

Estudo de Interfaces Ópticas para Equipamentos de RF

Felipe Rodrigues Malizia, Arthur Gonçalves Marton e Ramon Maia Borges

Resumo— A integração entre sistemas ópticos e de radiofrequência (RF) representa uma solução chave para redes de telecomunicações atuais e futuras. Este artigo apresenta um estudo sobre interfaces ópticas para dispositivos e equipamentos de RF. O objetivo é mapear os principais tipos de interfaces que vêm sendo exploradas para habilitar sistemas fibra-rádio e identificar lacunas de análise ou potencial de desenvolvimento na temática.

Palavras-Chave— Dispositivos de RF, Interface óptica, Rádio sobre fibra, sistema fibra-rádio.

Abstract— The integration of optical and radiofrequency (RF) systems is a key solution for the current and next telecommunication networks. This paper presents a study on optical interfaces applied to RF devices and equipment. The goal is mapping the interfaces that have been exploited to enable optical-wireless systems, as well as identifying gaps and opportunities in this topic.

Keywords— Fiber-wireless system, Optical Interface, Radio over fiber, RF devices.

I. INTRODUÇÃO

As comunicações ópticas passaram por evolução relevante nas últimas décadas e seguem em desenvolvimento contínuo na direção de atender inúmeras aplicações. Em razão de vantagens como imunidade a interferência eletromagnética, oferta de ampla largura de banda e atenuação significativamente reduzida em relação a outras tecnologias, nota-se sua aplicabilidade em diversos segmentos: aviação, engenharia biomédica, defesa, sistemas satelitais, banda larga fixa, sistemas celulares, entre outros [1]. É notável, inclusive, a expansão da infraestrutura de fibra óptica, que no Brasil conecta mais de 78% dos municípios segundo a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) [2].

No caso dos sistemas sem fio, que ocupam papel de destaque no setor de telecomunicações uma vez que proporcionam facilidades na construção das redes e conectividade com mobilidade, a demanda por tecnologia óptica cresce à medida que serviços inovadores surgem envolvendo alta taxa de dados, ambientes críticos, conexão de pessoas e coisas. Trata-se de um cenário fibra-rádio onde as comunicações ópticas apoiam as comunicações sem fio para garantir o funcionamento das redes atuais e promover avanços em redes futuras [3].

Considerando que sistemas sem fio modernos preveem integração com sistemas ópticos, faz-se necessário lidar com interfaces ópticas para que dispositivos ou equipamentos eletrônicos sejam conectados ao meio óptico de transmissão. Cabe mencionar que o conceito de interface óptica aqui empregado se estende ao mecanismo de conversão eletroóptica ou optoeletrônica, processo em que um sinal elétrico é inserido no domínio óptico ou vice-versa, respectivamente [4].

Felipe Rodrigues Malizia, Arthur Gonçalves Marton, Ramon Maia Borges, Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, e-mail: ramonmb@unifei.edu.br. Este trabalho foi realizado com o apoio de FAPEMIG (processo APQ-01618-24 e bolsa de Iniciação Científica), CNPq na forma de bolsa de Iniciação Científica, CAPES e UNIFEI.

Este trabalho apresenta um estudo sobre interfaces ópticas para dispositivos e equipamentos eletrônicos, em especial aqueles que lidam com radiofrequência (RF), micro-ondas ou ondas milimétricas. O objetivo é mapear os tipos de interfaces que vêm sendo exploradas, comercialmente e em nível de pesquisa, para a implementação de sistemas fibra-rádio. Como contribuição, além de tal mapeamento, aponta-se lacunas de análise e potencial de desenvolvimento futuro na temática em questão.

II. INTERFACES ÓPTICAS

Durante o estudo foram elencadas cinco vertentes de interfaces ópticas, sendo responsáveis pela grande maioria das aplicações envolvendo optoeletrônica. Esta seção trata destas vertentes e expõe casos de uso comercial ou relatados na literatura.

A. Conversor de mídia

Conversores de mídia correspondem à uma vertente amplamente comercializada com diversos tamanhos de invólucro e diferentes taxas de vazão. Funcionam como uma interface de conversão óptica para Ethernet e/ou Ethernet para óptica. Assim, um elemento eletrônico de rede que transmite dados no padrão Ethernet pode ter sua porta de saída conectada à entrada Ethernet do conversor de mídia, que por sua vez disponibiliza os dados já no domínio óptico em uma porta transmissora (TX) preparada para conexão direta com fibra óptica. Ao receber um sinal óptico via fibra na porta receptora (RX), o conversor de mídia direciona os dados à porta elétrica no padrão Ethernet após conversão optoeletrônica, de modo a entregá-los a elemento eletrônico de rede que opere em tal padrão. Existem versões destes conversores que operam em *full-duplex* com uma única porta óptica ao incorporar multiplexação por divisão de comprimento de onda [5,6].

A Fig. 1(a) expõe um exemplo de conversor de mídia. Essa vertente de interface entre os domínios elétrico e óptico foi idealizada fora do contexto *óptico-wireless*, sendo tipicamente utilizada para comunicação em banda base entre elementos de redes de computadores. As vantagens estão relacionadas à substituição de cabeamento Ethernet por fibra óptica, o que proporciona no cenário descrito: redução de peso e tamanho do canal físico de comunicação; imunidade a interferência eletromagnética; taxas elevadas em razão da ampla largura de banda dos canais ópticos; redes com alcance superior em termos de distância. Um exemplo recente de aplicação considera o emprego de conversor de mídia para conceber um equipamento que recebe sinais elétricos de diversos sensores e os encaminha para a Internet através de uma saída óptica com protocolo Ethernet [7].

B. Conjunto Laser e Fotodetector

Um dispositivo diodo laser conectorizado, ao ser modulado diretamente por um sinal elétrico, corresponde a uma interface de conversão eletroóptica uma vez que emite luz transportando a informação elétrica inserida diretamente na corrente de alimentação do laser e está preparado para conexão com fibra

óptica através de adaptadores ópticos. O processo reverso requer um fotodetector conectorizado, que realiza a conversão optoeletrônica na recepção [4].

A Fig. 1(b) exemplifica um dispositivo laser. Tal elemento, na forma de componente, tipicamente compõe circuitos optoeletrônicos por exemplo em *transponders* de rede óptica, não sendo encontrados integrando diretamente equipamentos de rádio. Na mesma linha, fotodiodos e fotodetecores compõem circuitos optoeletrônicos ou, quando encapsulados, são usados externamente aos equipamentos eletrônicos como interface de recepção óptica e provimento de sinal elétrico correspondente [8,9].

C. Modulador eletroóptico

O modulador eletroóptico é um componente que possui entrada para sinal elétrico de RF, entrada para sinal óptico oriundo de laser, entrada para tensão de polarização e saída óptica. Corresponde a um dos tipos de interface entre o domínio elétrico e o domínio óptico. Seu princípio de funcionamento consiste em receber uma portadora óptica e modulá-la com o sinal de RF também recebido, de modo que os dados deste último estejam presentes no sinal óptico de saída. Tal processo é conhecido como modulação externa e é aplicado na etapa de lançar o sinal de RF na fibra óptica [4]. Na recepção, onde deseja-se recuperar o sinal de RF no domínio elétrico, um fotodetector é comumente utilizado.

A Fig. 1(c) apresenta uma fotografia de um modulador eletroóptico. Trata-se de um dispositivo muito utilizado em experimentos e/ou montagens sob bancada de laboratório, uma vez que requer uma série de conexões [10,11]. Não é encontrado integrando diretamente equipamentos de rádio, sendo utilizado como interface externa a estes equipamentos. A vantagem dos moduladores está associada à ampla resposta em frequência que oferecem. Encontra-se moduladores comerciais aptos a lidar com sinais de RF da ordem de 40 GHz [12].

D. Transceptores ópticos plugáveis

Os transceptores ópticos plugáveis de formato pequeno (SFPs) correspondem à vertente de interface óptica mais difundida comercialmente para equipamentos de rádio. São encontrados inclusive já integrados nestes equipamentos, habilitando interface de comunicação bidirecional via fibra óptica [13]. Modelos de SFP se diferenciam, por exemplo, quanto ao comprimento de onda de operação, tipo de fibra aceita no lado óptico da conexão e taxa de dados de operação. São construídos à base de fotônica integrada e avanços neste segmento já resultam em SFPs aptos a lidar com taxas da ordem de 800 Gbit/s [14]. A Fig. 1(d) exemplifica um transceptor óptico plugável.

SFPs têm encontrado aplicação relevante nas redes de acesso de sistemas celulares, permitindo que unidades de banda base (BBU) e unidades de rádio remotas (RRU) equipadas com esta interface se comuniquem via enlace de rádio sobre fibra digital (D-RoF), onde o sinal de RF digitalizado é transmitido via fibra óptica com o auxílio de protocolos como o *Common Public Radio Interface* (CPRI) [4,15]. D-RoF incorpora vantagens oriundas das comunicações ópticas e em razão da

transmissão em banda base não sofre com o efeito da dispersão cromática, que poderia causar nulos de potência indesejados. Por outro lado, requer *upconversion* na estação remota e resulta em ocupação de banda na fibra superior àquela oriunda dos dados úteis devido ao uso de protocolos [4].

E. Módulos Rádio sobre Fibra (RoF)

Módulos Rádio sobre Fibra (RoF) são bastante utilizados em sistemas fibra-rádio, especialmente operando na faixa de micro-ondas. São, entretanto, tipicamente alocados fora dos equipamentos de rádio, necessitando de conexão externa com tais equipamentos [16]. Esses módulos podem operar em pares de forma *simplex*, sendo um elemento TX (realiza a conversão eletroóptica) e outro RX (faz a conversão optoeletrônica) conforme mostra a Fig. 1(e), ou de forma bidirecional com TX e RX integrados no mesmo módulo. No caso do módulo RoF transmissor, pode ser construído com base na modulação direta ao integrar um laser em um encapsulamento com entrada de RF e saída óptica conectorizada, ou ser baseado na modulação externa ao integrar laser e modulador eletroóptico no encapsulamento mencionado. Já o módulo RoF receptor integra um fotodetector em encapsulamento com entrada óptica conectorizada e saída de RF. O fato de oferecerem encapsulamento compacto com entradas e saídas bem definidas simplifica o manuseio e justifica o interesse por esses módulos, sendo uma vantagem em relação as vertentes comentadas nas subseções II.B e II.C.

Os módulos RoF têm sido utilizados principalmente na rede de controle de sistemas satelitais e em experimentos associados à rede de acesso de sistemas celulares, ainda que de forma externa aos equipamentos de rede [17]. O uso destes módulos habilita enlaces analógicos de RoF (A-RoF) conectando, por exemplo, BBUs com RRUs via fibra óptica. Em relação à metodologia D-RoF, a solução analógica lida com nulos de potência, mas possui as vantagens de economizar largura de banda na fibra e transmitir o sinal de RF no meio óptico sem protocolos e já na frequência de canal, simplificando assim as unidades remotas que passam a não necessitar de circuitos para translação em frequência [4]. Outro exemplo de aplicação está em [18], onde os autores utilizam um módulo RoF para realizar a comunicação entre dois abrigos com equipamentos elétricos frágeis a ruídos que acabavam tendo seus sinais adulterados pela alta interferência magnética presente em uma região em que a rede passava via cabo coaxial.

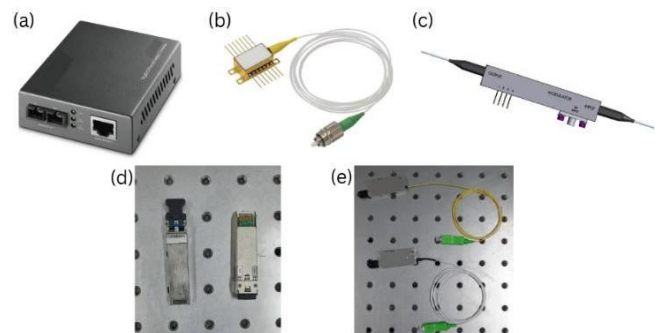


Fig. 1. Diferentes interfaces entre o domínio elétrico e o domínio óptico: (a) Conversor de mídia; (b) Diodo laser; (c) Modulador eletroóptico; (d) Módulos SFP; (e) Módulos RoF.

TABELA I. RESUMO DAS INTERFACES E SUAS APLICAÇÕES TÍPICAS

Interface	Aplicações Típicas	Vantagens / Desvantagens	Referências
Conversor de mídia	Conversão de sinais ethernet/óptico.	Amplamente comercializado, converte sinais ethernet em sinais ópticos / opera em banda base	[5,6,7]
Laser	Geração de sinais ópticos	Interface conectorizada / requer componentes adicionais para lidar com a informação	[8,9]
Modulador eletroóptico	Experimentos e montagens em bancada	Controle da modulação e opera em frequências elevadas / componente não integrado e maior complexidade	[10,11,12]
Módulo SFP	Conectar RRH's à BBU's	Plugável e difundido no mercado / requer protocolos	[13,14,15]
Módulo RoF	Sistemas fibra-rádio	Transmissão livre de protocolos / externo aos equipamentos	[16,17,18]

III. LACUNAS E OPORTUNIDADES DE ESTUDO

Das abordagens analisadas neste estudo, apenas módulos SFP foram encontrados em soluções integradas em equipamentos de RF. E ainda, tal integração foca na aplicação de redes de acesso de rádio dos sistemas celulares. Além disso, a maioria dos trabalhos reportados na literatura envolvendo convergência óptico-wireless se concentram na metodologia e resultados, deixando escapar detalhes sobre como as interfaces ópticas seriam implementadas na aplicação alvo de análise.

Diante do fato de que as comunicações ópticas estão ganhando espaço no apoio às comunicações sem fio, uma oportunidade de estudo é avaliar o uso de SFPs em diferentes tecnologias que vão além da rede celular, por exemplo em sistema de Internet das Coisas (IoT), cenário que já possui inclusive investigações iniciais envolvendo óptica [19,20]. Outra abordagem com potencial relevante de estudo diz respeito ao desenvolvimento de *front-ends* optoeletrônicos plugáveis e baseados em módulos RoF, de modo a permitir a integração destes em equipamentos de rádio, como ilustra a Fig. 2. Avanços nesse sentido podem habilitar nova opção de interface óptica integrada em relação aos módulos SFPs, incorporando característica banda larga e livre de protocolos. Benefícios podem incluir flexibilidade no atendimento de múltiplas tecnologias e facilidade na implementação de enlaces A-RoF. Considerando o desenvolvimento de protótipos para tal *front-end*, há também oportunidade para estudos de caracterização, estabilidade e compatibilidade eletromagnética.

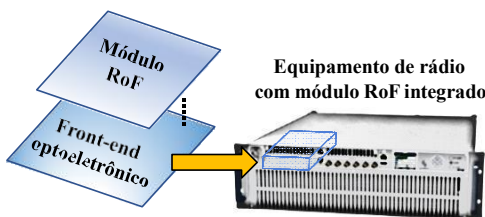


Fig. 2. Integração de módulo RoF em equipamento de rádio através de desenvolvimento de front-end optoeletrônico.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo reportou vertentes de interfaces ópticas para dispositivos e equipamentos eletrônicos, em especial aqueles que compõem sistemas fibra-rádio. Após discussões envolvendo conceitos e aplicações típicas destas interfaces, identificou-se lacunas e potencial de desenvolvimento futuro. O estudo pode contribuir para que pesquisadores ingressantes no tema possam acelerar a aquisição de conhecimento e obter uma visão de oportunidade investigativa no contexto de interfaces entre os domínios óptico e elétrico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

REFERÊNCIAS

- [1] P. J. Winzer, D. T. Neilson, A. R. Chraplyvy, "Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years," *Opt. Express*, v. 26, n. 18, pp. 24190-24239, Setembro 2018.
- [2] Anatel, "Relatório anual de gestão 2024," [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-publica-relatorio-anual-de-gestao-2024-e-mostra-avancos-na-conectividade-nos-direitos-do-consumidor-e-na-economia-digital>. Acessado: Abril 2026.
- [3] H. R. D. Filgueiras et al., "Wireless and optical convergent access technologies toward 6G," *IEEE Access*, v. 11, pp. 9232-9259, Janeiro 2023.
- [4] S. Jezekiel, *Microwave photonics: devices and applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- [5] TP-Link, "Media Converters & Chassis", Datasheet, 2012
- [6] TP-Link, "Gigabit WDM Media Converter Model: TL-FC311A-2, TL-FC311B-2 (2 Km) TL-FC311A-20, TL-FC311B-20 (20 Km)", Datasheet V2, 2021.
- [7] X. Ye, Y. Zheng, K. Huang, T. Lv e X. Sun, "Hierarchical Optical Access Switching Networking With Distributed Edge Nodes for IoT", *Journal of Lightwave Technology*, v. 43, no. 17, pp. 8125-8132, Setembro 2025.
- [8] A. A. Manga, K. Balskus., G. Gastebois, F. Emaury, J. Roldan e A. Karas, "Experimental Validation of an RF-Over-Fiber Reference Signal for Frequency Conversion in Large Multi-Tile Electronically Scanned Antennas", *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 67, e70316, Agosto 2025.
- [9] THORLABS, "DET08CFC(M) Fiber input InGaAs Biased Detector", User Guide, Abril 2024.
- [10] E. S. Lima, L. A. M. Pereira, R. M. Borges, Arismar Cerqueira S. Jr., "40G new radio photonically-amplified xhaul," *Optical Fiber Technology*, v. 60, 102358, 2020.
- [11] R. M. Borges et al., "Integration of a GFDM-based 5G transceiver in a GPON using radio over fiber technology," *J. Lightw. Technol.*, v. 36, pp. 4468-4477, Outubro 2018.
- [12] Fujitsu, "40 Gbps intensity modulator," FTM7939EK datasheet, 2020.
- [13] ZTE Corporation, "ZXSDR R8882 Macro Remote Radio Unit", Product Description, 2011.
- [14] Cisco, "Cisco OSFP 800G Transceiver Modules", Data sheet Cisco Public, 2026.
- [15] N. J. Gomes, P. P. Monteiro, and A. Gameiro, Eds., *Next generation wireless communications using radio over fiber*. Noida: John Wiley & Sons, 2012.
- [16] Optical Zonu, "Dual Transmitter or Dual Tranceiver", Datasheet [online] acessado em: 13/05/2026.
- [17] C. H. S. Lopes et al, "Non-Standalone 5G NR Fiber-Wireless System Using FSO and Fiber-Optics Fronthaul", *J. Lightw. Technol.*, v. 39, pp. 406-417, Janeiro 2021.
- [18] P. Petrović et al., "Testing RFoF Link for Transmitting HF-OTHR Signal Between Transmitter and Receiver shelters", in *28th Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 1-4, Belgrade, Serbia, 2020.
- [19] S. Yoshihara, S. Mito e N. Yoshimoto, "Topological configuration and demonstration of communication and micro grid network architecture for wide-area precision agriculture based on renewable energy resources", in *International Symposium on Multimedia and Communications Technology (ISMATC)*, Tagbilaran, Philippines, 2025.
- [20] M. Waseem, A. López, P. L. Carro, e M. A. Losada, "Cellular Guardband NB-IoT Performance Over PMMA Plastic Optical Fibers", in *Journal of Lightwave Technology*, v. 41, pp. 7302-7308, 2023.