity-check*);  $T_s^\mu$  é o tempo médio de duração de símbolo OFDM e, assumindo o CP normal,  $T_s^\mu$  é representado por [83]

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14(2^\mu)}; \quad (2.34)$$

$\beta^{(j)}$  corresponde ao fator de escala, o qual é designado pelas camadas de aplicação para indicar, por exemplo, o baixo desempenho do sistema em relação ao pico máximo de vazão efetiva. Os possíveis valores de  $\beta^{(j)}$  são: 1, 0,8, 0,75 ou 0,4 [83]. A sobrecarga devido ao uso de informações de sinalização é representada em (2.33) por  $\text{OH}^{(j)}$  e pode assumir os valores para *downlink* de 0,14 para o FR1 e 0,18 para o FR2. Por fim,  $N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu}$  denota o número máximo em blocos de recurso (RB - *resource block*) alocados por BW para dada numerologia. Cada bloco de recurso é constituído, no domínio da frequência, por um conjunto de 12 subportadoras consecutivas [77]. A Tabela 4 mostra os valores de  $N_{\text{PRB}}^{\text{BW}}$  para as correspondentes BW e SCS operando em FR1 conforme apresentado em [84].

**Tabela 4** - Alocação de RB em função de BW e SCS para o FR1[84].

SCS (kHz)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	90	100
	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz
	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$	$N_{PRB}^{BW}$
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	217	245	273
60	N/A	11	18	24	31	38	51	65	79	107	121	135

Fonte: 3GPP especificações técnicas TS 38.101-1.

A métrica de desempenho EVM é uma forma de avaliar a qualidade do sinal recebido. Essa métrica afere o valor quadrático médio do erro entre o símbolo de referência e o símbolo transmitido sobre a média quadrática da energia do símbolo. Por meio dessa métrica é possível mensurar o quanto o símbolo transmitido variou de sua posição ideal e, conseqüentemente, avaliar a qualidade do sinal para demodulação [85]. Entretanto, a medida de EVM é apenas útil quando a SNR é alta o suficiente para assumir que os símbolos recebidos estão nas respectivas áreas de decisão dos símbolos transmitidos [86]. Para baixa SNR, a métrica adequada para avaliar a qualidade do sinal recebido é a BER (antes da decodificação de canal) ou a FER (*frame error rate*) (depois da decodificação de canal). A especificação técnica TS 38.104 do 3GPP apresenta o máximo  $EVM_{RMS}$  permitido de acordo com a ordem de modulação do sinal 5G NR [87]. A Tabela 5 apresenta esses valores.

**Tabela 5** - Ordem de modulação e respectivos  $EVM_{RMS}$  segundo 3GPP.

Ordem de modulação	$EVM_{RMS}$ (%)
QPSK	17,5
16-QAM	12,5
64-QAM	8
256-QAM	3,5

Fonte: 3GPP especificações técnicas TS 38.104 [87]

# Capítulo 3

## Sistemas VLC Baseados em WDM

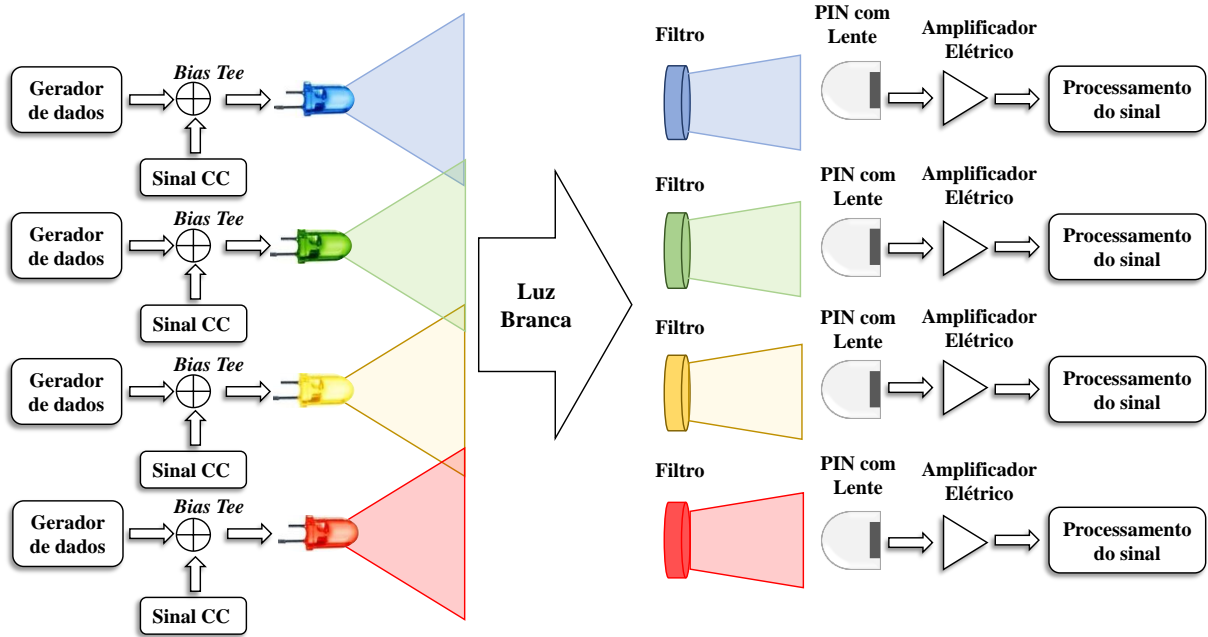
Este capítulo apresenta os resultados numéricos e experimentais dos sistemas VLC WDM em ambiente *indoor* de visada direta com IM/DD. Adicionalmente, apresentam-se as características dos componentes empregados no arranjo experimental, juntamente com as estratégias utilizadas para obtenção dos resultados.

### 3.1 Análises Numéricas

Realizou-se a análise numérica do sistema VLC WDM de linha de visada direta baseado em LED com IM/DD utilizando o *software* comercial OptiSystem®. Esse *software* simula o comportamento de sistemas de comunicação óptica em uma interface amigável de diagrama em blocos. Para obter uma boa concordância entre os resultados numéricos e os resultados experimentais, foram utilizados valores característicos de componentes reais encontrados no mercado.

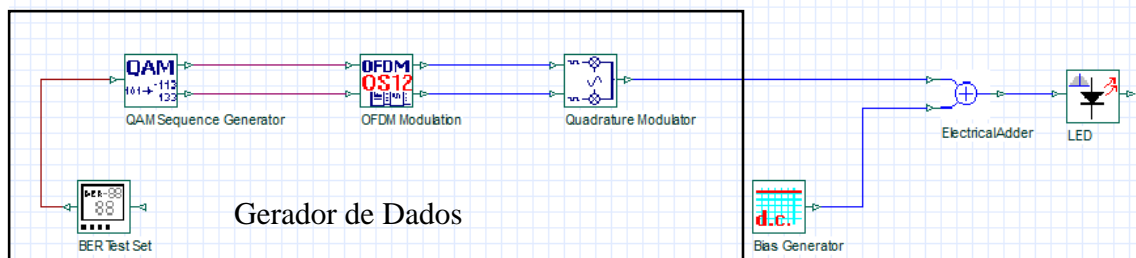
Optou-se por um LED RGBA como fonte geradora de luz. Esse LED possui quatro cores que podem ser moduladas separadamente, permitindo a implementação de um sistema WDM. São elas vermelha, âmbar, verde e azul. Essas cores foram centradas nos comprimentos de onda 630 nm, 595 nm, 525 nm e 450 nm, respectivamente. Como resultado da multiplexação dos quatro comprimentos de onda, obtém-se a cor branca que transporta as informações pelo espaço livre até o receptor óptico. A Figura 12 exhibe o diagrama em blocos correspondente ao sistema simulado.





**Figura 12** - Esquemático do diagrama em blocos usado nas análises numéricas.

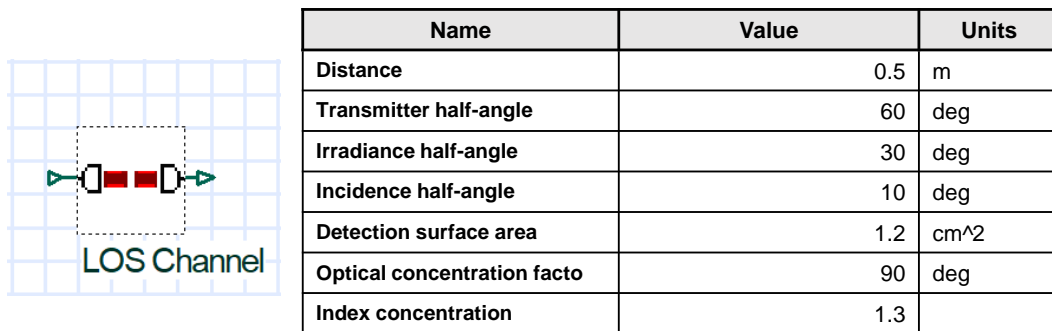
A fonte geradora de dados da Figura 12 representa um conjunto em blocos do OptiSystem® capaz de gerar sinais OFDM com as ordens de modulação QPSK e 16-QAM. Nesse processo, os bits são gerados aleatoriamente pelo bloco *BER Test Set* e, na sequência, são mapeados em fase e quadratura pelo bloco *QAM Sequence Generator*. Em seguida, o bloco *OFDM Modulation* converte o sinal mapeado de série para paralelo, aplica a IFFT e converte novamente o sinal para uma sequência em série. Por fim, o bloco *Quadrature Modulator* realiza a translação do sinal gerado em banda base para a frequência de interesse. A Figura 13 mostra o conjunto em blocos do OptiSystem® correspondente à parte de transmissão do sistema simulado para um comprimento de onda.



**Figura 13** – Diagrama de transmissão OptiSystem®.

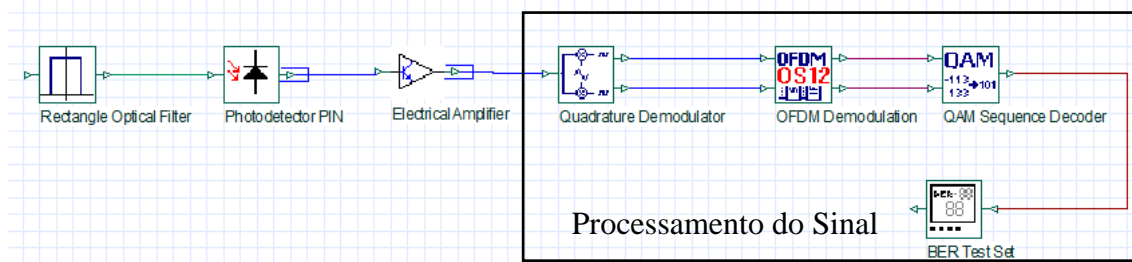
O componente *Bias Tee* da Figura 12 é representado no *software* como um somador de sinais de RF e CC (bloco *Electrical Adder* da Figura 13). Esse componente é essencial no arranjo, pois o baixo nível do sinal de RF é incapaz de fornecer a potência

necessária para o funcionamento do LED. Além disso, o sinal CC elimina o nível negativo do sinal de RF, tornando-o unipolar. Em concordância com o equacionamento da seção 2.1.5, o bloco *LOS Channel* calcula as perdas de propagação levando em consideração a presença de uma lente na recepção para concentrar a potência óptica incidente. Nesse bloco é possível alterar os seguintes parâmetros: distância do enlace, semi ângulo de meia potência do feixe de luz transmitido, ângulo de transmissão, ângulo de incidência do feixe de luz, área de captação do fotodiodo, ângulo do campo de visada e o índice de refração da lente concentradora. A Figura 14 mostra o bloco *LOS Channel* e o quadro para configuração dos parâmetros supracitados. Com exceção da distância do enlace e do semi ângulo de meia potência do feixe de luz transmitido, os demais valores mostrados no quadro da Figura 14 foram mantidos ao longo das análises numéricas, pois apresentam situações e componentes reais.



**Figura 14** – Bloco *LOS Channel* e quadro para configuração dos valores.

Implementou-se um conjunto de quatro receptores para a análise simultânea dos quatro comprimentos de onda transmitidos (Figura 12). Em cada receptor, utilizou-se um filtro passa banda (centrado no comprimento de onda de interesse), um fotodiodo PIN de silício e um amplificador elétrico. Realizou-se o processamento dos sinais recebidos por intermédio de um conjunto de quatro blocos do OptiSystem®. Nesse processo, o sinal de RF é transladado para banda base por meio do bloco *Quadrature Demodulador* e o bloco *OFDM Demodulador* aplica a demodulação OFDM, ou seja, realiza a conversão série paralelo, aplica a FFT e converte novamente a sequência de dados para forma serial. Em seguida, o bloco *QAM Sequence Decoder* converte os símbolos em bits e, por último, a sequência de bits retorna para o para o bloco *BER Test Set* que compara os bits recebidos com os bits transmitidos. A Figura 15 mostra a disposição dos blocos do OptiSystem® implementada para análises de um comprimento de onda na recepção.



**Figura 15** – Conjunto em bloco do receptor do OptiSystem®.

Em cada comprimento de onda, empregou-se um sinal de RF de 100 MHz de largura de faixa transladado para frequência de 60 MHz com as ordens de modulação QPSK e 16-QAM, resultando em vazões de dados de 200 e 400 Mbit/s por comprimento de onda. Assim como nos trabalhos de [42] e [44], a análise de desempenho do sistema foi feita em termos de BER. Desta forma foi possível verificar a proximidade dos resultados numéricos com os resultados experimentais já publicados. Manteve-se o limite de BER de  $3,8 \cdot 10^{-3}$  (aproximadamente -2,42 na escala logarítmica), estabelecido em [44]. Esse valor corresponde ao limite de correção de bits dos códigos corretores de erro FEC (*forward error correction*) que tem algum tipo de aleatorizador implementado. Contanto que o valor de FEC seja respeitado, os erros inseridos pelo sistema serão corrigidos [88,89].

Inicialmente, analisou-se a BER do sistema na configuração *back-to-back* (B2B) elétrico (saída do somador elétrico ligada diretamente ao amplificador elétrico) e B2B óptico (saída do LED ligada diretamente ao fotodiodo). A Tabela 6 mostra os valores de BER medidos com as ordens de modulação QPSK e 16-QAM para os quatro comprimentos de onda analisados.

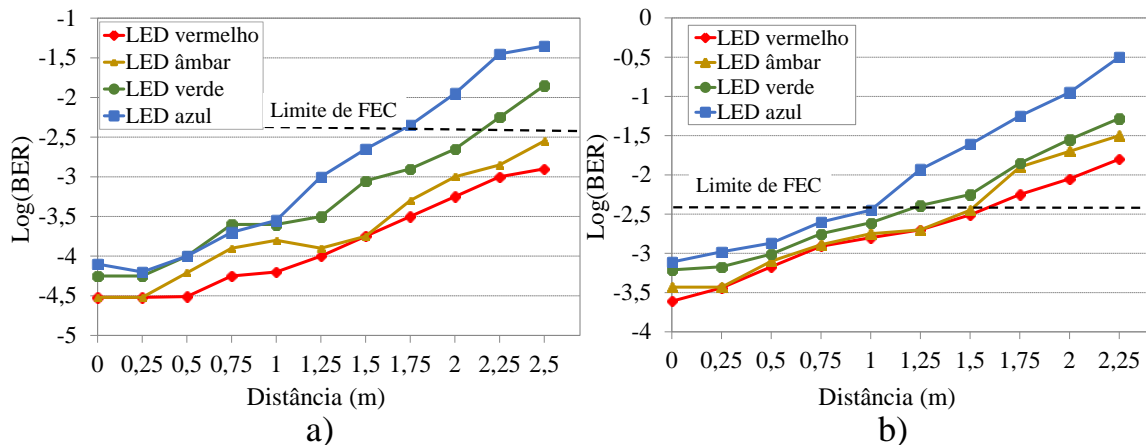
**Tabela 6** - Valores de BER para o B2B elétrico e o B2B óptico.

	B2B elétrico	B2B óptico QPSK	B2B óptico 16-QAM
LED azul	0	$0,079 \cdot 10^{-3}$	$0,79 \cdot 10^{-3}$
LED verde	0	$0,056 \cdot 10^{-3}$	$0,62 \cdot 10^{-3}$
LED âmbar	0	$0,031 \cdot 10^{-3}$	$0,37 \cdot 10^{-3}$
LED vermelho	0	$0,031 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-03}$

Nota-se que a inserção dos componentes ópticos provocou a elevação do patamar de erro do sistema. Esse aumento ocorre em virtude das perdas de conversão (E/O e O/E) e dos ruídos inseridos pelo fotodiodo. Apesar do aumento da BER, os valores permaneceram abaixo do limite de FEC em todos os casos analisados,

totalizando uma vazão total de 800 Mbit/s com a ordem de modulação QPSK e 1,6 Gbit/s com 16-QAM.

Na sequência, o bloco *LOS Channel* foi inserido nas análises numéricas e variou-se a distância do enlace. A Figura 16 apresenta as curvas de BER, na escala logarítmica, em função da distância entre o transmissor e o receptor. A Figura 16 (a) utiliza a ordem de modulação QPSK e a Figura 16 (b) 16-QAM. A distância de 0 m corresponde à configuração B2B óptico.



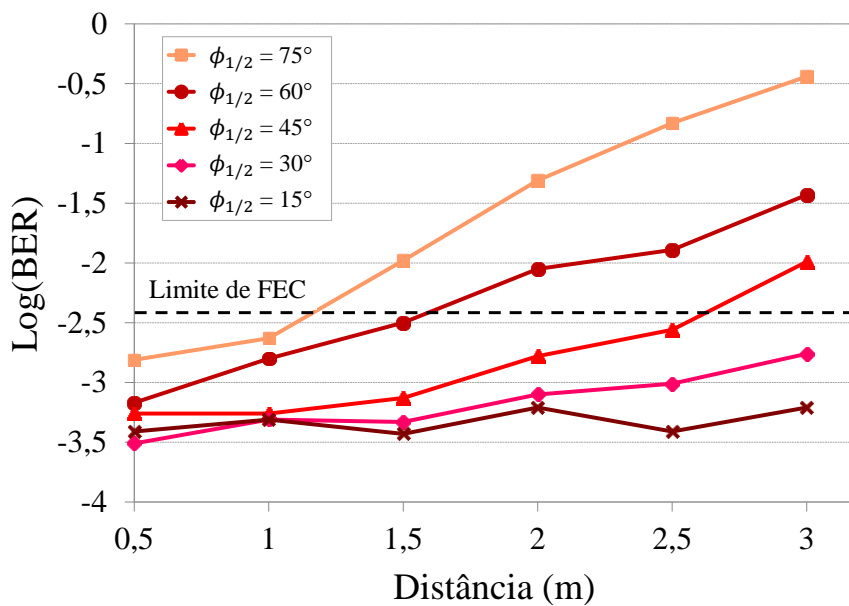
**Figura 16** – Curva de BER na escala logarítmica em função da distância. a) QPSK; b) 16-QAM.

Nota-se um aumento da BER em função do aumento da distância para todos os comprimentos de onda. Isso ocorre em consequência da diminuição da potência óptica no fotodiodo, que é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Observa-se ainda uma diferença de desempenho entre os enlaces correspondentes a cada cor. Essa diferença advém da resposta do fotodiodo de silício ao comprimento de onda de excitação. Por isso, os comprimentos de onda localizados mais próximos ao pico de responsividade do fotodiodo possuem maior conversão O/E. Isso explica o porquê dos LEDs vermelho e âmbar apresentarem melhor desempenho em relação aos LEDs verde e azul. A Figura 8 (b) do capítulo 2 exibe a curva de responsividade em função do comprimento de onda para três diferentes tipos de fotodiodos. Os resultados obtidos condizem com os resultados da variação de distância apresentado em [44], entretanto, nesta publicação, o LED azul apresentou menor BER que o LED verde devido à resposta dos filtros ópticos utilizados.

Analisando a Figura 16 (a), percebe-se que a máxima distância alcançada com os sinais dos quatro LEDs operando simultaneamente, abaixo do limite de FEC foi de 1,5 m, totalizando uma vazão de 800 Mbit/s com QPSK. Na distância de 2,5 m, apenas

os enlaces correspondentes aos LEDs vermelho e âmbar contribuem para a vazão de dados, pois os sinais transmitidos pelos LEDs azul e verde passaram do limite de FEC e, por conseguinte, a máxima vazão nessa distância foi de 400 Mbit/s. Com a ordem de modulação 16-QAM (Figura 16 (b)), a vazão de 1,6 Gbit/s foi mantida ao longo 1 m com os sinais advindos dos quatro LEDs permanecendo abaixo do limite de FEC. Para distâncias maiores que 1,5 m todos os comprimentos de onda extrapolaram o limite de FEC. Embora foram atingidas maiores vazões com 16-QAM, essa ordem de modulação exige maior SNR para atender a BER alvo, o que implicou na operação desse enlace com distâncias menores.

Por fim, avaliou-se o desempenho do sistema variando o semi ângulo de meia potência ( $\phi_{1/2}$ ) do feixe de luz vermelho operando com a ordem de modulação 16-QAM. Essa variação pode ser feita na prática acoplando refletores com diferentes aberturas angulares ao LED. A Figura 17 exibe curva de BER, na escala logarítmica, em função da distância para diferentes valores de  $\phi_{1/2}$ .



**Figura 17** – Curva de BER na escala logarítmica em função da distância para diferentes valores de  $\phi_{1/2}$ .

Conforme esperado, a diminuição de  $\phi_{1/2}$  possibilita alcançar distâncias maiores sem extrapolar o limite de FEC. Isso ocorre porque a diminuição de  $\phi_{1/2}$  torna o feixe de luz mais diretivo, ou seja, reduz a área de cobertura do feixe [63]. Percebe-se que com  $\phi_{1/2} = 15^\circ$  a variação da distância pouco influencia no valor da BER do sistema,

pois as perdas de propagação são compensadas pelo aumento da concentração da potência óptica no receptor.

Os resultados numéricos demonstraram a possibilidade de alcançar vazão de dados na ordem de Gbit/s em enlaces VLC LOS com IM/DD utilizando LEDs como fonte de luz. Adicionalmente, as análises numéricas nortearam a implementação do arranjo experimental.

## 3.2 Caracterização dos Componentes

Utilizou-se um LED comercial RGBA LZ4-20MA00 do fabricante Engin® [90]. Esse dispositivo possui alimentações diferentes para cada comprimento de onda, ou seja, cada cor do LED RGBA atua como um LED independente. Diferentemente das análises numéricas, a potência óptica emitida varia com o comprimento de onda. A Tabela 7 mostra as potências ópticas emitidas por cada LED. Esses valores foram calculados a partir dos dados do fabricante (fluxo luminoso emitido no comprimento de onda dominante para corrente nominal de 700 mA) e da função sensibilidade do olho humano estabelecida em CIE 1978 pela Comissão Internacional de Iluminação [66].

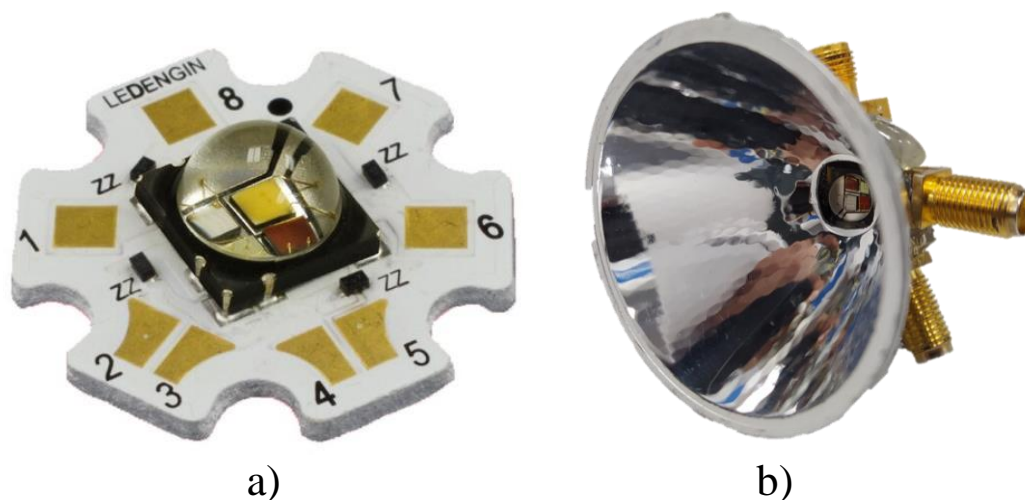
**Tabela 7** – Características do LED RGBA utilizado de acordo com [90].

LED	Comprimento de onda dominante	Fluxo luminoso	Potência óptica emitida <sup>1</sup>
Vermelho	623 nm	115 lm	0,525 W
Verde	523 nm	155 lm	0,285 W
Azul	460 nm	30 lm	0,732 W
Âmbar	590 nm	75 lm	0,145 W

Utilizou-se um *Bias Tee* para cada uma das quatro portadoras ópticas. A entrada de RF desse componente opera de 10 kHz a 2,8 GHz e a entrada CC permite corrente de até 1,5 A [91]. Inicialmente, realizou-se a conexão entre o *Bias Tee* e o LED por meio de fios  *jumper*. Entretanto, verificou-se que essa conexão desempenhava o papel de uma antena irradiando o sinal de RF inserido. Diante desse problema, soldou-se conectores SMA diretamente nas alimentações do LED e utilizaram-se cabos coaxiais para conectar o LED ao *Bias tee*. Adicionalmente, acoplou-se um refletor ao LED com abertura angular de aproximadamente de 60° para diminuir o ângulo de meia potência

<sup>1</sup> Valores calculados de acordo com a Equação (2.7).

do feixe de luz (Equação 2.27). A Figura 18 mostra as imagens do LED RGBA antes (Figura 18 (a)) e depois dos ajustes (Figura 18 (b)).

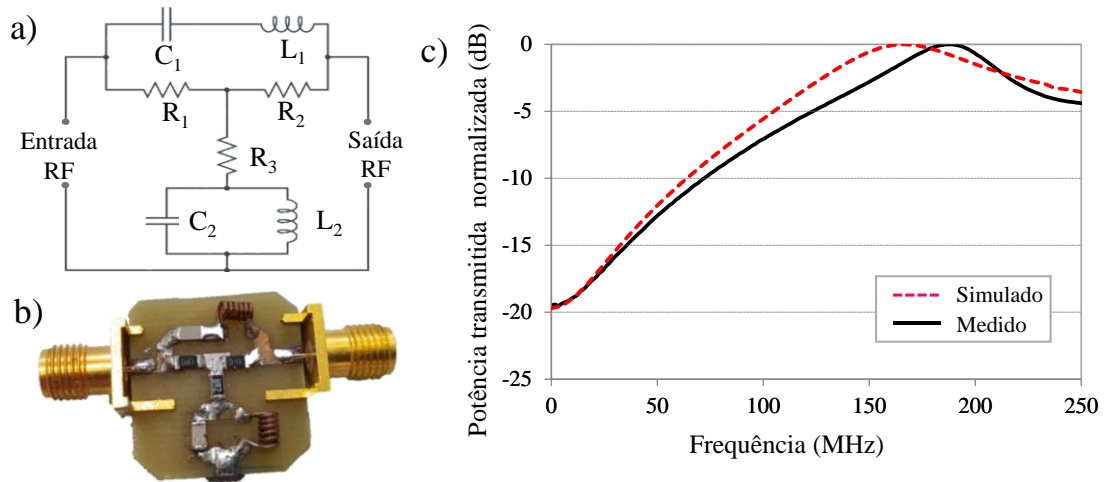


**Figura 18** – LED RGBA. a) Antes das modificações; b) Com refletor e conectores SMA.

Três geradores de sinais vetoriais (VSG – *vector signal generator*) foram utilizados no arranjo experimental para a implementação do sistema WDM. O primeiro SMBV100B do fabricante Rohde & Schwarz (VSG<sub>1</sub>) foi empregado para geração do sinal 5G NR. O segundo PSGE8267D foi utilizado em conjunto com um gerador de onda arbitrário (AWG – *arbitrary waveform generator*) M9505A (VSG<sub>2</sub>), ambos do fabricante Keysight. Essa combinação permitiu deslocamento em frequência dos sinais gerados em banda base pelo AWG além do emprego da modulação *M*-QAM com a técnica DPD. Por fim, utilizou-se o equipamento EXG (VSG<sub>3</sub>) para geração de sinais *M*-QAM de mesma largura de faixa, frequência e amplitude que os sinais gerados pelos VSG<sub>1</sub> e VSG<sub>2</sub>. Alterou-se a frequência de operação dos sinais modulantes de acordo com a largura de faixa utilizada. Essa estratégia possibilitou operar com frequências mais próximas da banda base, onde a resposta em frequência do LED possui menor atenuação. A menor frequência utilizada foi 46 MHz (para o sinal com 10MHz de largura de faixa) e a máxima foi de 127 MHz (para o sinal de 180 MHz de largura de faixa).

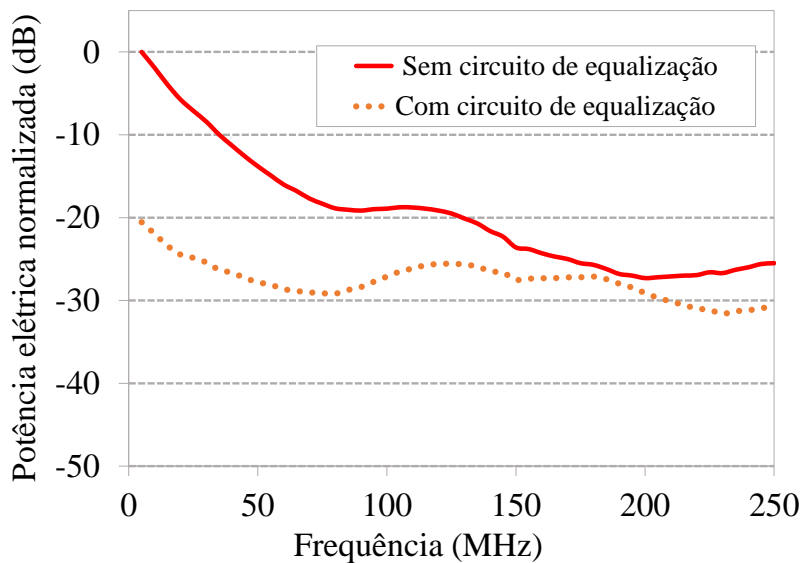
Um equalizador baseado em circuito RLC (resistivo, indutivo e capacitivo) foi desenvolvido com o intuito de compensar, em amplitude, a resposta em frequência do LED e, conseqüentemente, estender a largura de faixa para modulação. O projeto desse equalizador foi baseado no trabalho de Xingxing *et al.* [42]. A Figura 19 (a) exhibe o diagrama do circuito correspondente ao projeto do equalizador. Por meio de análises

numéricas, chegou-se nos seguintes valores de componentes comerciais:  $R_1 = R_2 = 36 \Omega$ ,  $C_1 = 18 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 32 \text{ pF}$ ,  $L_1 = L_2 = 22 \text{ nH}$  e  $R_3 = 8,2 \Omega$ . A Figura 19 (b) e 19 (c) mostram, respectivamente, a fotografia do circuito de equalização confeccionado e as respostas em frequência simulada e medida.



**Figura 19** – Equalizador baseado em circuito RCL. a) diagrama do circuito; b) fotografia c) resposta em frequência.

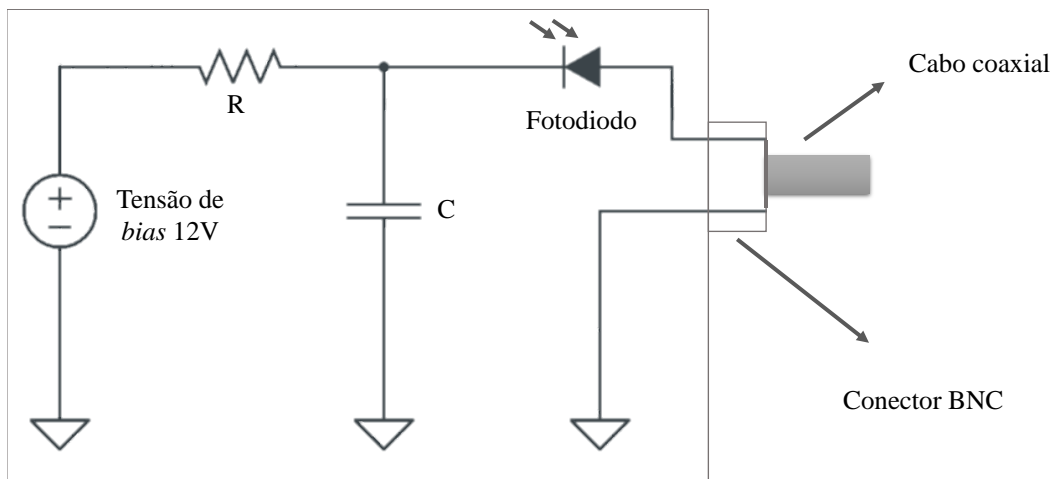
A Figura 20 mostra os valores medidos de potência elétrica normalizada gerada na recepção pelo LED vermelho em função da frequência do sinal de RF, com e sem o uso do circuito de equalização. Embora o uso do circuito de equalização não torne a resposta em frequência do LED linear, percebe-se que o emprego desse dispositivo permite diminuir a discrepância do nível de potência medido.



**Figura 20** – Potência elétrica normalizada medida na recepção em função da frequência, com e sem o uso de circuito de equalização.



Na recepção, utilizou-se um fotodiodo PIN de silício ET-2030 do fabricante EOT®. Esse componente opera até a frequência de 1,2 GHz e possui o pico de responsividade de 0,47 A/W próximo ao comprimento de onda 830 nm [92]. Nos comprimentos de onda correspondentes às cores vermelha, verde, azul e âmbar do LED RGBA, tem-se as respectivas responsividades: 0,4, 0,27, 0,2 e 0,29 A/W. Diferentemente dos fotodiodos desse fabricante, desenvolvido para frequências maiores que 10 GHz, o fotodiodo utilizado possui o encapsulamento simplificado, com um nível de tensão na ordem de 12 V na saída do dispositivo [93]. Esse nível de tensão é prejudicial aos equipamentos sensíveis a sinais CC, como os analisadores de sinais vetoriais (VSA – *vector signal analyser*) e amplificadores elétricos. A Figura 21 mostra o diagrama do circuito do fotodiodo encapsulado ET-2030.



**Figura 21** – Fotodiodo PIN de silício ET-2030 [adaptado de [94]].

Analisando a Figura 16, percebe-se que quando não há incidência de luz, o fotodiodo não conduz e o capacitor (C) é completamente carregado com a tensão de alimentação (tensão de *bias* 12 V). Quando há luz, o fotodiodo funciona como um curto e os 12 V da alimentação aparece na saída do dispositivo. Uma forma de eliminar o nível CC na saída é por meio do bloqueador de nível CC (*DC blocker*). Entretanto, quando esse componente foi inserido na saída do ET-2030, observou-se a completa ausência de sinais. Ou seja, o dispositivo deixou de responder ao estímulo de luz devido à inexistência de diferença de potencial entre o ET-2030 e o *DC blocker*. Perante esse desafio, optou-se por utilizar o equalizador desenvolvido na saída do ET-2030 antes do *DC blocker*. Essa configuração possibilitou a atenuação do nível CC, bem como compensação da resposta em frequência do LED.

Adicionou-se uma lente plano-convexa de 25,4 mm e distância focal de 35 mm (LA1027-C) na recepção do arranjo com a finalidade de concentrar a energia irradiada no fotodiodo. Os ajustes de posicionamento entre a lente e a entrada do fotodiodo foram feitos por intermédio de micro posicionadores. A Figura 22 exhibe a fotografia do conjunto micro posicionador, lente e fotodiodo.



**Figura 22** – Conjunto micro posicionador, lente e fotodiodo.

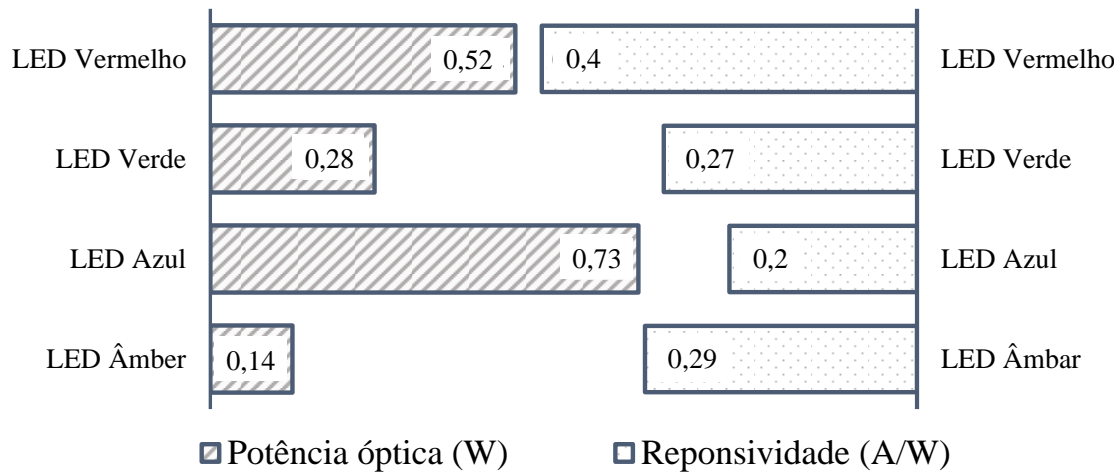
Dois VSAs distintos foram utilizados no arranjo experimental. O primeiro ( $VSA_1$ ) FSW-8351 do fabricante Rohde & Schwarz foi empregado para demodular o sinal 5G NR e o segundo ( $VSA_2$ ) osciloscópio DSAZ632A do fabricante Keysight foi utilizado para demodular o sinal  $M$ -QAM com DPD. Uma cascata de quatro amplificadores de RF garantiu um ganho de aproximadamente 61 dB no sinal recebido. A Tabela 8 mostra as características dos amplificadores de RF empregados.

**Tabela 8** – Características dos amplificadores de RF utilizados.

Amplificador	Ganho Típico (dB)	Figura de ruído (dB)	Faixa de operação (MHz)
ZJL-4HG+	17	4,5	20 - 4000
SBUA-400-12-010-K	12	4,5	50 - 40000
SBUA-400-12-010-K	12	4,5	50 - 40000
83006A	20	13	10 - 26000

De posse dos dados fornecidos pelos fabricantes do LED RGBA e do fotodiodo, é possível estimar o desempenho das portadoras ópticas em termos de conversão de potência elétrica, uma vez que as perdas de propagação independem do comprimento de

onda (Equação 2.32). A Figura 23 exibe, de forma gráfica, a potência óptica emitida e a responsividade do fotodiodo nos comprimentos de onda centrais de cada LED analisado para corrente nominal de 700 mA. Quanto mais próximo a barra de potência óptica estiver da barra de responsividade, melhor será o processo de conversão O/E.



**Figura 23** - Potência óptica e responsividade para os comprimentos de onda vermelho, verde, azul e âmbar.

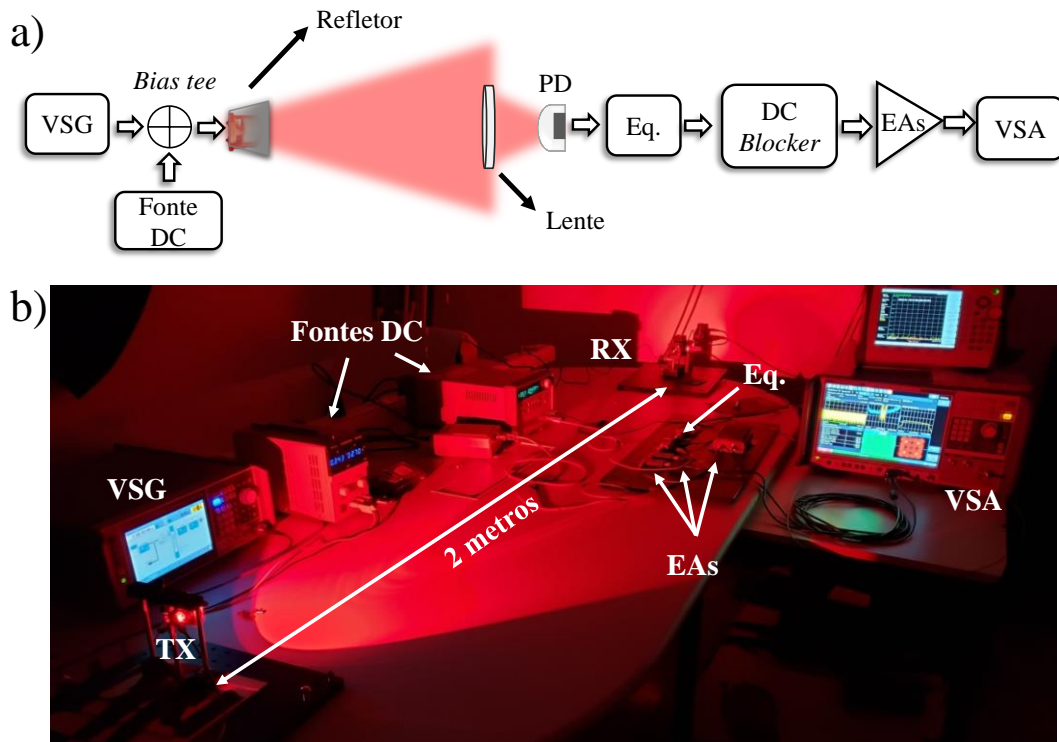
Com base na Figura 23, pode-se concluir que o sistema VLC terá diferentes respostas de acordo com o LED analisado. Além disso, percebe-se que o LED vermelho possuirá a maior conversão O/E seguido pelos LEDs azul, verde e âmbar.

### 3.3 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram divididos em duas partes. Na primeira, analisou-se o desempenho individual de cada LED diante da variação da corrente de *bias* e do comprimento do enlace. Na segunda parte, utilizaram-se os três LEDs de melhor desempenho para a implementação do sistema VLC WDM com o sinal 5G NR e posteriormente, com o sinal *M-QAM* com a técnica DPD.

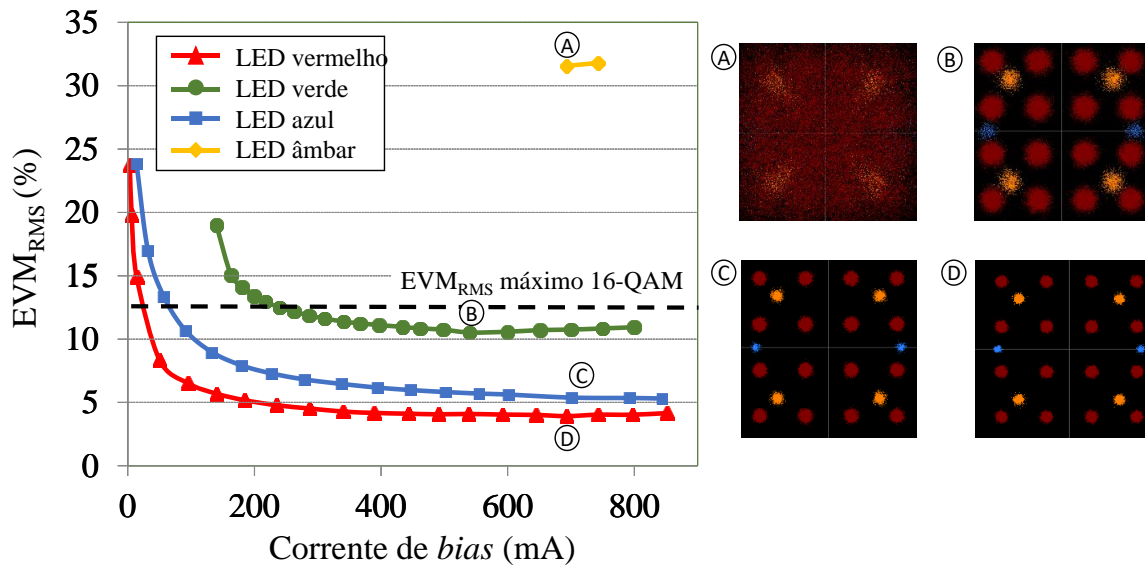
#### 3.3.1 VLC Monocanal

A Figura 24 mostra o arranjo experimental do enlace VLC utilizando apenas o LED vermelho. A Figura 24 (a) apresenta o diagrama em blocos e a Figura 24 (b) mostra a fotografia do arranjo em 2 m. Utilizou-se o  $VSG_1$  para geração do sinal 5G NR e o  $VSA_1$  para demodulação. O mesmo arranjo foi implementado para os ensaios com os LEDs verde, azul e âmbar.



**Figura 24** - Arranjo experimental do enlace VLC operando com o LED vermelho. a) Diagrama em blocos. b) fotografia. PD – fotodiodo; Eq.- equalizador; EAs – amplificadores elétricos.

Primeiramente, analisou-se o impacto da corrente de *bias* no  $EVM_{RMS}$  do sinal 5G NR de 10 MHz de banda, centrado em 46 MHz e ordem de modulação 16-QAM. O limite de  $EVM_{RMS}$  para essa ordem de modulação é 12,5% segundo o 3GPP. A Figura 25 exhibe esses resultados obtidos em um enlace de 2 m. Nota-se que o menor valor de  $EVM_{RSM}$  foi obtido para o LED vermelho seguido pelo LED azul e verde, nessa ordem. O LED âmbar não atendeu ao limite de  $EVM_{RMS}$  para nenhum valor de corrente de *bias*. O menor valor de  $EVM_{RMS}$  obtido para esse LED foi de 31,57% para a corrente de *bias* de 670 mA. A diferença de desempenho, em termos de  $EVM_{RMS}$ , dos quatro LEDs condiz com os dados apresentados na Figura 23, pois quanto mais eficiente o processo de conversão O/E, maior será a SNR e, conseqüentemente, menor será a dispersão dos símbolos [85]. A corrente de *bias* mínima do LED verde necessária para atender ao limite de  $EVM_{RMS}$  do 3GPP é de 240 mA, enquanto para os LEDs vermelho e azul são de 50 mA e 90 mA, respectivamente. Particularmente para o LED vermelho, o limite de  $EVM_{RMS}$  foi mantido próximo se 4% na faixa entre 450 mA a 850 mA.



**Figura 25** -  $EVM_{RMS}$  em função da corrente de *bias*. A- constelação 16-QAM LED verde; B- constelação 16-QAM LED azul; C- constelação 16-QAM LED vermelho.

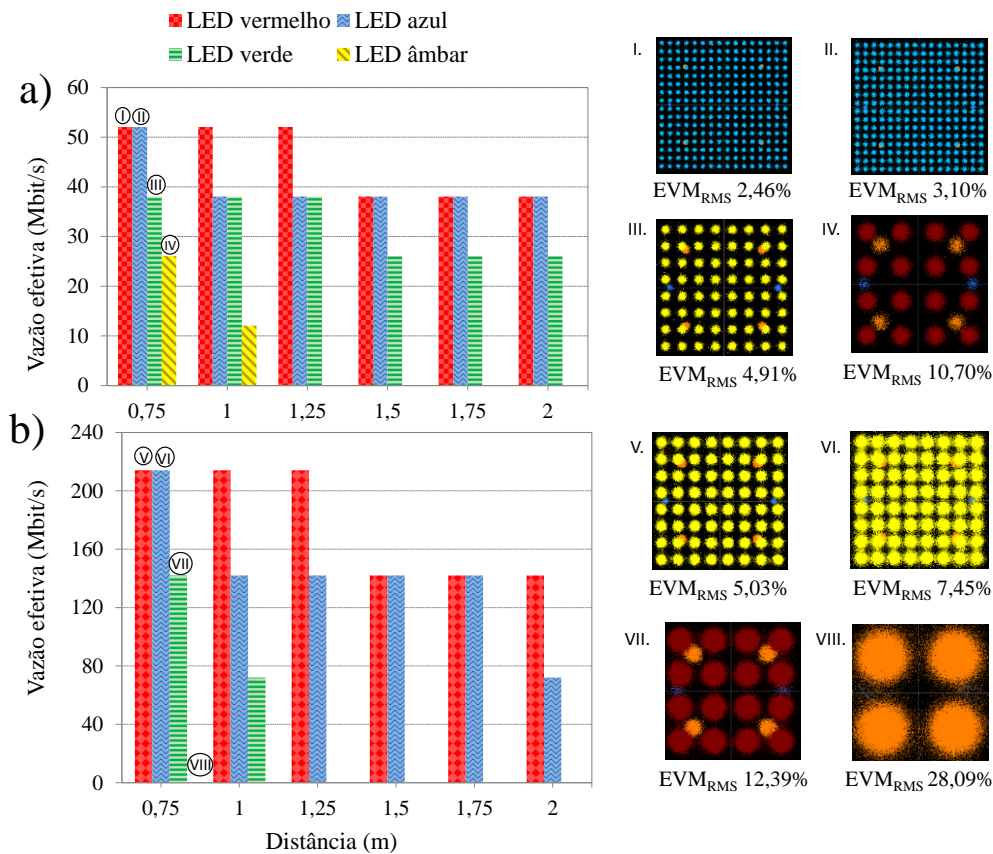
Embora o aumento da corrente de *bias* acarrete no aumento da potência óptica emitida, esse aumento não provoca, necessariamente, a diminuição do  $EVM_{RMS}$ . Isso ocorre em consequência da distorção do sinal de informação provocado pelo aumento do nível DC no LED [55]. Os pontos A, B, C e D destacados no gráfico da Figura 25 representam os valores de corrente de *bias* utilizados por cada LED nas análises posteriores. O critério para a escolha desses pontos foi o menor valor de  $EVM_{RMS}$  obtido sob a condição de as correntes de *bias* não ultrapassarem a corrente nominal do LED (700 mA). Adicionalmente, a Figura 25 mostra a diferença de dispersão dos símbolos na constelação 16-QAM para cada LED analisado em A, B, C e D. Os pontos laranjas e azuis representam os sinais de controle e sincronismo, respectivamente. A Tabela 9 apresenta os valores de corrente de *bias* e  $EVM_{RMS}$  associados aos pontos A, B, C e D.

**Tabela 9** – Valores de  $EVM_{RMS}$  e corrente de *bias* nos pontos A, B, C e D.

	$EVM_{RMS}$ (%)	Corrente de <i>bias</i> (mA)
A	31,57	670
B	10,52	540
C	5,38	700
D	3,82	690

Uma forma de aumentar a potência óptica no fotodiodo sem aumentar a corrente de *bias* do LED é encurtar a distância do enlace. Desta forma, avaliou-se a vazão efetiva

de dados em função da distância do enlace VLC modulado com o sinal 5G NR com 10 MHz e 50 MHz de largura de faixa. Para aumentar a vazão efetiva, optou-se por aumentar a ordem de modulação dos sinais transmitidos. Entretanto, quanto maior for a ordem de modulação, maior será a SNR exigida para se atingir a mesma BER. Variou-se a distância de 2 m até 0,75 m com o passo de 0,25 m. Em cada ponto analisado, empregou-se a maior ordem de modulação possível, respeitando o limite de  $EVM_{RMS}$  de cada ordem. Por exemplo, um sinal de 38 Mbit/s operando com 64-QAM passaria a 52 Mbit/s com 256-QAM, quando o  $EVM_{RMS}$  medido para essa ordem de modulação fosse menor que o limite estabelecido em norma. A Figura 26 exibe os resultados da variação da vazão em função da distância. A Figura 26 (a) mostra a vazão para 10 MHz de banda e a Figura 26 (b) para a banda de 50 MHz.



**Figura 26** – Vazão efetiva em função da distância. a) 10 MHz de largura de faixa. b) 50 MHz de largura de faixa.

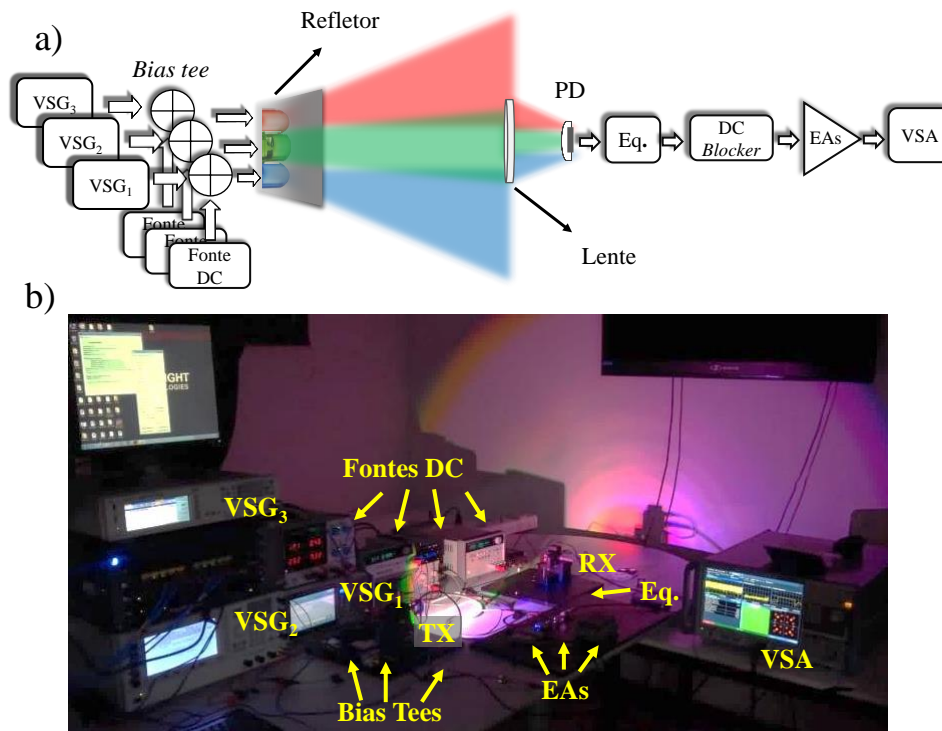
Nota-se que a vazão efetiva diminui com o aumento da distância. Isso ocorre em consequência da potência óptica que chega ao receptor ser inversamente proporcional ao quadrado da distância (Equação (2.37)). Como a potência de RF é gerada a partir da potência da óptica, o aumento da distância implica na redução da SNR, obrigando a diminuição da ordem de modulação e/ou largura de faixa para atender aos requisitos de

$EVM_{RMS}$  segundo o 3GPP. Os valores de vazão efetiva para os LEDs âmbar e verde foram considerados nulos em alguns pontos do gráfico, pois os pré-requisitos de  $EVM_{RMS}$  não foram atendidos em nenhuma ordem de modulação.

De modo complementar, a Figura 26, mostra as constelações referentes a cada LED em 0,75 m. Nessa distância, observa-se que, embora os LEDs vermelho e azul disponham da mesma vazão efetiva, os valores de  $EVM_{RMS}$  diferem, evidenciando o melhor desempenho do LED vermelho. A marcação VIII reporta a constelação QPSK referente ao LED âmbar no qual foi atribuído valor nulo de vazão.

### 3.3.2 VLC WDM

Com o propósito de obter maior vazão de dados no sistema VLC, implementou-se um sistema VLC WDM utilizando três portadoras ópticas (LEDs vermelho, verde e azul). A Figura 27 mostra a configuração do arranjo experimental. A Figura 27 (a) apresenta o diagrama em blocos e a Figura 27 (b) a fotografia do arranjo no enlace de 0,75 m. No total, empregou-se quatro fontes DC, uma para cada LED e uma para alimentação do amplificador ZJL-4HG+.



**Figura 27** - Arranjo experimental enlace VLC operando com três LED. a) Diagrama em blocos; b) fotografia do arranjo em 0,75m.

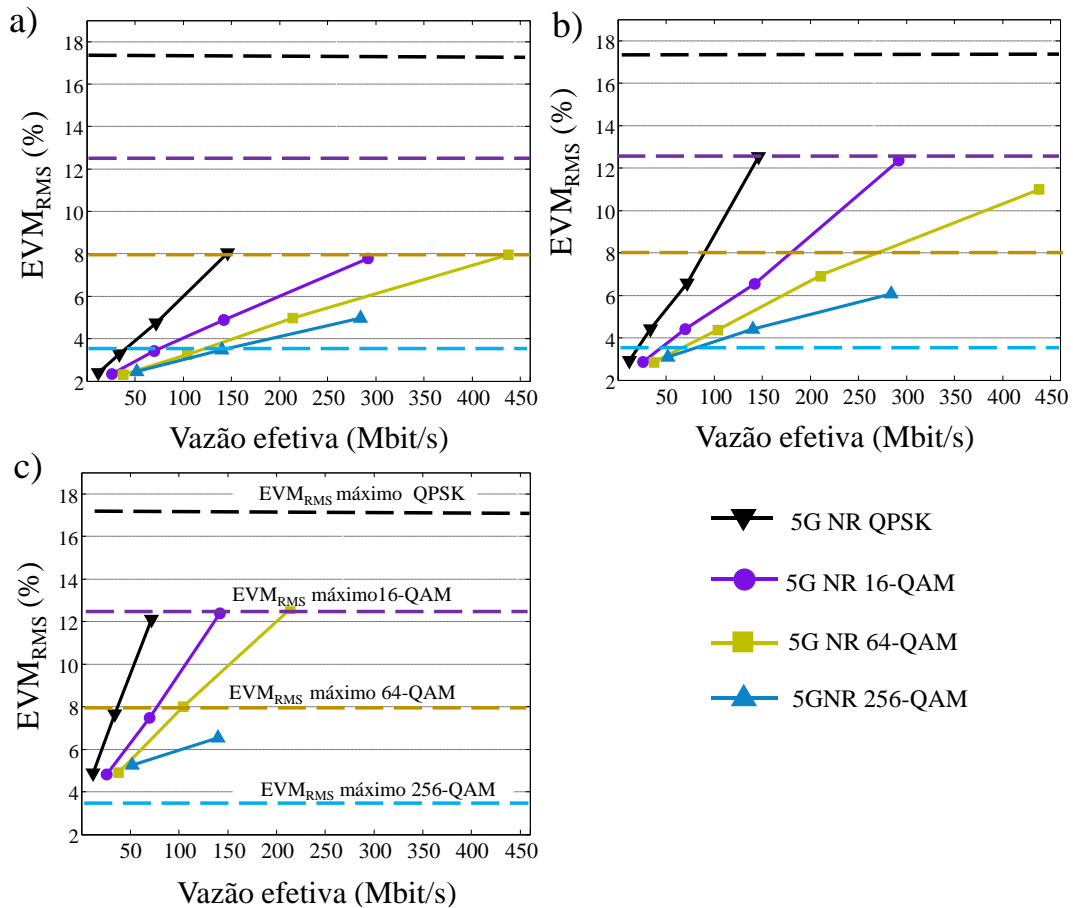
Os sinais modulantes foram gerados por três VSGs distintos com os mesmos níveis de potência, largura de faixa e frequência, porém apenas o VSG<sub>1</sub> gerava o sinal no padrão 5G NR. Como analisou-se o sinal emitido por cada LED separadamente, o sinal 5G NR era modulado no respectivo comprimento de onda de análise, ou seja, quando o sinal 5G NR modulava um LED os outros dois eram modulados com sinais *M*-QAM de características semelhantes, mas somente o sinal 5G NR foi avaliado.

Uma maneira eficiente de demultiplexar os comprimentos de onda na recepção é utilizando filtros ópticos centrados no comprimento de onda de interesse, conforme feito nas análises numéricas (seção 3.1) e em [44]. Entretanto, as perdas na ordem de 20 dB no sinal recebido, provocada pelo uso dos filtros ópticos disponíveis no laboratório, inviabilizaram a utilização desses componentes. Diante desse problema, optou-se por realizar a demultiplexação do sinal por meio de ajustes no posicionamento da lente receptora de maneira que a potência do sinal de interesse se sobressaísse em relação aos demais.

Alterou-se a largura de faixa dos sinais modulantes em 10 MHz, 25 MHz, 50 MHz e 100 MHz. A vazão efetiva foi calculada para os três comprimentos de onda de acordo com a ordem de modulação e com a largura de faixa empregada. A Figura 28 exibe o  $EVM_{RMS}$  em função da vazão efetiva para as quatro ordens de modulação na distância de 0,75 m. A Figura 28 (a) mostra os resultados para o LED vermelho, a Figura 28 (b) para o LED azul e a Figura 28 (c) para o LED verde. Os gráficos da Figura 28 também mostram os limites de  $EVM_{RMS}$  do 3GPP para cada ordem de modulação, o qual a vazão efetiva deve manter-se abaixo.

Observa-se que, para todas as ordens de modulação, o  $EVM_{RMS}$  cresce em função da vazão. Esse comportamento ocorre em consequência do aumento da largura de faixa do sinal modulante que, por sua vez, exige maior potência de RF para manter a SNR. Por outro lado, ordens de modulação maiores requerem menores  $EVM_{RMS}$  para atingir a mesma BER, razão pela qual o aumento da ordem de modulação não necessariamente reflete no aumento da vazão de dados. Desta forma, verifica-se uma relação de compromisso entre a largura de faixa e a ordem de modulação para propiciar maior vazão efetiva, satisfazendo o limite de  $EVM_{RMS}$ .





**Figura 28** -  $EVM_{RMS}$  em função da vazão efetiva para sinal 5G NR, em 0,75 cm.  
a) LED vermelho; b) LED azul; c) LED verde.

Conforme esperado a maior vazão efetiva foi obtida pelo LED vermelho seguido pelos LEDs azul e verde, nessa ordem. A Tabela 10 exibe esses valores bem com os parâmetros utilizados (frequência de operação, ordem de modulação e largura de faixa) para obtenção dos resultados. Somando as vazões efetivas dos três LEDs, alcançaram-se 872 Mbit/s.

**Tabela 10**- Parâmetros utilizados para máxima vazão efetiva no padrão 5G NR.

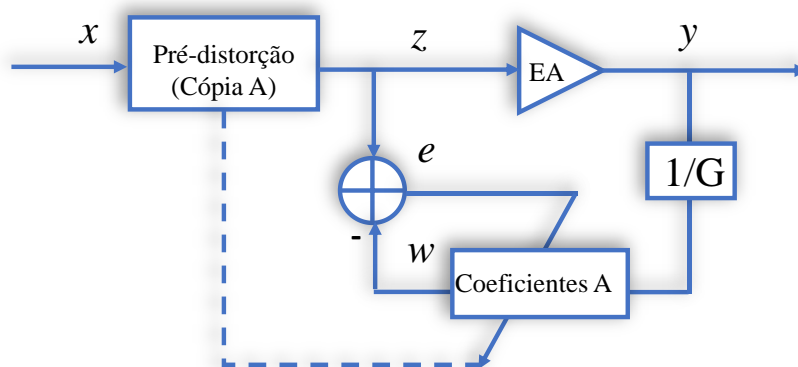
LED	Frequência (MHz)	Largura de faixa (MHz)	Ordem de modulação	Vazão Efetiva (Mbit/s)
Vermelho	79	100	64-QAM	438
Verde	51	50	16-QAM	142
Azul	79	100	16-QAM	292

Adicionalmente, analisou-se a máxima vazão efetiva do enlace VLC WDM para um sinal  $M$ -QAM empregando a técnica de pré-distorção digital (DPD). Nesse experimento, utilizou-se o  $VSG_2$  para geração do sinal de RF e o  $VSA_2$  para

demodulação. Assim como foi feito na análise do sinal 5G NR, os três LEDs foram modulados, simultaneamente, por sinais de RF de características semelhantes (frequência, largura de faixa e amplitude). Porém, analisou-se somente um comprimento de onda por vez e o sinal  $M$ -QAM com DPD foi modulado no respectivo comprimento de onda de análise.

A técnica DPD é empregada para compensar a resposta não linear dos amplificadores elétricos, os quais distorcem os sinais amplificados [95]. Essas distorções geram produtos de intermodulação que interferem tanto no sinal a ser transmitido, quanto nas frequências adjacentes [96]. Basicamente, em um sistema com DPD, o sinal de entrada é distorcido de maneira que, ao passar pelo amplificador elétrico, obtenha-se um sinal linearmente amplificado na saída. Os deslocamentos de fase provocados pelos amplificadores também são reduzidos com o uso de DPD [95,97].

Utilizou-se o *software* W1416 DPD do fabricante Keysight® instalado no VSA<sub>2</sub> e no VSG<sub>2</sub> para implementação da DPD. Esse *software* é baseado no modelo de aprendizagem indireta de memória polinomial, cuja saída do sistema depende não somente da entrada atual, mas também dos instantes anteriores [95]. A Figura 29 mostra o diagrama em blocos implementado por W1416 DPD [98].

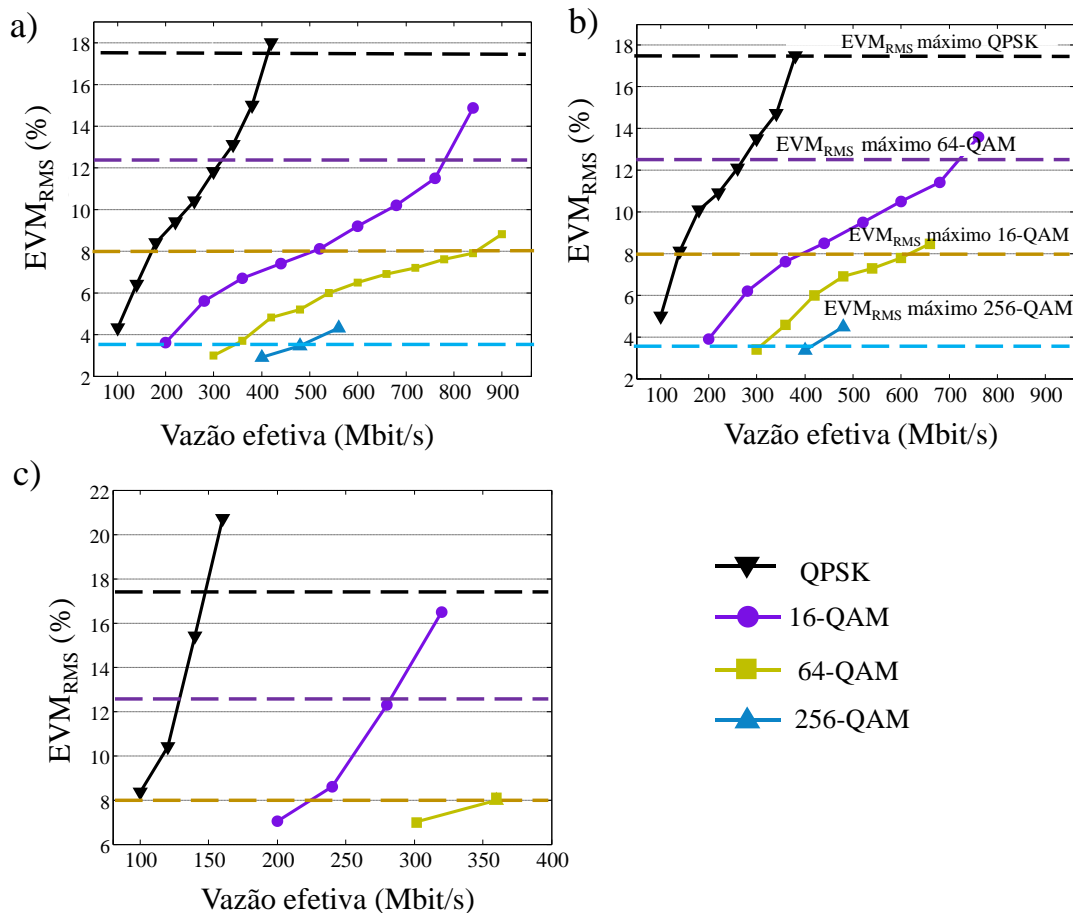


**Figura 29** – Diagrama em blocos sistema DPD implementado por W1416 [adaptado de [98]].

Nesse diagrama, o bloco Coeficientes A estima os coeficientes necessários para compensar a resposta não linear dos amplificadores elétricos (EA). Na sequência, esses coeficientes são copiados para o bloco de Pré-distorção a fim de distorcer o sinal de entrada  $x$ . No processo iterativo para concepção dos coeficientes A, utiliza-se a saída  $y$  (dividida pelo ganho  $G$  pretendido do EA) para geração do sinal distorcido  $w$ . Esse sinal é então comparado com o sinal  $z$  da saída do bloco Pré-distorção e o erro ( $e$ ) entre  $w$  e  $z$

é utilizado para geração dos coeficientes A. O processo converge quando o erro quadrático médio é minimizado [98].

Empregou-se a mesma metodologia utilizada na análise da máxima vazão efetiva do sinal 5G NR, ou seja, alterou-se a largura de faixa do sinal modulante e, a partir da ordem de modulação empregada, calculou-se a vazão efetiva. Utilizaram-se as seguintes larguras de faixa: 50 MHz, 60 MHz, 70 MHz, 80 MHz, 100 MHz, 120 MHz, 140 MHz, 150 MHz, 160 MHz, 180 MHz e 200 MHz. A Figura 30 mostra o comportamento da curva de  $EVM_{RMS}$  em função da vazão para os três LEDs em 0,75 m. A Figura 30 (a) exibe os resultados para o LED vermelho, a Figura 30 (b) para o LED azul e a Figura 30 (c) para o LED verde. Mantiveram-se, nessa análise, os mesmos limites de  $EVM_{RMS}$  definidos pelo 3GPP para o sinal 5G NR.



**Figura 30** -  $EVM_{RMS}$  em função da vazão efetiva para o sinal M-QAM com DPD, em 0,75 cm. a) LED vermelho; b) LED azul; c) LED verde.

A linearização da banda de amplificação dos EAs, oriunda do uso de DPD, propiciou o emprego de larguras de faixa maiores que as larguras de faixa empregadas com o sinal 5G NR. Esse aumento reflete na máxima vazão efetiva de 1,92 Gbit/s

atingida pelo enlace, somando as vazões máximas dos três LEDs. A Tabela 11 exibe a máxima vazão efetiva alcançada por cada LED bem como os parâmetros utilizados para obtenção dos resultados. Vale ressaltar que os resultados obtidos com os sinais *M-QAM* servem apenas como uma prova de conceito, pois a ausência de sinais de controle e de sincronismo nessa forma de onda, inviabiliza a implementação desse sinal em um sistema de telecomunicação real.

**Tabela 11** - Parâmetros utilizados para máxima vazão efetiva com o sinal *M-QAM* com *DPD*.

LED	Frequência (MHz)	Largura de faixa (MHz)	Ordem de modulação	Vazão Efetiva (Mbit/s)
Vermelho	103	140	64-QAM	840
Verde	51	60	64-QAM	360
Azul	127	180	16-QAM	720

Os resultados mostraram a flexibilidade do sistema VLC em lidar com diferentes formas de onda sem a necessidade de adaptações na estrutura do sinal de RF. A técnica WDM mostrou-se promissora para aumentar vazão efetiva do enlace VLC, operando tanto com o sinal 5G NR quanto com o sinal *M-QAM* com *DPD*. Além disso, demonstrou-se que a técnica *DPD* pode ser empregada nos sistemas VLC WDM para compensar os efeitos não lineares dos EAs. Esses resultados ratificam o potencial da tecnologia VLC para atender o cenário eMBB em ambientes *indoors*.

## Capítulo 4

# Compartilhamento das *Attocells* Ópticas por Diferentes Tecnologias

Conforme apresentado no capítulo 3, os sistemas VLC baseados em LED podem ser implementados em ambientes *indoor* para fornecer, simultaneamente, alta vazão de dados e a iluminação do ambiente. Porém, em um mesmo cômodo, podem existir demandas por diferentes sinais de RF como: Wi-Fi, LTE, 5G NR, NB-IoT (*narrowband Internet of things*), etc.

Nesse contexto, as *attocell* ópticas podem ser utilizadas para a transmissão simultânea de padrões de telecomunicações distintos e/ou trabalhar em conjunto com os sinais de RF. Adicionalmente, a infraestrutura VLC pode ser utilizada pelos padrões de telecomunicações futuros como o 6G [99] [100]. A Figura 31 ilustra o compartilhamento do feixe de luz por diferentes padrões de telecomunicações. Observa-se uma única *attocell* óptica transmitindo gerações de telefonia móveis atuais e futuros, em um cômodo.

Complementarmente, a técnica de agregação de portadoras pode ser empregada nos enlaces VLC para aumentar a vazão efetiva dos usuários dos padrões LTE e 5G NR. Por meio dessa técnica, é possível elevar o número de portadoras alocadas por usuário, propiciando larguras de faixa maiores em relação ao máximo que poderia ser atingido com apenas uma portadora [76].



**Figura 31** - Ilustração do compartilhamento do feixe de luz por diferentes padrões de telecomunicações.

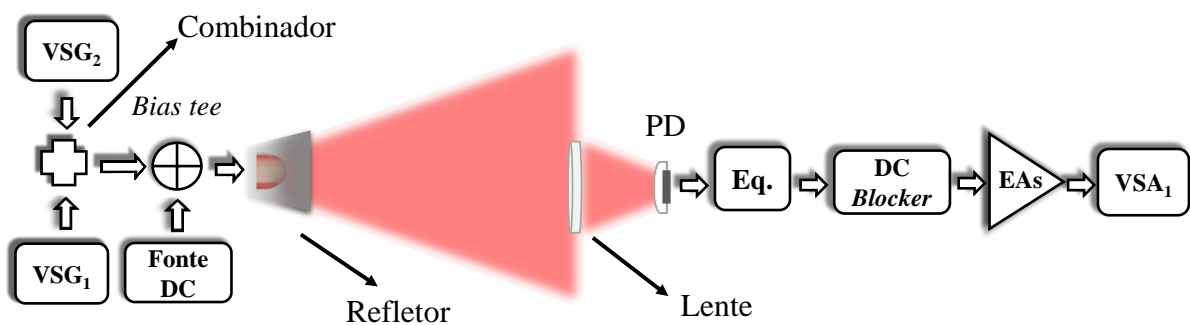
Como discutido no capítulo 1, a largura de faixa do LED é um dos principais fatores limitantes da vazão do sistema VLC. Além disso, a escassez desse recurso limita o número de usuário atendidos por uma *attocell* óptica, ou seja, o aumento do número de dispositivos levaria a sobrecarga do sistema. Fazendo uma analogia aos sistemas de transmissão por RF, o congestionamento nos sistemas VLC assemelha-se ao congestionamento do espectro de RF para frequências inferiores a 6 GHz [101]. Por conseguinte, a alocação dos sinais que serão transmitidos por uma *attocell* óptica deve ser feita de forma a suportar a maior vazão e/ou atender o maior número de usuários possíveis. O padrão IEEE 802.15.7 para enlaces OWC de curto alcance segmenta a largura de faixa da fonte transmissora para a operação de diferentes camadas físicas, que podem ou não ter a mesma forma de onda [102]. Além disso, a norma ITU-T 999.1 para transceptores VLC *indoor* evidencia o tópico de coexistência como estudo futuro nos enlaces VLC [103].

Nesse cenário, analisou-se, em tempo real, a transmissão simultânea do sinal 5G NR e do sinal *M-QAM* e avaliou-se desempenho da técnica de agregação de portadoras em termos de  $EVM_{RMS}$ . Exploraram-se duas arquiteturas: a primeira utilizando uma portadora óptica combinando eletricamente os sinais modulantes, e a

segunda utilizando duas portadoras ópticas, cada uma delas transportando uma forma de onda. Os sinais gerados foram transmitidos em um enlace VLC de 0,75 m.

## 4.1 Arranjos Experimentais

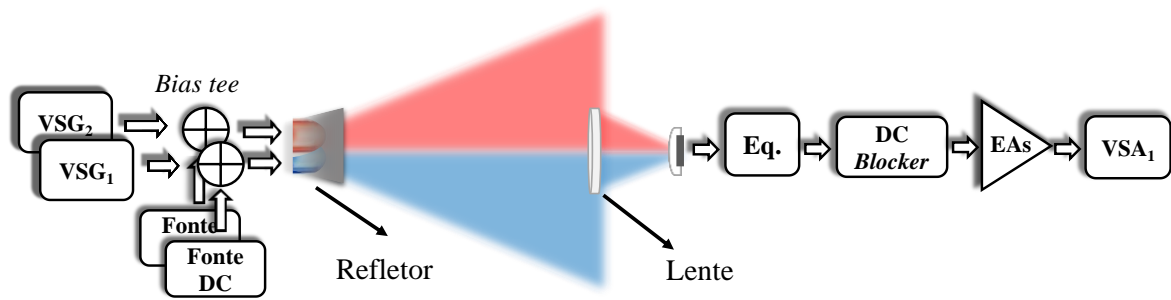
A Figura 32 a seguir, mostra o diagrama em blocos do arranjo experimental da primeira arquitetura denominada Arranjo<sub>1</sub>. Nesse arranjo, duas formas de onda distintas foram combinados eletricamente, por meio de um combinador de potência resistivo (SP11R2M) antes de modular a portadora óptica. Utilizou-se o LED vermelho em razão do seu melhor desempenho em relação aos demais LEDs.



**Figura 32-** Diagrama em blocos do Arranjo<sub>1</sub>.

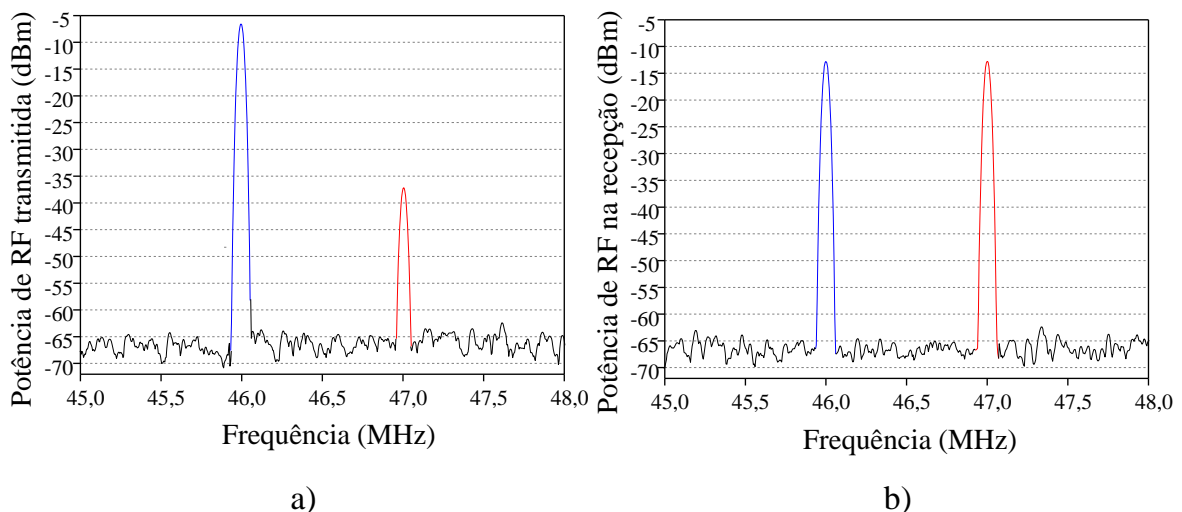
O VSG<sub>1</sub> gerou o sinal 5G NR, enquanto o VSG<sub>2</sub> criou o sinal M-QAM. O combinador elétrico possui perdas de inserção de 6 dB, o que implica em reduzir em quatro vezes as potências dos sinais modulantes, quando comparado ao emprego de apenas um VSG. Utilizou-se o VSA<sub>1</sub> para demodular ambos os sinais recebidos.

Na segunda arquitetura (Arranjo<sub>2</sub>), utilizaram-se duas portadoras ópticas, cada uma modulada por uma forma de onda. O LED azul foi modulado pelo sinal 5G NR, enquanto o LED vermelho foi modulado pelo sinal M-QAM. A Figura 33 exibe o diagrama em blocos do Arranjo<sub>2</sub>. Ajustou-se o posicionamento da lente receptora, visando garantir que a potência elétrica gerada pelo LED azul se aproximasse da potencia elétrica gerada pelo LED vermelho. Embora essa condição não seja essencial para operação do Arranjo<sub>2</sub>, ela propiciou circunstâncias de operação mais próximas do Arranjo<sub>1</sub>, uma vez que se manteve os mesmos níveis de potência dos sinais modulantes.



**Figura 33** - Diagrama em blocos do Arranjo<sub>2</sub>.

Para assegurar que o nível de potência de RF gerado pelo LED azul ficasse próximo do nível de potência de RF gerada pelo vermelho, modulou-se cada LED com uma portadora contínua (CW - *continuous wave*) espaçadas de 1 MHz, e monitorou-se os níveis de potência gerados na recepção a cada ajuste no posicionamento da lente. A Figura 34 exibe o espectro dos sinais recebidos em duas situações: Figura 34 (a) ajustando o posicionamento da lente receptora para maximizar a potência da CW do LED azul, e Figura 34 (b) calibrando o posicionamento da lente receptora para manter o mesmo nível de potência da CW para ambos os LEDs.



**Figura 34** - Espectro elétrico na recepção de duas CWs transmitidas pelo LED azul e pelo LED vermelho. a) Maximizando a potência do LED azul; b) Mantando as potências no mesmo nível.

Apesar do ajuste no posicionamento da lente propiciar níveis de potências de RF semelhantes para o LED vermelho e azul, percebe-se que o nível máximo gerado pelo LED azul sofreu uma penalidade de aproximadamente 7 dB. Essa variação é provocada pela alteração no nível de potência óptica que chega à recepção, pois ao modificar o posicionamento da lente, altera-se o ângulo de recepção do feixe de luz e/ou



a distância do enlace (Equação (2.32)). Devido à grande influência desses parâmetros, um sistema de calibração automática poderia ser implementado na recepção para manipulação da potência elétrica fofodetectada.

Os componentes do circuito de recepção do Arranjo<sub>1</sub> e do Arranjo<sub>2</sub> são os mesmos empregados nas análises do capítulo 3, ou seja, utilizou-se: um micro posicionador, uma lente plano-convexa (LA1027-C), um fotodiodo de silício (ET-2030), um circuito de equalização RLC, um DC *Blocker*, quatro amplificadores de RF (Tabela 8) e um VSA<sub>1</sub> (FSW-8351). Manteve-se os mesmos valores de corrente de *bias* dos LEDs vermelho (690 mA) e azul (700 mA) utilizado nas análises experimental do capítulo 3. A Figura 35 exibe a fotografia do arranjo experimental, operando com duas portadoras ópticas em concordância com o diagrama em blocos da Figura 33.

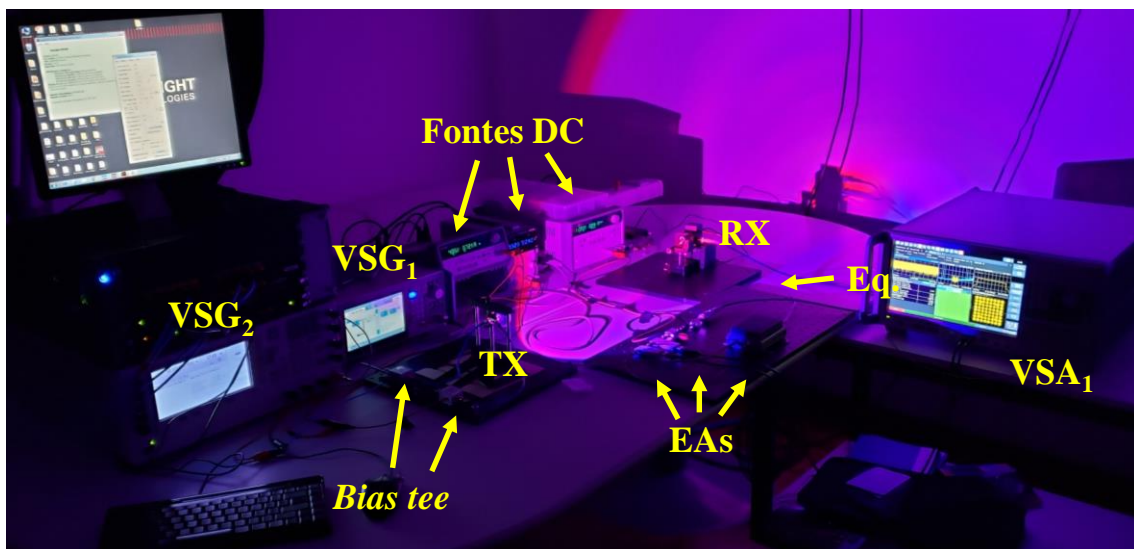
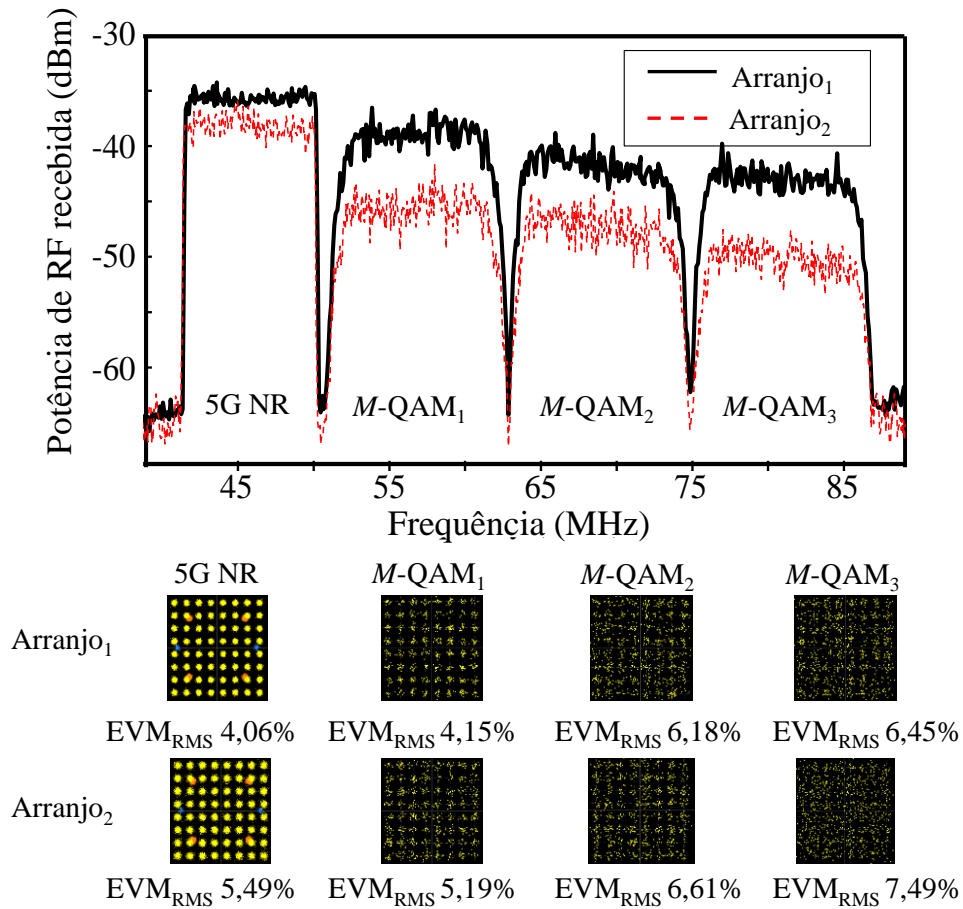


Figura 35 - Fotografia do Arranjo<sub>2</sub>.

## 4.2 Resultados Experimentais

Avaliou-se o desempenho das duas arquiteturas propostas em termos de  $EVM_{RMS}$  para as seguintes configurações: sinal 5G NR com largura de faixa de 10 MHz e ordem de modulação 64-QAM centrado na frequência de 46 MHz; três bandas de sinais 64-QAM todas com largura de faixa de 12 MHz centradas nas frequências 57, 69 e 81 MHz, nomeadas respectivamente como  $M\text{-QAM}_1$ ,  $M\text{-QAM}_2$  e  $M\text{-QAM}_3$ . Essa configuração representa a agregação de três portadoras contínuas no espectro de frequência [76] que pode ser utilizada para triplicar a vazão efetiva de um único usuário.

A Figura 36 exibe o espectro dos sinais recebidos, bem como as constelações e os referidos valores  $EVM_{RMS}$  medidos.



**Figura 36** - Espectro dos sinais recebidos com as respectivas constelações aferidas, para o Arranjo<sub>1</sub> e Arranjo<sub>2</sub>.

Percebe-se um desempenho inferior do Arranjo<sub>2</sub> em relação ao Arranjo<sub>1</sub>. Isso ocorre em virtude da diminuição da potência óptica recebida, causada pelos ajustes no posicionamento da lente receptora para captar, simultaneamente, os feixes de luzes azul e vermelho. Ou seja, ao invés de maximizar o nível de potência óptica de apenas um comprimento de onda, buscou-se um valor intermediário para atender aos dois LEDs. Esse comportamento pode ser observado por meio do monitoramento da potência de RF na recepção, conforme apresentado na Figura 34.

Observa-se, em ambos os arranjos, a diminuição dos níveis de potência dos sinais recebidos em função do aumento da frequência de operação. Isso ocorre devido à resposta em frequência do LED, que possui menor atenuação para frequências mais próximas da banda base [41,42]. A diminuição no nível de potência recebida implica na diminuição da SNR e, por conseguinte, degrada o desempenho do sinal em termos de

$EVM_{RMS}$ . As constelações evidenciam a diferença de desempenho entre os quatro sinais transmitidos. Em todos os casos, o  $EVM_{RMS}$  ficou abaixo do limite do 3GPP para modulação 64-QAM, o que representa uma vazão efetiva de 38 Mbit/s com o sinal 5G NR e de 180 Mbit/s com a agregação das três portadoras 64-QAM.

Os resultados mostraram a operabilidade das duas arquiteturas apresentadas e demonstraram a possibilidade do compartilhamento da *attocell* óptica por diferentes formas de onda. Além disso, evidenciou-se que a técnica de agregação de portadoras pode ser empregada nos enlaces VLC para aumentar a vazão efetiva dos usuários.

# Capítulo 5

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho fundamentou-se no uso da tecnologia VLC baseado em LEDs para prover acesso às redes 5G e futuras gerações de telefonia móvel em ambiente *indoor*. Explorou-se quatro comprimentos de onda no espectro visível para a transmissão do sinal 5G NR. A análise de desempenho do sistema foi realizada em termos de  $EVM_{RMS}$  e em função da vazão efetiva, da distância do enlace, da corrente de *bias* e do espaçamento espectral entre sinais transmitidos em uma ou mais portadoras ópticas. Destacam-se como principais contribuições: a análise em tempo real do recém-lançado padrão 5G NR em sistemas VLC; a implementação do sinal 5G NR em um sistema VLC WDM com uso de equalização na recepção para compensar a resposta em frequência do LED; o uso da técnica de DPD para compensar os efeitos não lineares dos amplificadores elétricos empregados no sistema VLC WDM; análise do compartilhamento da *attocell* óptica por diferentes tecnologias e a utilização da técnica de agregação de portadoras.

O Capítulo 1 abordou as novas exigências das redes de telefonia móveis e as estratégias adotadas para atender aos diferentes cenários. Nesse contexto, apresentou-se a tecnologia VLC baseada em LEDs como uma alternativa para compor a camada física das redes 5G, visando aplicações eMBB em ambientes *indoors*. Ainda no capítulo 1, mostrou-se as diferentes tecnologias de comunicações ópticas sem fio com destaque para a evolução dos sistemas VLC baseados LED. A revisão bibliográfica da literatura

norteou o desenvolvimento do trabalho e propiciou o emprego de técnicas no arranjo experimental para o aumento da vazão efetiva.

Apresentaram-se, no Capítulo 2, as características dos sistemas VLC com enfoque nas particularidades dos LEDs como fonte transmissora de dados e iluminação de ambientes, e no fotodiodo para recepção e conversão O/E. Relatou-se o equacionamento para os cálculos da eficiência do LED, responsividade do fotodiodo, ruídos na recepção, SNR e perdas de transmissão. Ainda no capítulo 2, apresentaram-se as características do sinal 5G NR de acordo com a Release 15 do 3GPP e o cálculo da máxima vazão efetiva.

O Capítulo 3 expôs análises numéricas e experimentais do sistema VLC WDM em um enlace de visada direta. Abordou-se as características dos componentes utilizados no arranjo experimental e as estratégias empregadas para a implementação dos enlaces. Avaliou-se o desempenho individual em termos de  $EVM_{RMS}$  e vazão efetiva de quatro portadoras ópticas (vermelha, verde, azul e âmbar). Em seguida, utilizou-se as três portadoras ópticas de melhor desempenho para implementação do sistema VLC WDM. Obteve-se, para um alcance de 75 cm, uma vazão efetiva de 872 Mbit/s com o padrão 5G NR e de 1,92 Gbit/s com o uso da forma de onda *M*-QAM e pré-distorção digital.

Por fim, no Capítulo 4, realizou-se o compartilhamento da *attocell* óptica por duas formas de ondas distintas, visando atender às diferentes tecnologias em um mesmo ambiente. Duas arquiteturas foram propostas e avaliadas: na primeira, combinaram-se eletricamente os sinais de RF e modulando uma portadora óptica e na segunda, modulou-se duas portadoras ópticas, cada uma com formato de onda diferente. Posteriormente, a técnica de agregação de portadoras para aumentar a vazão efetiva dos usuários foi implementada e avaliada.

Os resultados apresentados mostram que os sistemas VLC baseados em LED podem ser utilizados para a transmissão do novo padrão 5G NR sem a necessidade de adaptações na estrutura do sinal. A flexibilidade dos enlaces VLCs viabiliza a transmissão de diferentes tecnologias em um único ponto de acesso, possibilitando atender a demanda por diferentes padrões de telecomunicações em um mesmo ambiente. Diante do exposto, ratifica-se o potencial da tecnologia VLC como uma alternativa para suprir o consumo cada vez maior de dados em ambientes *indoors*.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- A utilização da técnica de DPD em conjunto com o sinal 5G NR;
- A análise experimental do sinal 5G NR em um enlace PLC VLC utilizando as infraestruturas convencionais da rede elétrica;
- A implementação de uma rede celular real em um sistema OWC híbrido, onde o *fronthaul* seja realizado pela tecnologia FSO e o ponto de acesso pela tecnologia VLC;
- A análise experimental da calibração do posicionamento entre o transmissor e o receptor, implementando diferentes algoritmos de posicionamento

## Referências Bibliográficas

- [1] Cisco, "*Cisco Visual Networking Index: Globale DataTraffic Forecast Update, 2017-2022*", White Paper, 2019.
- [2] IMT-2020 (5G) Promotion Group, *5G Concept*, White Paper, 2015.
- [3] Xiang, Wei, Kan Zheng, and Xuemin Sherman Shen, eds. *5G mobile communications*. Springer, 2017.
- [4] Osseiran, Afif, et al. "*Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project.*" *IEEE communications magazine* 52.5 (2014): 26-35.
- [5] Keysight Technologies, "*Overcoming new radio device design challenges series part 1: 5G new radio standard*", White Paper, 2018.
- [6] ETSI, *Service requirements for next generation new services and markets*, 3GPP TS 22.261 version 15.7.0 Release 15, 2019.
- [7] Ghassemlooy, Zabih, et al. "*Emerging optical wireless communications-advances and challenges.*" *IEEE journal on selected areas in communications* 33.9 (2015): 1738-1749.
- [8] Rappaport, Theodore S., et al. "*Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!.*" *IEEE access* 1 (2013): 335-349.
- [9] Rangan, Sundeep, Theodore S. Rappaport, and Elza Erkip. "*Millimeter wave cellular wireless networks: Potentials and challenges.*" *arXiv preprint arXiv:1401.2560* (2014).
- [10] Muirhead, David, Muhammad Ali Imran, and Kamran Arshad. "*Insights and approaches for low-complexity 5G small-cell base-station design for indoor dense networks.*" *IEEE access* 3 (2015): 1562-1572.
- [11] ETSI, *User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone*, 3GPP TS 38.101-1 version 15.3.0 Release 15, 2018.
- [12] ETSI, *User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2*

*Standalone*, 3GPP TS 38.101-2 version 15.2.0 Release 15, 2018.

- [13] Keysight Technologies, "*overcoming new radio device design challenges series part 2: millimeter-wave spectrum*", White Paper, 2018.
- [14] Huang, Li, Guangxi Zhu, and Xiaojiang Du. "*Cognitive femtocell networks: an opportunistic spectrum access for future indoor wireless coverage.*" *IEEE wireless communications* 20.2 (2013): 44-51.
- [15] ITU-R M.2243, "*Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for international mobile telecommunications*", 2011.
- [16] Khan, Latif Ullah. "*Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges.*" *Digital Communications and Networks* 3.2 (2017): 78-88.
- [17] Elgala, Hany, Raed Mesleh, and Harald Haas. "*Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art.*" *IEEE Communications Magazine* 49.9 (2011): 56-62.
- [18] Koonen, Ton. "*Indoor optical wireless systems: technology, trends, and applications.*" *Journal of Lightwave Technology* 36.8 (2017): 1459-1467.
- [19] Rajbhandari, Sujana, et al. "*High-speed integrated visible light communication system: Device constraints and design considerations.*" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 33.9 (2015): 1750-1757.
- [20] Wu, Shaoen, Honggang Wang, and Chan-Hyun Youn. "*Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications.*" *Ieee Network* 28.6 (2014): 41-45.
- [21] Al-Kinani, Ahmed, et al. "*Optical wireless communication channel measurements and models.*" *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20.3 (2018): 1939-1962.
- [22] Uysal, Murat, et al. "*Visible light communication for vehicular networking: performance study of a V2V system using a measured headlamp beam pattern model.*" *IEEE Vehicular Technology Magazine* 10.4 (2015): 45-53.
- [23] Feng, Lifang, et al. "*Applying VLC in 5G networks: Architectures and key technologies.*" *IEEE Network* 30.6 (2016): 77-83.
- [24] Chowdhury, Mostafa Zaman, et al. "*6G wireless communication systems:*



*Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions.*" arXiv preprint arXiv:1909.11315 (2019).

- [25] Dath, Cheikh Amadou Bamba, and Ndèye Arame Boye Faye. "Resilience of long range free space optical link under a tropical weather effects." *Scientific African* 7 (2020): e00243.
- [26] Kaur, Gurpreet, et al. "Simulative Investigation of Long-Range 32x3 Gbps WDM-FSO Link Under Different Weather Attenuation Conditions." *Int. J. Adv. Sci. Technol.* 102 (2017): 27-34.
- [27] Liolis, Konstantinos, et al. "Use cases and scenarios of 5G integrated satellite-terrestrial networks for enhanced mobile broadband: The SaT5G approach." *International Journal of Satellite Communications and Networking* 37.2 (2019): 91-112.
- [28] Huang, Tongyi, et al. "A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies." *IEEE Access* 7 (2019): 175758-175768.
- [29] Bloom, Scott, et al. "Understanding the performance of free-space optics." *Journal of optical Networking* 2.6 (2003): 178-200.
- [30] Liu, Xiaoyan, et al. "Gbps long-distance real-time visible light communications using a high-bandwidth GaN-based micro-LED." *IEEE Photonics Journal* 9.6 (2017): 1-9.
- [31] Chen, Yingcong, et al. "Long-range visible light communication system based on LED collimating lens." *Optics Communications* 377 (2016): 83-88.
- [32] *Status of IEEE 802.11 Light Communication TG. Acessado: 26 julho 2019. Disponível: [http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb_update.htm).*
- [33] Koonen, Ton, et al. "High-capacity optical wireless communication using two-dimensional IR beam steering." *Journal of Lightwave Technology* 36.19 (2018): 4486-4493.
- [34] Holguin-Lerma, Jorge A., et al. "480-nm distributed-feedback InGaN laser diode for 10.5-Gbit/s visible-light communication." *Optics Letters* 45.3 (2020): 742-745.
- [35] Xie, Enyuan, et al. "Over 10 Gbps VLC for long-distance applications using a GaN-based series-biased micro-LED array." *IEEE Photonics Technology Letters* 32.9 (2020): 499-502.

- [36] Esmail, Maged Abdullah, et al. "*Experimental demonstration of outdoor 2.2 Tbps super-channel FSO transmission system.*" 2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). IEEE, 2016.
- [37] Kim, Byung Gon, Sung Hyun Bae, and Yun C. Chung. "*294-Gb/s CPRI-Equivalent-Rate Radio-over-Fiber Mobile Fronthaul Network Using a 1.55- $\mu$ m DML and Dispersion-Induced CSO Cancellation.*" 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2017.
- [38] O'Brien, Dominic C., et al. "*Visible light communications: Challenges and possibilities.*" 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. IEEE, 2008.
- [39] Huang, Xingxing, et al. "*1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver.*" *Optics express* 23.17 (2015): 22034-22042.
- [40] Song, Jian, et al. "*An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC.*" *IEEE Transactions on Broadcasting* 61.2 (2015): 299-308.
- [41] O'Brien, Dominic, et al. "*Indoor visible light communications: challenges and prospects.*" *Free-Space Laser Communications VIII*. Vol. 7091. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [42] Huang, Xingxing, et al. "*750Mbit/s visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit.*" 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2015.
- [43] Grubor, J., et al. "*High-speed wireless indoor communication via visible light.*" *ITG fachbericht* 198 (2007): 203.
- [44] Wang, Yiguang, et al. "*Efficient MMSE-SQRD-based MIMO decoder for SEFDM-based 2.4-Gb/s-spectrum-compressed WDM VLC system.*" *IEEE Photonics Journal* 8.4 (2016): 1-9.
- [45] LED Engin, *High luminous efficacy cool white LED emitter LZ1-00CW02*, Datasheet, 2018.
- [46] LED Engin, *High luminous efficacy RGBA LED emitter LZ4-00MA00*, Datasheet, 2018.
- [47] Le Minh, Hoa, et al. "*80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED.*" 2008 34th European Conference on Optical Communication.

*IEEE*, 2008.

- [48] Jiang, Junyi, et al. "Video streaming in the multiuser indoor visible light downlink." *IEEE Access* 3 (2015): 2959-2986.
- [49] Cui, Lu, et al. "Analysis of the multichannel WDM-VLC communication system." *Journal of Lightwave Technology* 34.24 (2016): 5627-5634.
- [50] Sifaou, Housseem, et al. "Robust transceivers design for multi-stream multi-user MIMO visible light communication." *IEEE Access* 5 (2017): 26387-26399.
- [51] Vs, Rakesh Krishna, and Ivan B. Djordjevic. "MIMO-WDM Visible Light Communications Based on Commercial RGBA LEDs." 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2018.
- [52] Mejia, Carlos E., and Costas N. Georghiades. "Coding for visible light communication using color-shift keying constellations." *IEEE Transactions on Communications* 67.7 (2019): 4955-4966.
- [53] Mathias, Luis Carlos, Jose Carlos Marinello Filho, and Taufik Abrao. "Predistortion and pre-equalization for nonlinearities and low-pass effect mitigation in ofdm-vlc systems." *Applied optics* 58.19 (2019): 5328-5338.
- [54] Chou, Hsi-Hsir, and Cheng-Yu Tsai. "Demonstration of micro-projection enabled short-range communication system for 5G." *Optics express* 24.12 (2016): 13075-13080.
- [55] Na, Zhenyu, et al. "Modeling and throughput analysis of an ADO-OFDM based relay-assisted VLC system for 5G networks." *IEEE Access* 6 (2018): 17586-17594.
- [56] Baig, Sobia, et al. "High data rate discrete wavelet transform-based PLC-VLC design for 5g communication systems." *IEEE Access* 6 (2018): 52490-52499.
- [57] Shi, Lina, et al. "Experimental 5G new radio integration with VLC." 2018 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). IEEE, 2018.
- [58] Vegni, Anna Maria, and Mauro Biagi. "Optimal LED placement in indoor VLC networks." *Optics express* 27.6 (2019): 8504-8519.
- [59] Wei, Liang-Yu, et al. "Tricolor visible-light laser diodes based visible light communication operated at 40.665 Gbit/s and 2 m free-space transmission."

- Optics express 27.18 (2019): 25072-25077.
- [60] Valluri, Siva Prasad, Vejandla Kishore, and Venkata Mani Vakamulla. "A New Selective Mapping Scheme for Visible Light Systems." *IEEE Access* 8 (2020): 18087-18096.
- [61] Monteiro, Felipe T., et al. "Experimental evaluation of pulse shaping based 5G multicarrier modulation formats in visible light communication systems." *Optics Communications* 457 (2020): 124693.
- [62] Kahn, Joseph M., and John R. Barry. "Wireless infrared communications." *Proceedings of the IEEE* 85.2 (1997): 265-298.
- [63] Ghassemlooy, Zabih, Wasiu Popoola, and Sujjan Rajbhandari. *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC press, 2019.
- [64] Sze, Simon M., and Kwok K. Ng. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & sons, 2006.
- [65] Agrawal, Govind P. *Fiber-optic communication systems*. Vol. 222. John Wiley & Sons, 2012.
- [66] Schubert, E. Fred. *Light-Emitting Diodes (2006)*. E. Fred Schubert, 2006.
- [67] Keiser, Gerd. *Comunicações por Fibras Ópticas-4*. AMGH Editora, 2014.
- [68] Cho, Jaehee, et al. "White light-emitting diodes: History, progress, and future." *Laser & photonics reviews* 11.2 (2017): 1600147.
- [69] Bergh, A. A., and J. A. Copeland. "Optical sources for fiber transmission systems." *Proceedings of the IEEE* 68.10 (1980): 1240-1247.
- [70] Tornatore, Massimo, Gee-Kung Chang, and Georgios Ellinas. *Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks*. Berlin: Springer, 2017.
- [71] Ng'oma, Anthony. *Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems*. Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [72] Ndjiongue, Alain Richard, Hendrik C. Ferreira, and Telex MN Ngatched. "Visible light communications (VLC) technology." *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (1999): 1-15.
- [73] Moreira, Adriano JC, Rui T. Valadas, and A. M. de Oliveira Duarte. "Optical interference produced by artificial light." *Wireless Networks* 3.2 (1997):

131-140.

- [74] Ribeiro, José Antônio Justino. *Propagação das ondas eletromagnéticas: princípios e aplicações*. Érica, 2004.
- [75] Xie, Ruijie, et al. "Signal attenuation of visible light communication in smoke environment." *Optical Engineering* 58.11 (2019): 114102.
- [76] Dahlman, Erik, Stefan Parkvall, and Johan Skold. *5G NR: The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2018.
- [77] Kottkamp M., et al. "5G New Radio fundamentals, procedures, testing aspects." Rohde&Schwarz GmbH & Co. KG, 2019.
- [78] ETSI, *5G; NR; Overall description; Stage-2*, 3GPP TS 38.300 version 15.3.1 Release 15, 2018.
- [79] Abdoli, Javad, Ming Jia, and Jianglei Ma. "Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems." 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2015.
- [80] Proakis, John G., and Masoud Salehi. *Digital communications*. Vol. 4. New York: McGraw-hill, 2001.
- [81] S. de Tomasi. "5G Flexible Numerology – Defining What It Is and Explaining Why You Should Care" *Keysight Blog*. Disponível em: [https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2018/09/07/5g\\_flexible\\_numero-XHto.html](https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2018/09/07/5g_flexible_numero-XHto.html). Acesso em: 5 ago. 2020.
- [82] Bag, Tanmoy, et al. "Multi-numerology based resource allocation for reducing average scheduling latencies for 5G NR wireless networks." 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). IEEE, 2019.
- [83] ETSI, *5G; NR; User Equipment (UE) radio access capabilities*, 3GPP TS 38.306 version 15.3.0 Release 15, 2018.
- [84] ETSI, *5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone*, 3GPP TS 38.101-1 version 15.3.0 Release 15, 2018.
- [85] Roupheal, Tony J. *RF and digital signal processing for software-defined radio: a multi-standard multi-mode approach*. Newnes, 2009.
- [86] Mahmoud, Hisham A., and Huseyin Arslan. "Error vector magnitude to SNR conversion for nondata-aided receivers." *IEEE Transactions on Wireless*

- Communications 8.5 (2009): 2694-2704.
- [87] ETSI, *5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception*, 3GPP TS 38.104 version 15.5.0 Release 15, 2019.
- [88] ITU-T Recommendation G.975.1 (2004), Appendix I.9.
- [89] Cho, Junho, Chongjin Xie, and Peter J. Winzer. "Analysis of soft-decision FEC on non-AWGN channels." *Optics express* 20.7 (2012): 7915-7928.
- [90] LED Engin, *High Luminous Efficacy LZ4-00MA00*, Datasheet. Disponível em: [https://br.mouser.com/datasheet/2/228/5412901\\_2520LED\\_2520Engin\\_Datasheet\\_LuxiGen\\_LZ4-00-1531987.pdf](https://br.mouser.com/datasheet/2/228/5412901_2520LED_2520Engin_Datasheet_LuxiGen_LZ4-00-1531987.pdf). Acesso em: 5 fev. 2020.
- [91] Mini-circuits, *Coaxial BiasTee ZFBT-282-1.5A+*, Datasheet. Disponível em: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZFBT-282-1.5A+.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- [92] Electro-Optics Technology, Inc. *>10 GHz Photodetectors*. Datasheet. Disponível em: <https://www.eotech.com/content/userfiles/-10%20GHz.pdf>. Acesso em: 15 nov.2019.
- [93] Electro-Optics Technology, Inc. *Photodetector Technical Notes*. Disponível em: <https://www.eotech.com/content/userfiles/Photodetectors%20-%20Technical%20Notes.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- [94] Electro-Optics Technology, Inc. *Non-amplified Photodetectors User Guide*. Disponível em: <https://www.eotech.com/content/userfiles/Non-amplified%20Photodetectors%20User%20Guide.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- [95] Morgan, Dennis R., et al. "A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers." *IEEE Transactions on signal processing* 54.10 (2006): 3852-3860.
- [96] OLeary, Seamus. *Understanding digital terrestrial broadcasting*. 2000.
- [97] Eun, Changsoo, and Edward J. Powers. "A new Volterra predistorter based on the indirect learning architecture." *IEEE transactions on signal processing* 45.1 (1997): 223-227.
- [98] Keysight, "Wideband Digital Pre-Distortion with SystemVue and PXI Modular Instruments", Application Note. 2014.

- [99] Dang, Shuping, et al. *"What should 6G be?."* Nature Electronics 3.1 (2020): 20-29.
- [100] Strinati, Emilio Calvanese, et al. *"6G: The next frontier."* arXiv preprint arXiv:1901.03239 (2019).
- [101] Keysight, *"Understanding 5G Coexistence Testing Requirements"*, White paper. 2018.
- [102] IEEE Std. 802.15.7-2018, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*, IEEE Std., 2018.
- [103] ITU-T G.9991, *High-speed indoor visible light communication transceiver – System architecture, physical layer and data link layer specification*, 2019.