

Análise Experimental de uma Solução baseada em RoF para Sistemas Repetidores de TV digital

Arthur Gonçalves Marton, Felipe Rodrigues Malizia, Arismar Cerqueira Sodré Jr., e Ramon Maia Borges

Resumo— Este artigo apresenta uma análise experimental da aplicação de rádio sobre fibra (RoF) com modulação externa para aprimorar o desempenho de sistemas repetidores de televisão (TV) digital operando em frequência única. Tal solução permite mitigar a interferência por realimentação tipicamente presente nas estações repetidoras. É ainda livre de protocolos, não requer translação em frequência no equipamento repetidor e suporta diferentes padrões de comunicação. Os resultados demonstram *modulation error ratio* (MER) superior a 42 dB na estação repetidora, assim como pequena degradação (inferior a 1 dB) desta métrica após 25 km de enlace óptico.

Palavras-Chave— *Modulação externa, Rádio sobre fibra, Repetidores de RF, TV digital.*

Abstract— This paper reports an experimental analysis of using radio over fiber (RoF) technology, based on external modulation, to improve performance of on-channel repeater (OCR) systems aimed for digital television (DTV) broadcasting. Such approach mitigates interference from coupling loop wave commonly found in OCRs. It is protocol-independent, requires no remote upconversion, and supports multiple communication standards. Results show modulation error ratio (MER) above 42 dB at the repeater station, with minimal degradation (less than 1 dB) after 25-km optical link.

Keywords— *External modulation, Radio over fiber, on-channel repeater, digital TV.*

I. INTRODUÇÃO

A infraestrutura de fibra óptica vem crescendo de forma significativa ao longo dos anos e, segundo a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), já alcança mais de 78% dos municípios brasileiros em meio à meta estratégica de elevar tal percentual a 100% até 2027 [1]. Esta expansão, impulsionada primariamente pela demanda por banda larga fixa, é também atrativa para a implementação de sistemas fibra-rádio, que permitem aproveitar as comunicações ópticas para obter avanços nas redes sem fio. Uma aplicação de destaque neste campo é a construção da rede de acesso de rádio dos sistemas celulares de quinta geração (5G), incluindo os chamados *backhaul* e *fronthaul* ópticos baseados em rádio sobre fibra (RoF - *radio over fiber*) [1-3].

RoF permite distribuir sinais de radiofrequência (RF) através da fibra óptica, proporcionando vantagens como imunidade à interferência eletromagnética e baixa atenuação ($\approx 0,2$ dB/km em 1550 nm para fibras monomodo (SMF - *single mode fiber*))

inclusive nas faixas de micro-ondas e ondas milimétricas. Além do emprego em redes móveis de nova geração, são diversos os cenários de uso da tecnologia: sistemas de antenas distribuídas, infraestrutura terrestre de comunicações satelitais, esquemas de defesa, dentre outros [4-7]. Em sistemas de televisão (TV) digital terrestre gratuita (DTTB - *digital terrestrial television broadcasting*), RoF adquire potencial de aplicação considerando o uso compartilhado das redes ópticas existentes e os novos desafios de cobertura que acompanham a chegada da TV 3.0 [8].

Uma das estratégias para ampliar a radiodifusão e alcançar regiões desprovidas de sinal e áreas de sombra remete a sistemas repetidores em canal único (OCRs - *on-channel repeaters*). Estes, entretanto, sofrem tipicamente com interferência por realimentação na estação repetidora (Fig. 1(a)), sendo tal problema combatido com a isolamento das antenas receptora e transmissora na torre, o uso de antenas de elevada relação frente-costa, e o uso de canceladores de eco no rádio repetidor [9,10]. Ainda assim, pode ocorrer degradação importante na métrica *modulation error ratio* (MER) dependendo da intensidade e do comportamento dinâmico da onda interferente [10,11].

Neste contexto, avanços no cancelamento de eco com base em processamento digital de sinais (DSP - *digital signal processing*) vêm sendo alcançados, e RoF aparece como alternativa técnica direcionada a aprimorar o desempenho digital da retransmissão no meio sem fio. Por exemplo, Ar-Reyouchi et al. propuseram um método que combina equalização digital adaptativa e cancelamento Doppler para supressão de eco, reportando otimização em relação a métodos prévios ao obter valores de MER na ordem de 42 dB [12]. Em [13], os autores sugeriram o uso de RoF em OCR para DTTB no cenário específico em que o terminal móvel se encontra no ambiente subterrâneo. Tal abordagem considerou o uso de fibra óptica entre as antenas de recepção e transmissão do site repetidor, tornando-as distantes e mais isoladas entre si. Particularmente, apresentamos em [14] uma análise experimental envolvendo o uso de RoF baseado na técnica da modulação direta (DM - *direct modulation*) para aplicações em OCR voltado a DTTB. O trabalho explorou 25 km de fibra óptica para distribuir sinais de RF já na frequência de canal até a estação repetidora, de modo a dispensar a antena de recepção e mitigar a interferência por realimentação. Obteve-se MER superior a 42 dB no local correspondente à estação repetidora.

Este artigo é uma extensão de [14] e reporta uma investigação sobre a aplicação de RoF, agora baseado na técnica da modulação externa (EM - *external modulation*), para a distribuição de sinais de RF em sistema OCR direcionado à DTTB. O objetivo é avaliar experimentalmente o desempenho digital da solução em questão. As principais contribuições são: resultado de MER após 25 km de enlace RoF implementado com EM; análise de potencial da solução alvo do estudo em relação àquela baseada em DM previamente reportada na literatura.

Arthur Gonçalves Marton, Felipe Rodrigues Malizia e Ramon Maia Borges, Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá-MG, e-mail: ramonmb@unifei.edu.br; Arismar Cerqueira Sodré Junior, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: arismar@inatel.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, Inatel e UNIFEI.

II. ROF APLICADO A SISTEMA REPETIDOR DE TV DIGITAL

A Fig. 1(b) ilustra uma estação repetidora em canal único assistida por tecnologia RoF na direção de aprimorar o desempenho de OCRs. Em contraste com a abordagem convencional representada na Fig. 1(a), nota-se a recepção do sinal de RF via fibra óptica e a ausência de antena receptora na torre, o que contribui para mitigar a interferência por realimentação com alívio nos blocos de DSP do rádio repetidor. Além disso, o emprego da solução RoF favorece a conexão de rádios repetidores mais distantes, uma vez que a atenuação na fibra é significativamente menor do que a perda associada à propagação no ar.

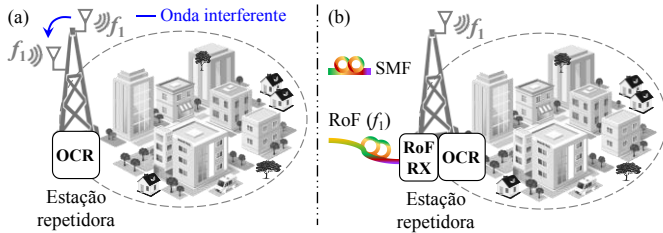
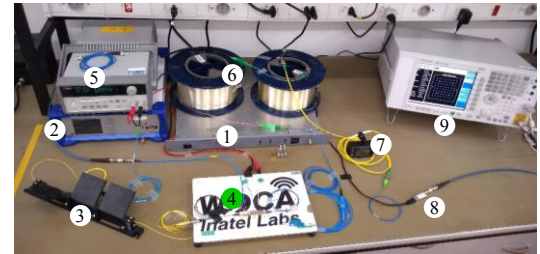
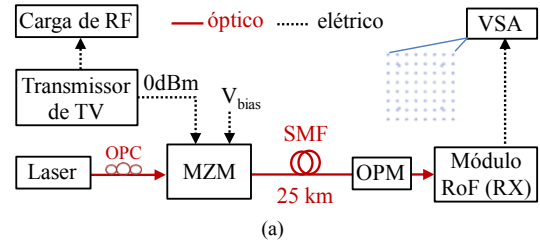


Fig. 1. Ilustração de um sistema repetidor em canal único: (a) solução típica; (b) solução com RoF.

O diagrama em blocos exposto na Fig. 2(a) detalha a montagem experimental da Fig. 2(b), utilizada para a análise investigativa em ambiente de laboratório. Um transmissor de TV digital operando no padrão *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial* (ISDB-T) e sintonizado no canal 24 foi conectado a uma carga de RF, enquanto uma amostra do sinal de saída com potência igual a 0 dBm chega a um modulador óptico (FTM7920FB Mach-Zehnder modulator (MZM)). Este é um componente chave para a técnica RoF baseada na modulação externa, uma vez que realiza a conversão eletro-óptica [15]. O modulador recebeu ainda uma portadora óptica contínua em 1550 nm oriunda de um laser e uma tensão de polarização (V_{bias}). V_{bias} determina a região da função de transferência em que o modulador opera e foi ajustada para o ponto de quadratura do MZM ($V_{bias} \approx 2$ V) visando linearidade. O controlador de polarização (OPC - *optical polarization controller*) usado entre o laser e o modulador permite controlar o estado de polarização da luz, uma tarefa necessária já que o MZM é sensível à polarização. O sinal óptico resultante na saída do modulador, transportando o sinal de TV já na frequência de canal, foi então lançado em 25 km de SMF (conexão de dois carretéis de fibra óptica disponíveis, com 12,5 km cada).

No ponto correspondente à estação repetidora, ou seja, na extremidade do enlace, um módulo RoF de recepção (OZ101 Mini) faz a conversão optoeletrônica e entrega o sinal de RF no padrão ISDB-T ao analisador vetorial de sinais (VSA - *vector signal analyzer*), que exibe o desempenho digital alcançado. O medidor de potência óptica em linha (OPM - *optical power monitor*) posicionado anteriormente ao módulo RoF foi utilizado para monitorar a potência entregue a tal módulo e poderia ser dispensado em instalação de campo, onde o VSA também seria substituído pelo rádio repetidor conectado à antena para irradiação. Assim como em [14], interferência por realimentação não foi emulada em bancada uma vez que a proposta não inclui antena receptora e se beneficia de imunidade à interferência eletromagnética pelo emprego de recepção de RF via fibra óptica.



1- Transmissor de TV; 2- Laser; 3- OPC; 4- Modulador óptico; 5- Fonte de alimentação; 6- SMF; 7- OPM; 8- RoF (RX); 9- VSA

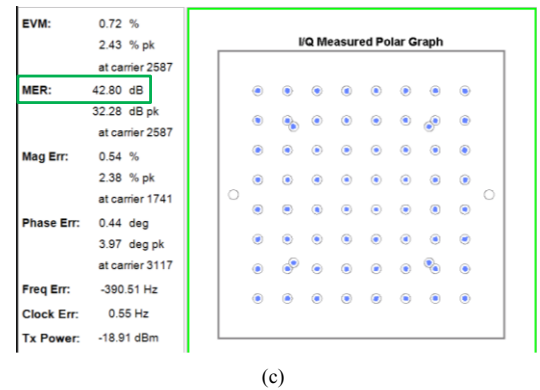


Fig. 2. RoF baseado em modulação externa aplicado a OCR: (a) diagrama em blocos; (b) fotografia da montagem experimental; (c) resultados.

A Fig. 2(c) apresenta os resultados medidos com o VSA. Observa-se os símbolos bem definidos na constelação e MER igual a 42,8 dB. Tomando o valor de MER obtido na saída do transmissor de TV (43,5 dB) como ótimo e o comparando com a MER resultante após os 25 km de enlace RoF, identifica-se uma degradação de apenas 0,7 dB neste parâmetro no ponto correspondente à estação repetidora. Notou-se ainda com o experimento a característica de estabilidade no desempenho digital analisado. Os resultados validam a possibilidade de aplicar RoF baseado em modulação externa para proporcionar desempenho atrativo a sistemas repetidores de TV digital operando em frequência única.

III. DISCUSSÃO: EM x DM

Esta seção reporta uma breve discussão, no contexto de RoF aplicado a OCRs para DTTB, sobre o emprego das técnicas de modulação externa (solução investigada neste trabalho) e modulação direta (solução apresentada em [14]). A Tabela I resume os aspectos chave discutidos: desempenho digital, convergência e simplicidade.

Ambas as soluções proporcionaram MER acima de 42 dB no ponto correspondente à estação repetidora, demonstrando potencial de uso seja no sentido de conectar rádios repetidores distantes e/ou no sentido de aprimorar o desempenho digital da

retransmissão no meio sem fio. Tomando os valores exatos de MER, isto é, 42,80 dB obtido com EM e 42,67 dB obtido com DM em [14], nota-se uma diferença desprezível para aplicações de DTTB. Embora a técnica RoF baseada na EM reconhecidamente proporcione desempenho digital superior em sistemas de micro-ondas e ondas milimétricas, por mitigar *chirp* e usufruir da ampla resposta em frequência de moduladores ópticos [15], os resultados da investigação experimental apontam para desempenho digital similar à DM no espectro de TV digital.

Ao considerar integração em redes ópticas existentes para convergência e uso compartilhado de infraestrutura com múltiplas tecnologias, as duas opções de técnica RoF (EM e DM) vêm sendo exploradas com resultados promissores reportados na literatura [16,17], o que indica aptidão em permitir tal integração. Cabe ressaltar que o cenário de convergência tecnológica é potencial para a aplicação alvo de estudo, ponderando que a ação de instalar cabos de fibra pode destoar do escopo principal de operadores de TV.

As duas soluções são livres de protocolos e distribuem o sinal de TV já na frequência de canal. Em termos de simplicidade, a solução RoF baseada em DM se mostra vantajosa uma vez que engloba um número reduzido de elementos, facilita questões operacionais e proporciona uso de módulos RoF transmissores reduzidos em tamanho. Estas características podem favorecer o desenvolvimento de *front-ends* optoeletrônicos para transmissores de TV digital, na direção de suprimir eventuais restrições em montagens ou conexões externas ao equipamento de rádio e facilitar a implantação prática.

TABELA I. TÉCNICAS RoF PARA SISTEMAS REPETIDORES DE TV DIGITAL

Técnica RoF	Desempenho digital	Convergência	Simplicidade
EM	Similar	Permite	Menor
DM			Maior

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise experimental da aplicação de RoF baseado na técnica da modulação externa para sistemas repetidores de TV digital operando em frequência única. A solução proporcionou MER igual a 42,8 dB com degradação mínima no ponto correspondente à estação repetidora, após 25 km de distribuição de RF via fibra óptica. Tal resultado valida a possibilidade de aplicar RoF com EM no cenário investigado de modo a obter desempenho digital atrativo. Além disso, os resultados obtidos apontam similaridade de performance digital em relação à abordagem explorando RoF com modulação direta, previamente reportada na literatura. Esta resposta investigativa mostra que a opção por EM não implica em ganhos significativos no contexto em questão e permite identificar a solução RoF com DM como mais atrativa para DTTB em razão da simplicidade. Trabalhos futuros visam expandir a análise comparativa e experimental, incluindo diferentes comprimentos de fibra e níveis de potência de RF, variação de temperatura, testes de campo em condições reais de interferência, e ensaios considerando o sistema de TV 3.0.

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), ao Instituto Nacional de Telecomunicações e à Universidade Federal de Itajubá.

REFERÊNCIAS

- [1] 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: Apr. 2026.
- [2] H. R. D. Filgueiras et al., "Wireless and optical convergent access technologies toward 6G," *IEEE Access*, v. 11, pp. 9232-9259, Janeiro 2023.
- [3] R. M. Borges et al., "Integrating optical and wireless techniques towards novel fronthaul and access architectures in a 5G NR framework," *Appl. Sci.*, v. 11, Maio 2021.
- [4] N. J. Gomes, P. P. Monteiro, and A. Gameiro, *Next generation wireless communications using radio over fiber*. Noida: John Wiley & Sons, 2012.
- [5] Z. Guo, J. Liu, S. Shimamoto, "Radio and power over fiber system for 4K/8K satellite antenna," in *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)*, Batam, Indonesia, 2020.
- [6] Y. Uçar, V. Rymanov, S. Makhlof, M. Grzeslo, R. Füllbrunn, A. Stöhr, "Low power consumption multi-channel RFoF system for Ka-band intra-satellite links," in *IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Barcelona, Spain, 2025.
- [7] Huber+Suhner, "RF-over-fiber for defense applications," Report, 2025.
- [8] A. S. S. Chaubet et al., "TV 3.0: An overview," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 71, no. 1, Mar. 2025.
- [9] L. Zhang et al., "Using layered division multiplexing for wireless in-band distribution links in next generation broadcast systems," *IEEE Trans. Broadcast.*, v. 67, pp. 68-82, Março 2021.
- [10] Rohde&Schwarz, "Dealing with external interference in a gap filler network," *White Paper*, Agosto 2018.
- [11] Elenos, "Introducing Itelco products and the new digital TV gap filler," Radio & TV Broadcast Equipment and Solutions Worldwide, 2020.
- [12] E. M. Ar-Reyouchi, Y. Lamrani, K. Ghomid, S. Rattal, "Very high-performance echo canceller for digital terrestrial television in single frequency network," *Int. J. Adv. Comput. Sci.*, v. 11, pp. 368-376, 2020.
- [13] Y. Kaneko, K. Nishiyasu, T. Higashino, M. Okada, "An evaluation of radio over fiber based gap-filler for high definition mobile broadcasting," in *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, Nara, Japan, 2016.
- [14] G. A. Mendonça, R. M. Borges, Arismar Cerqueira S. Jr., "Sistema gap filler assistido por radio sobre fibra," in *XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrt)*, Santa Rita do Sapucaí, Brasil, 2022.
- [15] S. Iezekiel, *Microwave photonics: devices and applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- [16] C. H. S. Lopes et al., "Non-standalone 5G NR fiber-wireless system using FSO and fiber-optics fronthauls," *J. Lightw. Technol.*, v. 39, pp. 406-417, Janeiro 2021.
- [17] R. M. Borges et al., "DSP-based flexible -waveform and multi-application 5G fiber-wireless system," *J. Lightw. Technol.*, v. 38, pp. 642-653, Fevereiro 2020.