

Sistema Rádio sobre Fibra assistido por Inteligência Artificial para aplicações 5G/6G¹

Artificial Intelligence-assisted Radio over Fiber System for 5G / 6G applications

DOI:10.34117/bjdv7n5-342

Recebimento dos originais: 07/04/2021

Aceitação para publicação: 17/05/2021

Luiz Augusto Melo Pereira

Mestrado

Inatel

Endereço: Av. João de Camargo num. 510, Inatel, Santa Rita do Sapucaí-MG. CEP 37.540-000

E-mail: luiz.augusto@dtel.inatel.br

Pedro Henrique Fialho Santos

Graduação

Inatel

Endereço: Av. João de Camargo num. 510, Inatel, Santa Rita do Sapucaí-MG. CEP 37.540-000

E-mail: java.pedro@gmail.com

Ramon Maia Borges

Doutorado: Inatel

Endereço: Av. João de Camargo num. 510, Inatel, Santa Rita do Sapucaí-MG. CEP 37.540-000

E-mail: ramonmb@inatel.br

Luciano Leonel Mendes

Formação acadêmica mais alta: Pós-Doutorado

Inatel

Endereço: Av. João de Camargo num. 510, Inatel, Santa Rita do Sapucaí-MG. CEP 37.540-000

E-mail: lucianol@inatel.br

¹ Artigo submetido em 01 de Maio de 2021. Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01245.010604/2020-14, sob o projeto Sistemas de Comunicações Móveis de 6ª Geração (6G) do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil. Os autores também agradecem com o apoio financeiro do CNPq, da CAPES, da FINEP e da FAPEMIG.

L. A. M. Pereira, P. H. F Santos, R. M. Borges, L. L. Mendes e Arismar Cerqueira S. Jr., Lab. WOCA, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, MG 37540-000 Brasil (e-mail: arismar@inatel.br).

C. J. A. Bastos-Filho, Universidade de Pernambuco, Recife, PE. Brasil.

Carmelo José Albanez Bastos Filho

Doutorado

UPE – Universidade de Pernambuco

Endereço: Av. Gov. Agamenon Magalhães - Santo Amaro, Recife - PE, 50100-010

E-mail: carmelo.filho@upe.br

Arismar Cerqueira Sodré Junior

Pós-Doutorado

Inatel

Endereço: Av. João de Camargo num. 510, Inatel, Santa Rita do Sapucaí-MG. CEP
37.540-000

E-mail: arismar@inatel.br

RESUMO

A evolução dos sistemas celulares, do ponto de vista da camada física de rede, aponta para a convergência entre comunicações sem fio e comunicações ópticas. Tal convergência possibilita aproveitar simultaneamente a mobilidade e flexibilidade dos sistemas sem fio e a elevada capacidade dos sistemas ópticos. Em paralelo, algoritmos de Inteligência Artificial (IA) tendem a ser promissores para o controle efetivo e dinâmico dos inúmeros parâmetros das redes, cada vez mais densas e heterogêneas. Neste contexto, o presente trabalho reporta um sistema rádio sobre fibra (*radio over fiber*-RoF) inovador, assistido e otimizado por IA. Propõe-se o uso de computação evolutiva para reduzir as degradações do sistema RoF, visando sistemas da quinta e sexta geração de comunicações móveis (5G e 6G). Resultados numéricos para diferentes ordens de modulação demonstram a aplicabilidade da ferramenta proposta, por meio da melhora na taxa de erro de símbolos (*symbol error rate*- SER) do sistema RoF.

Palavras-Chave: 5G/6G, inteligência artificial, rádio sobre fibra.

ABSTRACT

The evolution of cellular systems, from the point of view of the physical network layer, points to the convergence between wireless communications and optical communications. Such convergence makes it possible to take advantage simultaneously of the mobility and flexibility of wireless systems and the high capacity of optical systems. In parallel, Artificial Intelligence (AI) algorithms tend to be promising for the effective and dynamic control of the numerous network parameters, which are increasingly dense and heterogeneous. In this context, the present work reports an innovative radio over fiber (RoF) system, assisted and optimized by AI. It is proposed to use evolutionary computing to reduce the degradation of the RoF system, targeting systems of the fifth and sixth generation of mobile communications (5G and 6G). Numerical results for different modulation orders demonstrate the applicability of the proposed tool, through the improvement in the symbol error rate (SER) of the RoF system.

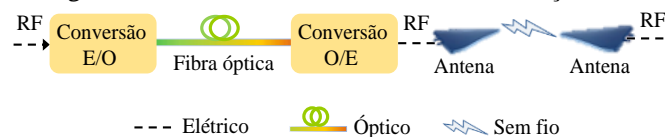
Keywords: 5G / 6G, artificial intelligence, radio over fiber.

1 INTRODUÇÃO

A fase 1 dos sistemas de quinta geração de comunicações móveis (5G) baseia-se no *Release 15* do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), a qual introduziu o *5G New Radio* (NR) voltado para a evolução da banda larga móvel. Algumas das soluções técnicas exploradas nesta fase são: uso de espectro adicional; flexibilidade na alocação de recursos; convergência óptico-*wireless*; esquemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) [1]. Recentemente, o 3GPP finalizou o *Release 16*, destinado à fase 2 dos sistemas 5G, que inclui aplicações de baixa latência e alta confiabilidade, além de comunicação entre dispositivos. Soluções técnicas propostas para esta fase incluem: *backhaul* e acessos integrados; acesso via satélite; uso do padrão 5G NR em espectro não-licenciado [2]. Em paralelo, iniciou-se o planejamento da sexta geração de comunicações móveis (6G), prevista para 2030. A convergência óptico-*wireless* representa uma solução chave tanto para 5G quanto para 6G, enquanto Inteligência Artificial (IA), comunicações com luz visível e em Terahertz ganham espaço em direção à sexta geração [3].

A convergência óptico-*wireless* vem sendo implementada por meio da aplicação da tecnologia rádio sobre fibra (RoF), a qual remete ao transporte e à distribuição de sinais de radiofrequência (RF), ao longo de enlaces ópticos. Essa integração entre enlaces ópticos e sem fio deu origem aos sistemas *Fiber/Wireless* (FiWi) [4], como mostra a Fig. 1. Em sistemas FiWi, o sinal de RF passa por um estágio de conversão eletroóptica (E/O), compondo o transmissor RoF, e é então transmitido até a estação de rádio remota pelo enlace óptico. Ao final deste enlace, o bloco de conversão optoelétrica (O/E), compondo o receptor RoF, recupera o sinal de RF no domínio elétrico e o disponibiliza para transmissão e recepção no ambiente sem fio através de antenas. É válido mencionar que a sequência descrita remete ao sentido de comunicação em *downlink*. Para *uplink*, ocorre o processo reverso.

Fig. 1. Diagrama em blocos de um sistema FiWi na direção de *downlink*.



Tipicamente, enlaces sem fio adquirem robustez a efeitos de canal ao utilizar-se MIMO para diversidade, códigos corretores de erros e equalização [5-7]. Por outro lado, pré-distorção digital tem sido aplicada para combater degradações em enlaces ópticos, e

assim, aprimorar o desempenho dos sistemas RoF [8,11]. Entretanto, como modelos de canal óptico-*wireless* são escassos na literatura e trazem complexidade, a otimização de sistemas FiWi em função dos parâmetros da rede é desafiadora.

O presente trabalho propõe o uso de inteligência artificial em sistemas RoF para aplicações 5G/6G, com o objetivo de otimizar o desempenho digital do enlace para diferentes condições de operação. Tal otimização provém do uso de algoritmos de IA, que ajustam parâmetros de entrada, como potência do laser (P_L) e tensão de polarização (V_{BIAS}) do modulador óptico, de modo a proporcionar a menor taxa de erro de símbolos (SER) possível na saída do sistema.

O artigo está estruturado em quatro seções. A Seção II descreve a metodologia proposta para aplicar inteligência artificial em sistema RoF. A Seção III reporta resultados numéricos da validação da ferramenta de IA para enlace RoF. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas na Seção IV.

2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA A SISTEMA ROF

A tecnologia RoF pode ser eficientemente empregada para suportar comunicações com elevada vazão de dados e transportar sinais que partem do núcleo da rede e chegam até as estações rádio bases (ERBs). A integração de enlaces ópticos e sem fio permite explorar a capacidade dos sistemas ópticos e a mobilidade das transmissões no ambiente sem fio. Essa convergência traz diversos benefícios que estão principalmente relacionados ao uso das fibras ópticas para transmissão de sinais. Dentre esses benefícios, cita-se: possibilidade de implementação de múltiplos serviços a altas taxas de dados (centenas de Gbit/s), devido a alta capacidade do meio óptico; imunidade a interferências eletromagnéticas; baixa e constante atenuação (0,2 dB/km), independentemente da radiofrequência de operação.

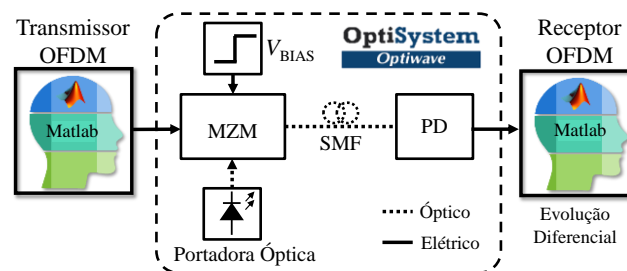
Nas redes 5G, existe uma tendência de aumento de complexidade, devido a novas aplicações, serviços e densificação das células. Para aliviar essa complexidade, pode-se utilizar técnicas de inteligência artificial aplicadas a diversas partes da rede. O uso de IA em conjunto com RoF, possui um elevado potencial para melhorar a eficiência dos sistemas de comunicações móveis e reduzir os custos de implementação, uma vez que o emprego do RoF beneficia a centralização das redes. Em suma, a inteligência artificial pode ser empregada para implantar, otimizar e operar uma rede móvel, ou seja, os algoritmos de aprendizado de máquina (ML - *Machine Learning*) podem ser utilizados em diversos níveis da rede. Esta seção apresenta o emprego de IA em um sistema RoF,

visando reduzir os impactos causados na relação sinal ruído (SNR- *signal-to-noise ratio*) do sinal de RF na entrada do modulador eletroóptico.

A nossa metodologia baseia-se na integração do *software* Optisystem, para simulações no domínio óptico, com a ferramenta computacional Matlab, na qual foram implementados os algoritmos de IA. Estes últimos são utilizados para encontrar valores ótimos de parâmetros de entrada de um sistema RoF. Tais parâmetros possuem uma relação direta com a qualidade do sinal, que posteriormente será entregue para a transmissão. Os parâmetros de entrada governam a operação de um modulador eletroóptico do tipo Mach-Zehnder (Mach-Zehnder *modulator* - MZM). Este modulador possui uma resposta não linear, gerando produtos de intermodulação entre os sinais de RF que são aplicados nos braços superior e inferior do modulador. Estes produtos de intermodulação contribuem significativamente com a degradação da relação sinal ruído. Desta forma, é extremamente importante selecionar os parâmetros de entrada que amenizam os efeitos degenerativos da resposta não linear do MZM.

A Fig. 2 apresenta o diagrama em blocos do sistema RoF assistido por IA. O transmissor gera as amostras da forma de onda com multiplexação por divisão em frequências ortogonais (orthogonal frequency division mutiplexing - OFDM) em banda base, as quais são direcionadas ao Optisystem e aplicadas a um modulador eletroóptico MZM. Uma tensão de corrente contínua (direct current - DC) é aplicada ao modulador, para controlar o ponto de operação do MZM e, assim, reduzir as distorções no sinal de RF. A portadora óptica modulada com o sinal OFDM é então lançada em 25 km de fibra monomodo (SMF), compondo um fronthaul óptico até o fotodetector (PD), que é o componente responsável por converter o sinal óptico em uma corrente elétrica. Finalmente, o sinal fotodetectado é entregue ao receptor para a demodulação, análise e alimentação dos algoritmos de IA.

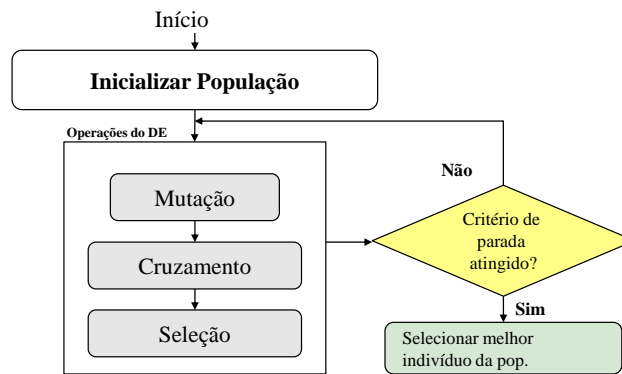
Fig. 2. Diagrama em blocos do sistema RoF assistido por inteligência artificial: MZM- Mach-Zehnder modulator; SMF- single-mode fiber; PD- photodetector; V_{BIAS} - tensão de polarização.



Em sistemas RoF, a dispersão cromática, os efeitos não lineares relacionados à transmissão por fibra ópticas, a resposta não linear de moduladores eletroópticos e a adição de ruídos na fotodetecção, são os principais responsáveis por degradações no sinal de RF. Os ruídos gerados no processo de fotodetecção estão intrinsecamente relacionados à absorção de fótons e geração de elétrons. Os principais mecanismos de ruído no fotodetector são os ruídos de disparo e ruído térmico, os quais são comumente modelados por uma distribuição Gaussiana de média zero, bem como diretamente proporcionais à largura de banda do sinal [12]. No presente estudo, as principais fontes de distorção são provenientes da resposta não linear do modulador MZM e da adição de ruídos no processo de fotodetecção. A dispersão cromática e os efeitos não lineares foram desconsiderados, visto que o *fronthaul* óptico simulado possui reduzida dispersão cromática acumulada e uma potência óptica insuficiente para excitar efeitos não-lineares. Os ruídos do fotodetector produzem uma parcela menor de degradação em relação a resposta não-linear do MZM, logo, a nossa proposta consiste em aplicar um algoritmo de IA para otimizar os parâmetros de configuração do modulador MZM.

Utilizou-se Evolução Diferencial (*Differential Evolution* - DE) [13] para otimizar os parâmetros de entrada V_{BIAS} e P_L , em função das propriedades ópticas e elétricas do sistema em questão. Optou-se por utilizar a variação DE/best/1/bin, por termos poucas variáveis a serem otimizadas e pela sua característica de rápida convergência. Em suma, o algoritmo consiste em gerar uma população inicial, em que cada indivíduo possui diferentes valores de genes (V_{BIAS} e P_L). A partir destes indivíduos são realizadas as três seguintes operações genéticas (operadores evolutivos): Mutação, Cruzamento e Seleção. Estas operações são repetidas sucessivamente até que se alcance algum critério de interrupção – em nosso caso um erro mínimo atingido ou um valor pré-estabelecido de iterações – conforme ilustra o fluxograma da Fig. 3. Para cada indivíduo gerado pelo algoritmo no Matlab, é realizada uma simulação no Optisystem, que retorna valores de SER e a magnitude do vetor do erro vetorial médio (EVM_{RMS}), referentes àquele indivíduo. Após determinado número de iterações do algoritmo, o indivíduo que possuir menores SER e EVM_{RMS} é selecionado, e os seus genes (V_{BIAS} e P_L) são os valores otimizados. O tamanho da população, a taxa de cruzamento e o fator de mutação (*crossover rate*) utilizado foram de 30, 0,85 e 0,5 respectivamente.

Fig. 3. Fluxograma do algoritmo de evolução diferencial.



3 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA DE IA PARA ROF

Esta seção apresenta uma validação numérica da ferramenta de IA aplicada a um sistema RoF. Após a otimização, comparou-se a SER obtida com a SER teórica para um sistema OFDM, operando em um canal de ruído branco aditivo Gaussiano (*additive white Gaussian noise - AWGN*), a qual pode ser aproximada por [14]

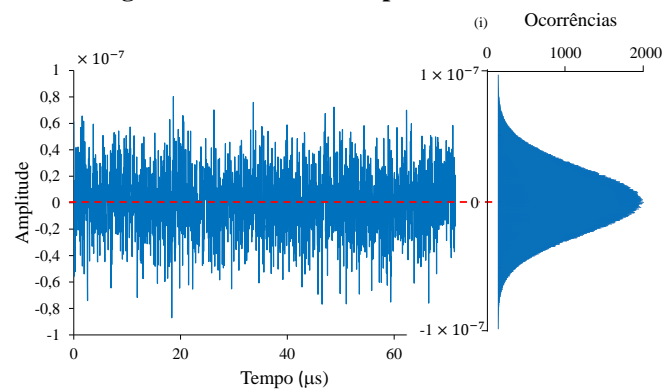
$$Pe = \bar{\mu}Q \left(\sqrt{\xi \frac{E}{N_0}} \right) \quad (1)$$

onde $\bar{\mu}$ e ξ são fatores que dependem da geometria da constelação. Por exemplo, para constelações quadradas, $\bar{\mu} = 4(\sqrt{M} - 1)/\sqrt{M}$ e $\xi = 3/(M - 1)$.

As principais fontes de degradação de SNR presentes neste estudo foram a resposta não linear do MZM e o ruído adicionado pelo fotodetector. Os ruídos do fotodetector são provenientes da geração de correntes elétricas interferentes, que somadas ao sinal fotodetectado resultam em uma degradação da relação sinal ruído. Estes ruídos podem ser classificados em ruído de disparo e ruído térmico. Caso exista algum processo de amplificação óptica no enlace, outro tipo de ruído é gerado devido à emissão espontânea amplificada de luz (*amplified spontaneous emission- ASE*) [15]. Porém, este último não foi considerado porque o enlace proposto não possui amplificação óptica. Adicionalmente, a corrente escura do fotodetector, a qual é gerada ainda que não exista luz incidindo no fotodetector, também contribui com a geração de uma parcela do ruído de disparo e foi considerada nesta análise. A Fig. 4 ilustra o ruído gerado pelo fotodetector ao longo do tempo de simulação. Neste sinal interferente estão contidas as parcelas de

ruído de disparo e ruído térmico. Como trata-se de um ruído gaussiano de média nula, ilustrado no histograma do *inset* (i) da Fig. 4, e dado que as amostras de ruído são decorrelacionadas, a potência de ruído será igual a sua variância, $s^2 = 0,00064$ pW. Este ruído é posteriormente adicionado ao sinal fotodetectado e representa uma pequena parcela de degradação ao sinal transmitido, quando comparado às degradações causadas pela resposta não linear do MZM.

Fig. 4. Ruído adicionado pelo fotodetector



A Fig. 5 apresenta o desempenho do sistema RoF baseado em OFDM para diferentes ordens de modulação em amplitude (M -QAM), e expõe resultados de SER em função da SNR para $M = 16, 64$ e 256 . Inicialmente, obteve-se por tentativa e erro, os valores de entrada que minimizassem a SER para o 16-QAM OFDM: $P_L = 7,85$ dBm e $V_{BIAS} = 13,5$ V. Estes valores minimizaram a geração de produtos de intermodulação e, conseqüentemente, resultaram em menor degradação de SNR e redução na SER. Neste caso, a configuração manual não otimizada se aproximou do resultado otimizado pelos algoritmos de IA. Caso algum parâmetro do sistema seja modificado, torna-se necessário avaliar novamente os valores que minimizam a SER. Uma vez que esta ação não seja realizada, haverá aumento da SER, como pode ser observado na Fig. 5 comparando-se as curvas de SER sem otimização com as curvas otimizadas por IA. Nota-se que a otimização por IA resulta em uma redução significativa da SER do sistema, principalmente para ordens de modulação elevadas, que demandam maior SNR. Para altas SNRs, as degradações geradas pelo processo de modulação eletroóptica são as causas predominantes de erros de símbolo. Caso os algoritmos de IA não sejam aplicados para a otimização, as distorções causam uma quantidade de erro de símbolos que independem da variância do ruído. Por outro lado, ao aplicar os algoritmos de IA para a otimização, torna-se possível encontrar um ponto de operação que resulta em menor

distorção, degradação de desempenho reduzida e curva da SER simulada se aproximando da teórica para um sinal OFDM em um canal AWGN. Para baixos valores de SNR, a causa predominante de erros é o ruído AWGN. Neste caso, o ruído afeta significativamente o sinal e o ajuste da tensão de polarização do MZM não produz uma redução da SER. Nota-se ainda que o uso de IA mantém a penalidade de SNR, inserida pelo sistema RoF, constante e mantida em torno de 2,85 dB para todas as ordens de modulação.

Finalmente, a Fig. 6 apresenta as constelações recebidas para o sistema 256-QAM OFDM com SNR = 50 dB, antes (Fig. 6(a)) e após a aplicação do algoritmo de computação evolutiva (Fig. 6(b)). Pode-se observar que o emprego de IA resultou em símbolos menos dispersos na constelação, uma vez que a otimização minimizou as possíveis distorções do sistema RoF. Adicionalmente, o parâmetro de desempenho EVM_{RMS} foi reduzido de 3,2% para 0,8%, resultando em uma SER menor. Isso posto, conclui-se que os algoritmos de computação evolutiva podem ser eficientemente aplicados para otimizar o desempenho do sistema RoF.

Fig. 5. Taxa de erro de símbolos em função da SNR para 16, 64 e 256-QAM.

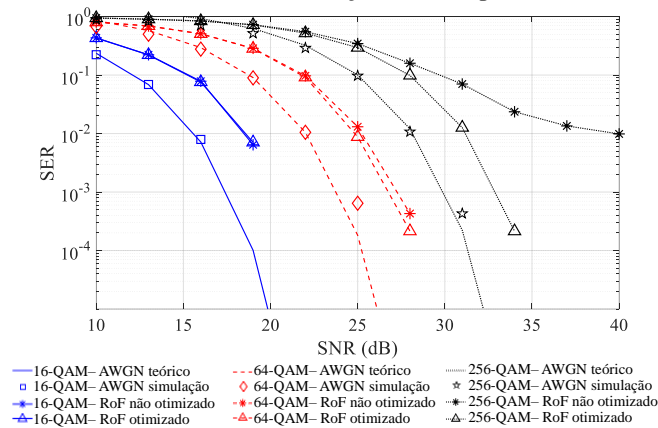
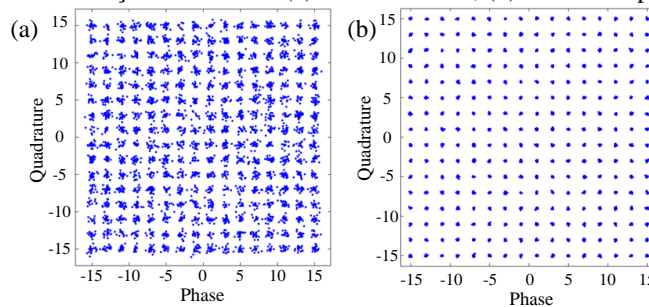


Fig. 6. Constelações recebidas: (a) não otimizado; (b) otimizado por IA.



4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma prova de conceito da aplicação de IA em sistemas RoF, visando aplicações 5G e 6G de alta vazão. A ferramenta de IA proposta, baseada em computação evolutiva, se mostrou eficiente para adequar os parâmetros ópticos de entrada e otimizar o desempenho do enlace para diferentes ordens de modulação. Apontou-se que em um sistema RoF não amplificado, as principais fontes de degradação da SNR são provenientes da resposta não linear do MZM e da adição de ruídos pelo fotodetector. Além disso, demonstrou-se que o ruído do fotodetector representa uma parcela menor de degradação quando comparado à resposta não linear do MZM. Porém, estes ruídos estão diretamente relacionados com a largura de banda do sinal transmitido. Em outras palavras, a influência do ruído do fotodetector aumenta com o aumento da largura de banda do sinal. Resultados numéricos demonstraram a eficiência da solução proposta e sua aplicabilidade, por meio da melhora de desempenho de um sistema RoF, o qual manteve constante uma penalidade de SNR aproximadamente igual a 2,85 dB, para diferentes ordens de modulação. Validou-se o sistema RoF assistido por IA com a redução do parâmetro EVM_{RMS} de 3,2% para 0,8%, resultando em uma constelação 256-QAM OFDM aprimorada com menor SER. Trabalhos futuros referem-se à aplicação de IA para compensar as distorções causadas pelo MZM e comparar os resultados obtidos com outras técnicas de otimização, como *Genetic algorithm (GA)* e *Particle Swarm Optimization (PSO)*.

REFERÊNCIAS

- 1 S. Parkvall et al., “NR: The new 5G radio access technology,” *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 1, no.4, pp. 24-30, Dec. 2017.
- 2 J. Peisa et al, “5G evolution: 3GPP Releases 16 & 17 overview,” Ericsson, *White Paper*, Mar. 9, 2020. Accessed: Sep. 9, 2020. [Online].
- 3 Z. Zhang et al., “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture and key technologies,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28-41, Sep. 2019.
- 4 G. Kalfas et al., “Next generation fiber-wireless fronthaul for 5G mmWave networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 3, pp. 138-144, May 2019.
- 5 S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458. Oct. 1998.
- 6 C. B. Schlegel and L. C. Perez, “Low-Density Parity-Check Codes,” in *Trellis and Turbo Coding: Iterative and Graph-Based Error Control Coding*, Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2015, pp. 249–318.
- 7 S. Ariyavisitakul and L. J. Greenstein, “Reduced-complexity equalization techniques for broadband wireless channels,” *IEEE J. Selected Areas in Commun*, vol. 15, no. 1, pp. 5-15, Jan. 1997.
- 8 R. M. Borges et al., “DSP-based flexible-waveform and multi-application 5G fiber-wireless system,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 38, no. 3, pp. 642-653, Feb. 2020.
- 9 X. Xie, M. Hui, T. Liu, and X. Zhang, “Hybrid linearization of broadband radio over fiber transmission,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 30, no. 8, pp. 692-695, Apr. 2018.
- 10 M. Noweir et al., “Digitally Linearized Radio-Over Fiber Transmitter Architecture for Cloud Radio Access Network’s Downlink,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 66, no. 7, pp. 3564-3574, Jul. 2018.
- 11 C. Mateo et al., “Minimization of feedback loop distortions in digital predistortion of a radio-over-fiber system with optimization algorithms,” *Photon. J.*, vol. 9, no. 3, 7904414, Jun. 2017.
- 12 Q. Z. Liu, D. L. Pulfrey and M. K. Jackson, “Analysis of the transistor-related noise in integrated p-i-n-HBT optical receiver front-ends,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 40, no. 12, pp. 2204-2210, Dec. 1993.
- 13 R. Storn and K. Price, “Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces,” *Journal of global optimization*, vol. 11. no.4 pp. 341-359, 1997.
- 14 L. L. Mendes and R. Baldini Filho, “Clipping Distortion Performance of Nonsquare M-QAM OFDM Systems on Nonlinear Time-Variant Channels,” *IEEE Trans. on Vehicular Technol.*, vol. 60, no. 8, pp. 4046-4051, Oct.. 2011.
- 15 D. Guang-Hua and E. Georgiev, “Non-white photodetection noise at the output of an optical amplifier: theory and experiment,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 8, pp. 1008-1014, Aug. 2001