

Transmissão Óptica Coerente no Espaço Livre para Redes 6G

Matheus M. Menezes, R. M. S. Silva, F. B. F. Pinto, Arismar Cerqueira S. Jr., Andrea Chiuchiarelli

Resumo— Este trabalho avalia o desempenho de sistemas ópticos de transmissão no espaço livre (FSO) para redes 6G baseadas em arquitetura *fiber-wireless* (FiWi). O desempenho é analisado em dois cenários: modulação de intensidade com detecção direta (IM-DD); e detecção coerente com diferentes modulações digitais. A arquitetura é analisada sob diferentes condições climáticas, pela taxa de erro de bit em função da distância do enlace FSO, considerando taxa de 10 Gb/s. Resultados simulados demonstram desempenho superior do sistema coerente comparado com IM-DD nos cenários avaliados, evidenciando potencial para aumento de taxa e expansão da conectividade a longas distâncias por enlaces FSO.

Palavras-Chave— 6G, FiWi, FSO, Canal FSO, Recepção coerente.

Abstract— This work evaluates the performance of free-space optical (FSO) transmission systems for 6G networks based on a fiber-wireless (FiWi) architecture. Performance is analyzed in two scenarios: intensity modulation with direct detection (IM-DD); and coherent detection with various digital modulations. The architecture is analyzed under different weather conditions, in terms of the bit error rate as a function of the FSO link distance, considering a data rate of 10 Gb/s. Simulated results demonstrate superior performance of the coherent system compared to IM-DD in the evaluated scenarios, highlighting the potential for increasing throughput and extending connectivity over long distances via FSO links.

Keywords— 6G, FiWi, FSO, FSO channel, coherent reception.

I. INTRODUÇÃO

O rápido aumento dos dispositivos móveis conectados à Internet e a consequente migração de serviços essenciais e plataformas para a nuvem têm impulsionado significativamente a demanda por desempenho das redes de nova geração, impondo requisitos de taxa, cobertura e latência cada vez mais exigentes. A quinta geração de comunicações móveis (5G) apresenta uma evolução radical em relação às tecnologias anteriores. O objetivo do 5G é a criação de um ecossistema no qual dispositivos móveis possam interagir em altíssima densidade, podendo coexistir redes de comunicação com múltiplas finalidades, tais como comunicação usuário-usuário, usuário-máquina e máquina-máquina, visando integrar a Internet das Coisas (IoT) à comunicação celular. Dentre as especificações do 5G estão contempladas redes móveis com taxas de pico de

até 20 Gb/s em *downlink* e de 10 Gb/s em *uplink*, densidade de até 1 milhão de dispositivos conectados por km², latência reduzida de até 1 ms, alta confiabilidade (disponibilidade da rede de 99,999%) e alta eficiência energética [1]. A sexta geração de comunicações móveis (6G) propõe a superação dos limites do 5G, principalmente em relação às taxas de transmissão, que poderão atingir até 1 Tb/s em *downlink*, e à densidade de dispositivos conectados, com o objetivo de suportar um número de conexões simultâneas por km² maior do que o do 5G, com menor latência e maior eficiência energética [2].

Tais objetivos impõem um desafio relevante à tecnologia de comunicação móvel por radiofrequências (RF), uma vez que a transmissão massiva de dados em taxas acima de 100 Gb/s requer o uso de frequências na faixa das ondas milimétricas (até 100 GHz) e de terahertz, o que limita o alcance de propagação [3]. Além disso, os desafios logísticos e regulatórios associados à implantação de redes baseadas em fibra óptica, particularmente em regiões densamente populadas e ambientes de difícil acesso, fizeram com que a convergência das comunicações ópticas e sem fio emergisse como tecnologia habilitadora fundamental para as redes 6G futuras [4]. Nesse contexto, a tecnologia de comunicação óptica no espaço livre (*Free Space Optics*, FSO) [5] representa uma solução extremamente atrativa, permitindo conexão de alto desempenho dos elementos de rede 6G e viabilizando arquiteturas *fiber-wireless* (FiWi) de alta velocidade. Os sistemas FSO possuem banda elevada, facilmente suportando os requisitos das redes de transporte do 6G, permitindo desempenho comparável ao das redes baseadas em fibra óptica, e oferecendo uma alternativa viável para a expansão da conectividade em regiões remotas e com infraestrutura inadequada [6].

Em redes *fronthaul* híbridas RF/ópticas, faz-se uso principalmente de formatos de modulação de intensidade, como rádio sobre fibra (RoF) e modulação óptica de intensidade com detecção direta (IM-DD). No entanto, o uso de modulação óptica coerente, na qual a portadora, tipicamente no espectro do infravermelho (IR), é modulada em amplitude e fase, representa uma alternativa mais interessante em cenários nos quais é necessário estender o alcance da rede e atender aos requisitos de alta capacidade das redes futuras [7]. Sistemas baseados em recepção coerente permitem atingir valores de eficiência espectral superiores aos da IM-DD, além de melhorar a sensibilidade do sistema de comunicação e, com isso, o alcance sob atenuação atmosférica. Adicionalmente, sistemas coerentes permitem o uso de algoritmos de processamento digital de sinais (DSP) para recuperação da informação e mitigação dos efeitos de transmissão [8].

Neste trabalho é apresentado um estudo de desempenho de sistemas FSO, comparando modulação coerente com modulação IM-DD em termos de eficiência espectral e alcance, em diferentes cenários de propagação. A contribuição não se resume a essa comparação: o receptor coerente emprega uma cadeia de DSP aberta e própria, implementada estágio a estágio em Python e validada por comparação com o *Universal DSP* comercial do simulador; sobre essa base auditável constrói-se o mapeamento quantitativo de alcance por formato de modulação e por cenário atmosférico aqui reportado.

II. CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas no *software OptiSystem*, comparando quatro formatos de modulação, dois coerentes — 16-QAM e QPSK — e dois IM-DD — PAM-4 e OOK — todos na taxa de referência de 10 Gb/s. Foi simulada a propagação de sinais ópticos em um enlace FSO sob três cenários atmosféricos (Seção II-B). Os sinais coerentes foram processados por meio de algoritmos de DSP desenvolvidos em Python pelos autores. Para todos os cenários de transmissão, foram avaliadas a taxa de erro de bit (BER), na forma logarítmica, e a magnitude do vetor de erro (EVM), em função da distância de transmissão.

A. Topologia do enlace

A Fig. 1(a) mostra a arquitetura do sistema FSO coerente implementado. Um laser CW no comprimento de onda $\lambda = 1550$ nm e largura de linha $\Delta\nu = 0,1$ MHz alimenta um modulador IQ óptico, cujas entradas RF são controladas por duas sequências de pulsos retangulares NRZ (*non-return-to-zero*), representando as componentes em fase (I) e em quadratura (Q) do sinal coerente (QPSK/16-QAM). O sinal óptico modulado é enviado para o canal FSO (Seção II-B). Na saída do canal, o bloco *Set OSNR* ajusta a relação sinal-ruído pós-canal para o valor fixo de 18 dB. Essa normalização é metodológica: desacopla a degradação imposta pela atenuação atmosférica, dependente da distância, do ruído do amplificador e do *front-end* de recepção, fixando um ponto de operação de ruído idêntico para os quatro formatos, condição para que a comparação entre modulações seja justa. Em contrapartida, ela não captura a queda absoluta de potência recebida nem, por consequência, o alcance absoluto: os valores da Tab. VI são comparativos entre formatos sob idêntica condição de ruído, e não predições de alcance de um enlace real. Em seguida, um filtro óptico gaussiano de 20 GHz de banda centrado em 1550 nm remove o ruído em excesso fora da banda da portadora óptica, na entrada do receptor coerente, composto por um oscilador local em 1550,001 nm e uma híbrida óptica que separa as componentes *I/Q* do sinal, que são posteriormente detectadas por dois pares de fotodetectores balanceados (BPDs). Os sinais elétricos fotodetectados pelos BPDs são enviados à cadeia DSP. A saída do DSP é decodificada pelo bloco *QAM Seq. Decoder* e comparada com a sequência transmitida no bloco *BER Test Set*, para contagem dos erros. O sistema IM-DD é mostrado na Fig. 1(b). Nesse caso, o laser CW é enviado para um modulador de intensidade *Mach-Zehnder* (MZM) pilotado pela sequência de pulsos OOK ou PAM-4, antes de

ser transmitido pelo canal FSO, com as mesmas características especificadas para o sistema coerente. O sinal transmitido é posteriormente detectado por um fotodetector PIN e enviado ao bloco receptor, composto por um filtro passa-baixa (LPF), seguido pelo estágio de sincronismo e de decisão de símbolos. A sequência decodificada é enviada ao bloco *BER Test Set* para contagem da BER.

B. Cenários atmosféricos

O canal FSO foi modelado em três cenários representativos (Tab. I): *boa visibilidade* (atmosfera limpa), *chuva moderada* (25 mm/h) e *neblina moderada* (visibilidade 2 km). Para modelagem da névoa/aerosol foi utilizado o modelo de Kim [9], com termo aditivo de Carbonneau para precipitação [10]. Para cada cenário de análise, consideraram-se dez distâncias distintas $\{0,5; 1,0; \dots; 5,0\}$ km, sendo 5 km o limite de distância máxima.

TABELA I: Cenários atmosféricos considerados na simulação

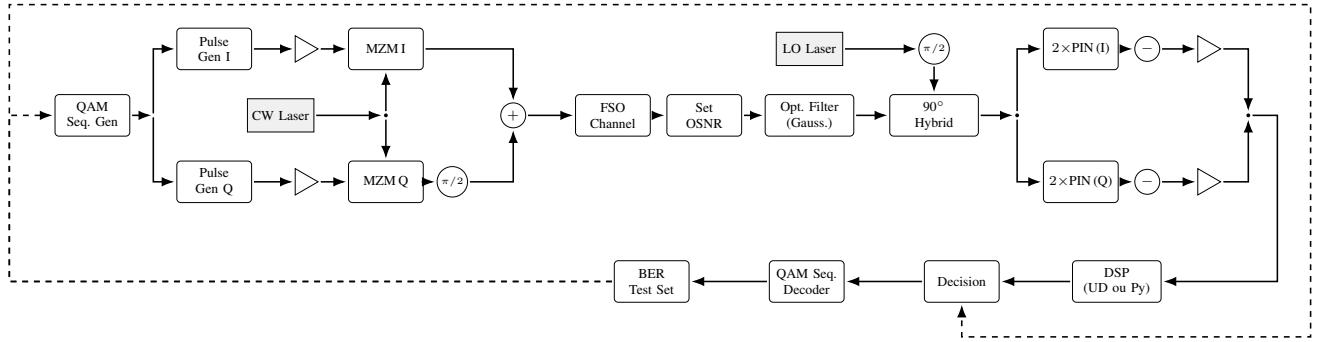
Cenário	Calc. type	Modelo	Vis.	Chuva
Boa vis.	Precip.	Kim puro	50 km	0 mm/h
Chuva moderada	Precip.	Kim + Carb.	50 km	25 mm/h
Neblina moderada	Dry	Kim puro	2 km	—

C. Configurações de modulação

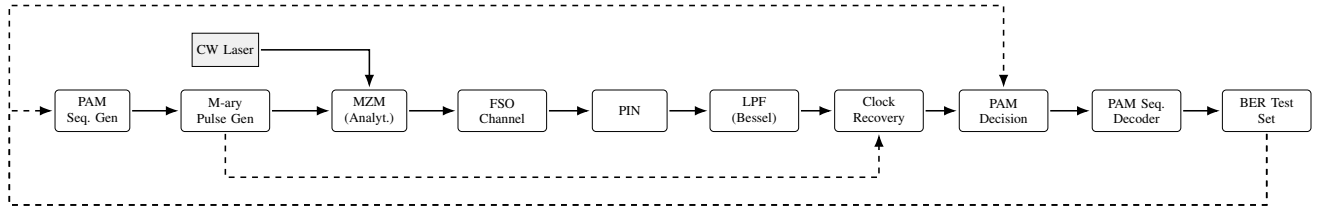
Quatro formatos foram comparados considerando a mesma taxa de dados de 10 Gb/s: **16-QAM** coerente ($R_s = 2,5$ GBd, 4 bits/símbolo), **QPSK** coerente ($R_s = 5$ GBd, 2 bits/símbolo), **PAM-4** IM-DD ($R_s = 5$ GBd) e **OOK** IM-DD (NRZ a 10 GBd). Os parâmetros de cada formato (R_s , f_s , detecção) e as métricas que normalizam a comparação (banda de sinal B , eficiência espectral η e complexidade de receptor/DSP) estão listados na Tab. II. A Tab. III reúne os parâmetros do *pipeline* DSP para os dois formatos coerentes.

TABELA II: Configurações de modulação a 10 Gb/s e métricas de normalização. f_s : taxa de amostragem da cadeia DSP, não aplicável ao IM-DD. $B = (1 + \beta)R_s$: banda de sinal requerida sob conformação de Nyquist com *roll-off* $\beta = 0,1$, valor do RRC da cadeia DSP coerente, adotado como referência comum; $\eta = R_b/B$: eficiência espectral; RX/DSP: complexidade qualitativa (cf. Tab. III).

Mod.	bits	R_s (GBd)	f_s (GHz)	B (GHz)	η (b/s/Hz)	Detec.	RX/ DSP
16-QAM	4	2,5	40	2,75	3,64	Coer.	Alta
QPSK	2	5	20	5,50	1,82	Coer.	Média
PAM-4	2	5	—	5,50	1,82	IM-DD	Baixa
OOK	1	10	—	11,0	0,91	IM-DD	Baixa



(a) Topologia do sistema FSO coerente



(b) Topologia do sistema FSO IM-DD

Fig. 1: Topologias simuladas do enlace FSO.

TABELA III: Parâmetros do Python DSP por modulação ($R_b=10$ Gb/s). Linhas sem variação entre formatos aparecem mescladas (E02–E05 e E07): E02 *Deskew* em *bypass* (sinal alinhado pelo OptiSystem), E03 GSOP, E04 CD desabilitada (FSO de curta distância), E05 *Clock rec.* desligado (sinal sincronizado).

Estágio	16-QAM	QPSK
Taxas	$R_s=2,5$ GBd, $f_s=40$ GHz	$R_s=5$ GBd, $f_s=20$ GHz
E01 ADC	RRC $\beta=0,1$, span 16, 16→2 sps	RRC $\beta=0,1$, span 16, 4→2 sps
E02–E05	<i>Deskew bypass / GSOP / CD desab. / CR off</i>	
E06 Equaliz.	CMA→RDE, 60 taps, 25 iter., $\mu_C=3 \cdot 10^{-4}$, $\mu_R=7 \cdot 10^{-5}$	CMA apenas, 15 taps, 5 iter., $\mu_C=10^{-3}$
E07 Freq. rec.	FFT da quarta potência	
E08 BPS	$block=64$, $n=256$ ângulos	$block=128$, $n=64$ ângulos
E09 Decisão	16-QAM Gray, <i>hard slice</i> norm.	QPSK <i>hard slice</i> (Re/Im)

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada cenário, calculou-se a BER em função da distância para os quatro formatos de modulação considerados. Os resultados estão apresentados nas Figs. 2–5. As linhas tracejadas nos gráficos marcam os limiares *Hard-Decision* FEC (HD-FEC, $\log BER = -2,42$) e *Soft-Decision* FEC (SD-FEC, $\log BER = -1,70$). Os pisos de detecção, definidos pelo tamanho da sequência de teste, são $\log BER \approx -5,42$ (262 144 bits) para os formatos coerentes e $\log BER \approx -4,82$ (65 536 bits) para PAM-4 e OOK.

A. Boa visibilidade

A Fig. 2 mostra os resultados da transmissão FSO coerente no cenário de atmosfera limpa. Ambos os formatos de modulação QPSK e 16-QAM considerados mostraram

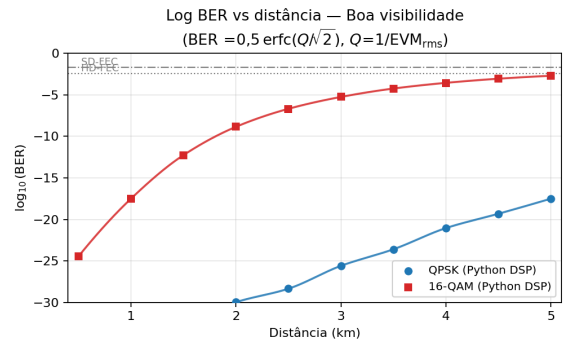
bom desempenho, conseguindo atingir a distância máxima de transmissão de 5 km com BER abaixo do limiar HD-FEC.

B. Chuva (25 mm/h)

Sob chuva moderada (Fig. 3, Tab. IV), o sinal QPSK ainda mantém a BER abaixo do limiar HD-FEC até 5 km. Já o 16-QAM sofre uma piora mais significativa, cruzando o limiar HD-FEC em 2,25 km.

C. Neblina (visibilidade de 2 km)

No cenário de transmissão com neblina (Fig. 4), observa-se desempenho dos dois formatos coerentes semelhante ao do caso de transmissão com chuva. A modulação QPSK ainda consegue garantir valores da taxa de erro abaixo do limiar HD-FEC até 5 km, enquanto o alcance da modulação 16-QAM fica limitado a cerca de 2 km.


 Fig. 2: Boa visibilidade: $\log BER$ vs. distância (coerente, Python DSP, 16-QAM e QPSK).

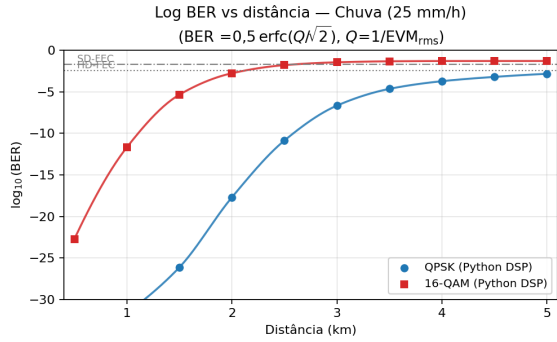


Fig. 3: Chuva (25 mm/h): log BER vs. distância (coerente, Python DSP, 16-QAM e QPSK).

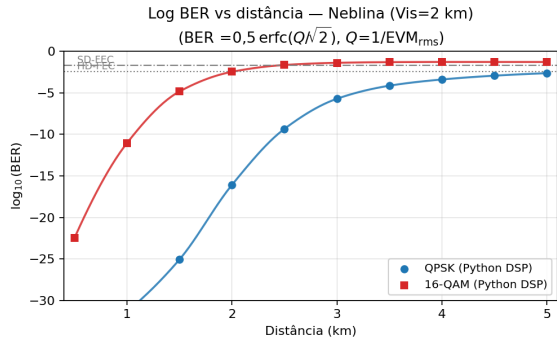


Fig. 4: Neblina (Vis = 2 km): log BER vs. distância (coerente, Python DSP, 16-QAM e QPSK).

TABELA IV: Modulações coerentes (Python DSP) — log BER e EVM (%) em distâncias-marco, para os três cenários. Piso de detecção: $\log(1/262144) \approx -5,42$.

Mod.	d (km)	Boa vis.		Chuva		Neblina	
		BER	EVm	BER	EVm	BER	EVm
QPSK	0,5	-5,42	7,9	-5,42	8,0	-5,42	8,0
	2,0	-5,42	8,7	-5,42	11,5	-5,42	12,1
	3,0	-5,42	9,5	-5,42	19,8	-5,42	21,7
	5,0	-5,42	11,6	-2,82	33,7	-2,62	35,4
16-QAM	0,5	-5,42	9,7	-5,42	10,1	-5,42	10,1
	2,0	-5,42	16,8	-2,75	34,3	-2,46	37,1
	3,0	-5,24	22,8	-1,43	56,0	-1,37	58,1
	5,0	-2,69	34,8	-1,27	62,0	-1,27	62,0

A Tab. IV explicita a relação entre EVm e BER. Sob neblina, a EVm do QPSK sobe de 8,0% a 21,7% entre 0,5 e 3 km com a taxa de erro presa ao piso de detecção, ao passo que o 16-QAM atinge 37,1% já em 2 km, com $\log \text{BER} = -2,46$, praticamente sobre o limiar HD-FEC. O vínculo entre as duas métricas é fortemente não linear: a BER só se torna observável em uma faixa estreita de EVm (≈ 20 –35%), na qual varre toda a região útil de operação (o “joelho” das curvas), saturando acima dela. Ressalte-se que a EVm percentual não é diretamente comparável entre formatos de ordem distinta, razão pela qual a comparação é arbitrada pela BER.

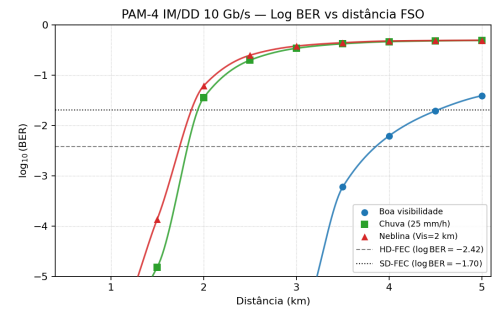
D. Modulações IM-DD

As Figs. 5(a) e (b) e a Tab. V mostram o desempenho dos dois formatos de modulação IM-DD nos três cenários

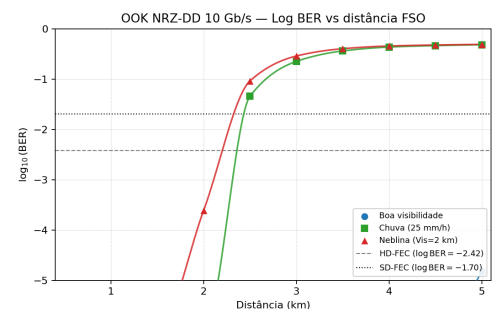
avaliados. É possível observar que o sinal PAM-4 não consegue garantir desempenho de BER abaixo do limiar HD-FEC até a distância de 5 km, em nenhum dos três cenários. No caso do OOK, observa-se desempenho excelente no cenário de boa visibilidade. A ausência da curva neste caso deve-se ao fato de a BER permanecer em níveis muito baixos ou nulos para todas as distâncias avaliadas. Entretanto, o desempenho piora drasticamente em condições de chuva e neblina, em que o alcance do sistema é limitado a cerca de 2 km, valor comparável à distância alcançada utilizando modulação 16-QAM coerente. O alcance do sinal PAM-4 nos dois cenários de forte atenuação atmosférica é ainda menor, não conseguindo sequer chegar à distância de 2 km.

TABELA V: IM-DD — log BER em distâncias-marco, para os três cenários. Piso de detecção: $\log(1/65536) \approx -4,82$.

Mod.	d (km)	Boa vis.	Chuva	Neblina
PAM-4	0,5	< -4,82	< -4,82	< -4,82
	2,0	< -4,82	-2,10	-2,09
	3,0	< -4,82	-0,47	-0,43
	5,0	-1,41	-0,31	-0,31
OOK	0,5	< -4,82	< -4,82	< -4,82
	2,0	< -4,82	-2,86	-2,63
	3,0	< -4,82	-0,65	-0,54
	5,0	-4,82	-0,32	-0,31



(a) PAM-4



(b) OOK NRZ-DD 10 GBd

Fig. 5: IM-DD: log BER vs. distância nos três cenários (piso $\approx -4,82$).

E. Análise comparativa

A Tab. VI sintetiza os resultados das simulações, mostrando a distância limite abaixo do limiar HD-FEC para os quatro

formatos de modulação considerados. Em condições de boa visibilidade, tanto a modulação 16-QAM quanto o QPSK e o OOK conseguem manter uma taxa de erro sub-FEC ao longo dos 5 km. Em contrapartida, o sinal PAM-4 cruza o limiar em 3,90 km. Sob chuva e neblina, observa-se que os formatos coerentes ainda mostram bom desempenho, com o QPSK atingindo a distância máxima de 5 km e o 16-QAM chegando a 2,25 km (chuva) e 2,05 km (neblina). Entre os formatos IM-DD, o PAM-4 não replica esse desempenho, enquanto o OOK apresenta alcance semelhante ao do 16-QAM. Os resultados indicam vantagem da modulação coerente sobre a IM-DD em termos de sensibilidade do receptor e alcance, principalmente em cenários de transmissão com alto índice de atenuação.

Os alcances da Tab. VI não são obtidos em igualdade de eficiência espectral (Tab. II): o OOK só iguala o 16-QAM sob chuva e neblina, exigindo 11 GHz de banda de sinal contra 2,75 GHz (0,91 contra 3,64 b/s/Hz), e o QPSK percorre os 5 km com metade da eficiência espectral do 16-QAM. Há, portanto, um compromisso entre alcance e ocupação de espectro, e não uma superioridade absoluta. Já o PAM-4, de mesma η do QPSK, fica muito aquém dele nos cenários adversos, o que separa o efeito da detecção do efeito do formato: o batimento com o oscilador local confere ganho de conversão e maior sensibilidade, ausentes na detecção direta [7], ao custo da híbrida de 90°, da detecção balanceada e do DSP da Tab. III, mais oneroso no 16-QAM (60 *taps*, CMA→RDE) do que no QPSK (15 *taps*, CMA apenas). Ressalve-se que, por fixarem a OSNR pós-canal em 18 dB, as simulações medem robustez relativa a uma dada relação sinal-ruído, e não sensibilidade absoluta nem energia por bit, cuja quantificação exigiria varredura de potência recebida e um modelo de consumo do *front-end* e do DSP.

Cabe delimitar o escopo do canal adotado: a propagação é representada por atenuação determinística (extinção de Kim, com termo aditivo de Carbonneau para a chuva), sem turbulência atmosférica, cintilação, erro de apontamento ou *jitter* de plataforma. A ressalva importa porque a recepção coerente é a mais sensível a esses efeitos: o batimento com o oscilador local exige coerência espacial da frente de onda, de modo que desalinhamento e distorção de frente de onda degradam a eficiência de mistura e o acoplamento em fibra monomodo. As margens aqui reportadas constituem, assim, um limite superior da vantagem coerente, e sua verificação sob desvanecimento por turbulência com estatística de erro de apontamento é a continuidade natural do trabalho.

TABELA VI: Distância limite abaixo do limiar HD-FEC (log BER = -2,42) para os 4 formatos de modulação considerados.

Cenário	16-QAM	QPSK	PAM-4	OOK
Boa vis.	>5,00	>5,00	3,90	>5,00
Chuva 25 mm/h	2,25	>5,00	1,80	2,20
Neblina Vis 2 km	2,05	>5,00	1,80	2,10

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliado o desempenho de um sistema FSO utilizando modulação IM-DD e coerente, na taxa de

10 Gb/s, em três diferentes cenários de propagação. Os resultados das simulações mostram que a comunicação coerente apresenta maior robustez em termos de alcance e sensibilidade no receptor, quando comparada com a modulação IM-DD. Apesar de sistemas coerentes serem mais complexos do que os sistemas IM-DD quanto à arquitetura, e mais onerosos em termos de custo de implantação e de consumo energético, eles se apresentam como a alternativa mais viável para aplicações das futuras redes 6G com arquitetura FiWi. A utilização de sistemas FSO coerentes habilita a transmissão de dados de alta velocidade, alcançando maiores distâncias, tornando-se uma tecnologia promissora para expandir a conectividade a regiões de difícil acesso.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto XGM-AFCCT-2024-2-15-1 suportado pelo xGMobile – Centro de Competência EMBRAPII em Tecnologia e Infraestrutura em Conectividade 5G e 6G, com recursos financeiros oriundos do PPI IoT/Manufatura 4.0 do MCTI, através do Termo de Cooperação 052/2023, firmado com a EMBRAPII. Adicionalmente, os autores também agradecem o apoio financeiro do CNPq, da FINEP, da FAPEMIG (PPE-00124-23, RED-00194-23), da FAPESP (Contratos # 2021/06569-1 e # 2022/09319-9). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] International Telecommunication Union (ITU), “5G – Fifth generation of mobile technologies,” <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>.
- [2] M. Shafi, R. K. Jha e S. Jain, “6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 57548–57573, 2024.
- [3] A. Mahmood, M. L. M. Kiah, Z. H. Azizul e S. R. Azzuhri, “Analysis of Terahertz (THz) Frequency Propagation and Link Design for Federated Learning in 6G Wireless Systems,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 23782–23797, 2024.
- [4] H. R. D. Filgueiras et al., “Wireless and Optical Convergent Access Technologies Toward 6G,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9232–9259, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3239807.
- [5] S. A. Al-Gailani et al., “A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7353–7373, 2021.
- [6] F. B. F. Pinto et al., “Power-over-Fiber-Based Optical Wireless Communication Systems Towards 6G,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 16, no. 8, pp. D86–D95, Aug. 2024, doi: 10.1364/JOCN.522583.
- [7] F. P. Guiomar, M. A. Fernandes, J. L. Nascimento, V. Rodrigues e P. P. Monteiro, “Coherent Free-Space Optical Communications: Opportunities and Challenges,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 10, pp. 3173–3186, May 15, 2022.
- [8] X. Ao et al., “Real-Time Experimental Demonstration of Hybrid FSO/Wireless Transmission Based on Coherent Detection and Delta-Sigma Modulation,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 6, pp. 1–8, Dec. 2022, Art. no. 7359908, doi: 10.1109/JPHOT.2022.3219558.
- [9] I. I. Kim, B. McArthur e E. J. Korevaar, “Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications,” em *Optical Wireless Communications III*, Proc. SPIE, v. 4214, pp. 26–37, 2001.
- [10] T. H. Carbonneau e D. R. Wisely, “Opportunities and challenges for optical wireless: the competitive advantage of free space telecommunications links in today’s crowded marketplace,” em *Wireless Technologies and Systems: Millimeter-Wave and Optical*, Proc. SPIE, v. 3232, pp. 119–128, 1998.