

*Instituto Nacional de Telecomunicações*

André Luiz Marques Muniz

***Inatel***

*Front-end* de RF baseado em  
tecnologias fotônicas para redes 5G

Fevereiro/2017

***Front-end de RF baseado em tecnologias fotônicas  
para redes 5G***

André Luiz Marques Muniz

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodrê Júnior

Santa Rita do Sapucaí  
2017

Muniz, André Luiz Marques

M966f

Front-end de RF baseado em tecnologias fotônicas para as redes 5G. / André Luiz Marques Muniz. – Santa Rita do Sapucaí, 2017. 78 p.

Orientador: Prof. PhD. Arismar Cerqueira Sodré Junior.

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia e anexo.

1. Comunicações ópticas e sem fio 2. Fotônica de micro-ondas 3. Front-end de RF 4. Redes celulares 5G 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Sodré Junior, Arismar Cerqueira. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

## FOLHA DE APROVAÇÃO

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

---

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior  
Instituto Nacional de Telecomunicações – Brasil

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Antonella Bogoni  
Scuola Superiore Sant’Anna – Itália

---

Prof. Dr. Murilo Araújo Romero  
USP-São Carlos – Brasil

---

Prof. Dr. Felipe Beltran Mejia  
Instituto Nacional de Telecomunicações – Brasil

---

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

*“But I am exactly where I want to be because I got to commit my very being to this thing. I got to breath it, eat it, and sleep it. Until you get there, you will never be successful in life. But once you get there, I guarantee you the world is yours. So work hard and you can have whatever it is that you want.”*

Eric Thomas

*Às pessoas que me ensinaram os conceitos  
mais valiosos dessa vida, meus queridos pais.*

# Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, os meus pais Virgulino Muniz e Regina Marques de Oliveira Muniz pelo apoio e motivação em todas as minhas escolhas pessoais e profissionais. Agradeço também à minha família pela presença nos momentos importantes da minha vida.

À minha futura esposa Glenda Figueiredo Zanela pela confiança, conselhos e carinho nos períodos de conquistas e dificuldades. Muito obrigado pelas companhias e conselhos em todos os momentos que estivemos juntos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Jr. pela orientação e conhecimento compartilhado. Muito obrigado pelas oportunidades concebidas e conselhos que contribuíram para minha evolução pessoal e profissional.

Ao suporte técnico aos equipamentos de medição das empresas Keysight e Anritsu nos experimentos da dissertação de mestrado. Ao suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) no período do curso de mestrado.

Aos meus amigos e colegas do mestrado. Em especial, todos os membros do laboratório WOCA pelo apoio e amizade, proporcionando conquistas profissionais e grandes amizades. Ao MSc. Ramon Maia Borges pelos ensinamentos e contribuições nos trabalhos e artigos ao longo do mestrado.

# Índice

Índice .....	vii
Lista de Símbolos.....	ix
Lista de Abreviações.....	x
Lista de Publicações.....	xii
Resumo .....	xiv
Abstract.....	xv
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1.1. Contextualização e motivação.....	1
1.1.2. Contribuições e estrutura da dissertação .....	5
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Fundamentos teóricos</b> .....	<b>7</b>
2.1.1. Redes celulares de quinta geração (5G) .....	7
2.1.2. Sistemas rádio sobre fibra .....	10
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Front-end de RF baseado em tecnologias fotônicas</b> .....	<b>15</b>
3.1.1. Revisão bibliográfica.....	15
3.1.2. Conversor de RF baseado em tecnologia fotônica .....	17
3.1.3. Amplificador de RF baseado em tecnologia fotônica.....	20
3.1.4. <i>Front-end</i> de RF baseado em tecnologia fotônica.....	25
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1 Caracterização do <i>front-end</i> de RF baseado em tecnologias fotônicas</b> .....	<b>28</b>
4.1.1. Introdução.....	28
4.1.2. Desempenho do conversor de RF baseado tecnologia fotônica .....	28
4.1.3. Demonstração do mecanismo de ganho do amplificador de RF baseado em tecnologia fotônica.....	31
4.1.4. Análise de desempenho digital do amplificador de RF baseado em tecnologia fotônica	36
4.1.5. Implementação do <i>front-end</i> de RF baseado em tecnologias fotônicas.....	42
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>48</b>
<b>5.1 Conclusões</b> .....	<b>48</b>
<b>5.2 Trabalhos futuros</b> .....	<b>51</b>



Referências Bibliográficas ..... 52

## Lista de Símbolos

$\alpha$	Atenuação
$\gamma$	Coefficiente não-linear
$\lambda$	Comprimento de onda
$\omega_n$	Frequência angular
$A_i$	Amplitude da onda óptica
$BW$	Banda ocupada pelo sinal
$c$	Constante da velocidade de luz
$C$	Capacidade
$D$	Dispersão cromática
$E_{in}$	Campo elétrico de entrada
$f_n$	Frequência
$I_d$	Corrente fotodetectada
$P_{in}$	Potência de entrada
$P_o$	Potência de pico
$U_i$	Amplitude da onda óptica normalizada
$R$	Responsividade
$V_\pi$	Tensão de meia onda do modulador Mach-Zehnder
$V_{bias}$	Tensão de polarização do modulador Mach-Zehnder

## Lista de Abreviações

APD	<i>Avalanche Photo-Diode</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CW	<i>Continuous-wave</i>
DL	<i>Diode Laser</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
EVM	<i>Error Vector Module</i>
EHF	<i>Extremely-High Frequency</i>
ESA	<i>Electrical Spectrum Analyzer</i>
FTTA	<i>Fiber-to-the-antenna</i>
FTTH	<i>Fiber-to-the-home</i>
F-OFDM	<i>Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>
HETNET	<i>Heterodyne Network</i>
HNLF	<i>Highly Non-Linear Fiber</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IM-DD	<i>Intensity Modulation – Direct Direction</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IQ	<i>In-phase and Quadrature</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M2M	<i>Machine-to-machine</i>
MFWM	<i>Multiple Four Wave Mixing</i>
MWP	<i>Microwave photonics</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
N-FSK	<i>N-stage Frequency-Shift Keying</i>
N-PSK	<i>N-stage Phase-Shift Keying</i>
NLOS	<i>Non Line of sight</i>
N-QAM	<i>N-stage Quadrature and Amplitude Modulation</i>
OAD	<i>Optical Add-Drop</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFM	<i>Optical Frequency Multiplication</i>
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
OTPF	<i>Optical Tunable Pass-Band Filter</i>
PBRA	<i>Photonics-Based RF Amplifier</i>
PBRC	<i>Photonics-Based RF Conversion</i>
PBRF	<i>Photonics-Based RF Front-End</i>
PC	<i>Polarization Controller</i>
PD	<i>Photo-diode</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
<i>p-i-n</i>	<i>Junção intrínseca positiva e negativa</i>
PM-DD	<i>Phase Modulation – Direct Direction</i>
<i>p-n</i>	<i>Junção positiva e negativa</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RoF	<i>Radio Over Fiber</i>
RIN	<i>Relative Intensity Noise</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>

SONET	<i>Synchronous Optical Network</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SMF	<i>Single-Mode Fiber</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WIFI	<i>Wireless Fidelity</i>
XPM	<i>Cross Phase Modulation</i>

# Lista de Publicações

## Artigos publicados em periódicos

1. **A. L. M. Muniz**, R. M. Borges, Regivan N. da Silva, D. F. Noque and Arismar Cerqueira S. Jr., “Ultra-broadband Photonics-based RF Front-End Toward 5G Networks”, *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8(11), 2016.
2. R. M. Borges, **A. L. M. Muniz**, Arismar Cerqueira S. Jr., “Development and Performance Analysis of a Photonics-assisted RF Converter for 5G Applications”, *Fiber and Integrated Optics*, 2016.
3. **A. L. M. Muniz**, D. F. Noque, R. M. Borges, A. Bogoni, M. Hirano and Arismar Cerqueira S. Jr., “All-Optical RF Amplification Toward Gpbs Communications and mm-waves Applications”, *Microwave And Optical Technology Letters*, In Press, 2017.

4. **Artigos publicados em congressos** Dionísio F. Noque, **A. L. M. Muniz**, R. M. Borges and Arismar Cerqueira S. Jr., “Análise de Desempenho Experimental de um Amplificador de RF Baseado em Tecnologia Fotônica”, *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (MOMAG)*, 2016.
5. R. M. Borges, **A. L. M. Muniz** and Arismar Cerqueira S. Jr., “Desenvolvimento de um Conversor de RF Reconfigurável Baseado em Tecnologia Fotônica”, *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (MOMAG)*, 2016.
6. S. C. Patrício, Arismar Cerqueira S. Jr., J. A. J. Ribeiro, **A. L. M. Muniz**, W. A. Camacho, and R. M. Borges, “Optically-Controlled Printed Dipole Antenna Array with Reconfigurable Radiation Pattern”, *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (MOMAG)*, 2016.
7. **A. L. M. Muniz**, D. F. Noque, R. M. Borges, T. N. Rodvalho, Regivan N. da Silva, R. A. Santos and Arismar Cerqueira S. Jr., “Rede Óptico-Wireless

Amplificada baseada em Tecnologia Fotônica”, *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)*, 2016.

8. R. dos Santos, **A. L. M. Muniz**, M. S. Borsato, T. H. Brandão, T. N. Rodovalho and Arismar Cerqueira S. Jr. “Multi-Technology Wireless Coverage Based on a Leaky-Wave Reconfigurable Antenna”. *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2017.

## Artigos submetidos

9. R. dos Santos, **A. L. M. Muniz**, M. S. Borsato, T. H. Brandão, T. N. Rodovalho and Arismar Cerqueira S. Jr. “STDMA: Space and Technology Division Multiple Access.” *International Journal of Antennas and Propagations*, 2017.

## Patente

10. Ramon Maia Borges, **André Luiz Marques Muniz**, Dionísio Fama Noque, Natalia Cañas Estrada, Suzanne Assis de Souza Melo, Arismar Cerqueira Sodré Júnior, “Sistema, Amplificador e Método de Amplificação em Faixa Larga de Sinais de RF baseados em Tecnologia Fotônica”, BR1020140294864.

# Resumo

Este trabalho é concernente ao desenvolvimento de um *front-end* de RF baseado em tecnologias fotônicas e à sua análise de desempenho experimental. O dispositivo proposto apresenta operação ultra banda larga desde poucos kHz a 40 GHz, empregando simultaneamente duas técnicas: geração de sinais de RF usando multiplicação em frequência e amplificação de sinais de RF no domínio óptico.

A implementação do *front-end* de RF em uma rede real óptico e sem fio demonstra a sua aplicabilidade em três faixas de frequências potenciais para redes celulares 5G: 6, 28 e 38 GHz. Avaliou-se o desempenho em função de parâmetros de RF e ópticos, incluindo potência óptica, relação sinal-ruído (SNR), ganho de RF, ruído de fase e erro de magnitude vetorial (EVM) para sinais com diferentes formatos de modulações. Obteve-se ganhos de RF de até 27 dB para toda faixa de operação e melhora de 13,4 dB e 15,0 %RMS nos parâmetros SNR e EVM, respectivamente, quando comparados ao sistema rádio sobre fibra convencional. Em linhas gerais, as principais contribuições desta dissertação são o conceito, o desenvolvimento e a validação do *front-end* de RF baseado em fotônica, o qual provê reconfigurabilidade em frequência, alto ganho e ausência de distorção do sinal de RF.

Palavras-chave: Comunicações ópticas e sem fio; Fotônica de micro-ondas; *Front-end* de RF; Redes celulares 5G.

# Abstract

This work is regarding the development of a photonics-based RF front-end and its experimental performance analysis. The proposed device presents ultra-wideband operation from a few kHz to 40 GHz, by means of simultaneously applying two techniques: RF signal generation, using frequency multiplication, and RF amplification, both in the optical domain.

The RF front-end implementation in a real optical-wireless network demonstrates its applicability in three potential frequency bands of 5G cellular networks, namely: 6, 28 and 38 GHz. The experimental performance investigation was based on RF and optical parameters, including optical power, signal-to-noise ratio (SNR), RF gain, phase noise and error vector magnitude (EVM). RF gain of 27 dB over the entire band has been obtained, as well as improvement of 13.4 dB and 15 %RMS in the SNR and EVM, respectively, when compared to a conventional radio over fiber system. The main dissertation contributions are the concept, development and validation of a photonics-based RF front-end, which provides frequency tunability, high gain and signal distortion absence.

Keywords: 5G networks; microwave photonics; optical-wireless communications; RF front-end.



# Capítulo 1

## 1.1 Introdução

### 1.1.1. Contextualização e motivação

A área de pesquisa em comunicações ópticas tem atraído a atenção de grande parte dos pesquisadores e empresas desde a década de 1960, devido à possibilidade de transferência de grandes quantidades de informações utilizando a luz [1][2]. Naquela época, a principal dificuldade encontrada pelos pesquisadores era o meio de transmissão com altas perdas [2]. Em 1966, a fibra óptica apresentava coeficiente de perda de 20 dB/km, enquanto que na década de 80 a primeira fibra óptica monomodo (SMF – *single mode fiber*) já provia atenuação de 0,2 dB/km [3][4]. Por volta do ano 2000, foram reportados importantes avanços na área das telecomunicações, tais como diodo lasers (DL – *diode laser*), fotodetector (PD – *photodetector*), fibra compensadora de dispersão, multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *wavelength division multiplexing*), amplificador baseado em efeito Raman, amplificador óptico com fibra dopada a érbio (EDFA – *erbium-doped fiber amplifier*), FTTH (*fiber-to-the-home*), 10/40Gbps GbE - Sonet (*giga bit Ethernet - synchronous optical networking*), dispositivo para adicionar-retirar opticamente comprimentos de ondas (OAD – *optical add-drop*), entre outros [5].

Essas e outras inovações possibilitaram a implementação de enlaces com taxas de transmissões na ordem de Tbps [5]. Os espaçamentos de 50 e 100 GHz entre canais no espectro óptico, padronizados pelo ITU (*International Telecommunication Union*), possibilitaram a transmissão de até 96 canais em uma única fibra óptica. Foram avanços importantes para o futuro das telecomunicações, pois problemas como baixa vazão de dados, alta atenuação agregada, peso excessivo e estreita faixa

de operação dos cabos elétricos -cabos coaxiais e pares trançados- enfraqueciam o crescimento das comunicações intermunicipais, nacionais e até mesmo mundiais [1][7]. Atualmente, como mostrado na Figura 1, cabos de fibras ópticas conectam a grande maioria dos países do hemisfério Norte e Sul, provendo altíssimas taxas de dados para a rede mundial de computadores chamada de *Internet*.

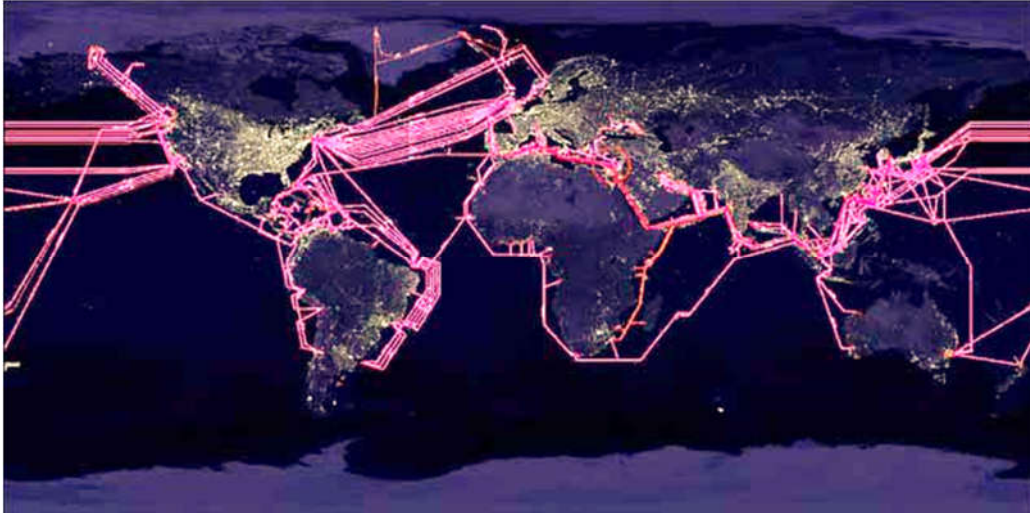


Figura 1: Cabos ópticos submarinos interligando os cinco continentes [6].

As fibras ópticas apresentam diversos benefícios em relação aos cabos coaxiais. Tipicamente, a relação entre peso e atenuação em função do comprimento do enlace para uma frequência de portadora de 2 GHz, por exemplo, apresenta 1,7 kg/km e 0,2 dB/km para fibra óptica, enquanto 567 kg/km e 360 dB/km para os cabos coaxiais [2][8]. Outro fator importante dentre as inovações das comunicações ópticas é a técnica rádio sobre fibra (RoF – *radio over fiber*) [9], na qual se transmite os sinais de radiofrequência (RF – *radio frequency*) utilizando uma portadora óptica através de fibras ópticas, apresentando vantagens como custo reduzido, menor peso, baixa e constante atenuação para frequências desde micro-ondas até ondas milimétricas, imunidade à interferência eletromagnética e alta capacidade de transferência de dados [10].

Neste contexto, nasceu o termo fotônica de micro-ondas (MWP – *microwave photonics*). Segundo vários artigos, o começo de MWP ocorreu na década de 90, quando tecnologias como LEDs e enlaces analógicos de fibras ópticas impulsionaram o campo de pesquisa [2][10][11]. Nesta mesma década, constataram-

se várias oficinas de trabalho e reuniões sobre o assunto relacionado à possibilidade da interação entre o mundo de micro-ondas e de óptica [5]. Nesta época, um acordo formal foi assinado pela LEOS (*Laser and Electro-optics Society*), que atualmente é a *Photonics Society*, e MTT-S (*Microwave Theory and Technology Society*) para patrocinar conjuntamente a reunião conhecida como ‘*International Topical Meeting on Microwave Photonics*’ [10][12]. Dalma Novak [2] define o termo MWP como “o estudo de dispositivos ópticos para geração, transmissão e processamento de sinais de frequências de micro-ondas no domínio óptico” e Jianping Yao [12] interpreta MWP como “uma área interdisciplinar que estuda a interação de sinais de micro-ondas e ópticos”.

A área de fotônica de micro-ondas tem mostrado potencial nos últimos anos em diversos segmentos de telecomunicações, tais como geração [13][14], transmissão [15], filtragem [16], detecção [17], processamento [18], multiplexação [18][19], defasagem [20], amplificação [21][22] e controle [23] de sinais de micro-ondas e ondas milimétricas no domínio óptico. A principal vantagem da fotônica de micro-ondas é sua faixa ultra banda larga de operação que se estende linearmente desde poucos kHz até dezenas de GHz, sem a necessidade de troca de equipamento. Suas vantagens também impulsionam as pesquisas das próximas gerações de sistema sem fio que suportarão altas frequência de portadora com elevadas taxas de transmissão e permitirão a convergência de diferentes tecnologias, como 3G, 4G, 5G e WiFi (*Wireless Fidelity*) [24-26]. As aplicações de MWP estendem desde sensoriamento remoto de antenas [27], sistemas de radares de alto desempenho [4][28][29], transmissão e recepção para sistemas celulares, *WiFi*, satélite, radioastronomia até televisão a cabo, entre outras aplicações [5].

A expansão dos serviços de banda larga e o crescimento do tráfego de dados entre os clientes residenciais, móveis e empresariais impulsionam a necessidade por sistemas de alta capacidade e longo alcance, principalmente para as redes de transportes de *Internet* e acesso sem fio. Segundo a empresa CISCO [30], o tráfego IP global anual irá superar os zettabyte (1.000 *exabytes*), em 2016, e o limiar de dois *zettabyte* em 2019. Adicionalmente, o tráfego IP aumenta a uma taxa composta de crescimento anual (CAGR - *compound annual growth rate*) de 23% entre 2014 e 2019 [30].

Para suprir esta necessidade, a indústria das telecomunicações tem desenvolvido novas aplicações sem fio de altíssima capacidade de transferência de dados [31][32]. Por esta razão, almejou-se o uso do espectro eletromagnético menos congestionado e capaz de atender taxas maiores de 1 Gbps por usuário [33]. Portanto, a faixa de frequência conhecida como ondas milimétricas (mm-wave – *millimeter wave*) são extremamente úteis para aplicações de alta razão de dados, pois empregam frequências de portadoras elétricas entre 30 a 300 GHz, que suportam bandas de operações na faixa de 1 a 5 GHz. [33]. As aplicações na faixa de ondas milimétricas potencializam o estudo de técnicas mais avançadas na área de comunicações ópticas para suprir as necessidades de transmissão, recepção e processamento de sinais no domínio elétrico [34][35].

As redes celulares de quinta geração (5G) representarão uma ruptura tecnológica, possibilitando o uso do espectro de ondas milimétricas (30 a 300 GHz) [31][36] e taxas de 10 Gbps por usuários [37]. Com altas frequências de portadoras e operações banda larga, existirão diversos desafios na criação de componentes, sistemas e antenas para as comunicações em ondas milimétricas, tais como amplificadores de potência, amplificadores de baixo ruído, osciladores controlados por tensão, *mixers* e conversões analógico-digital [34]. No caso de um sinal banda larga em 60 GHz, por exemplo, amplificadores de potência causam severas distorções não-lineares, além de apresentarem alto ruído de fase, desbalanceamento IQ (*In-Phase and Quadrature*), complexidade e alto custo.

Podem-se apresentar como principais aplicações das redes 5G: cobertura sem fio por células pequenas de altíssima vazão de dados, comunicações entre dispositivos (D2D – *devices to devices*) e máquinas (M2M – *machine to machine*) para economia de energia e eficiência espectral [37]. As redes heterogênicas (HetNet – *heterogeneous network*) serão necessárias nas redes 5G, devido às limitações de áreas de cobertura nas comunicações por ondas milimétricas, que poderão operar em conjunto com as redes LTE e WiFi [38]. Assim, em uma macrocélula de cobertura com alta capacidade, haverá outras redes em picocélulas com alta vazão de dados, com o intuito de solucionar problemas como gerenciamento de mobilidade, *handover* vertical, escoamento de dados eficiente e gerenciamento de interferência entre células [34][37].

Esta nova rede abrangerá não só equipamentos celulares, mas também outros de sensoriamento e controle, chamados de *Internet* das coisas (IoT – *Internet of things*) [39][40]; todos estes equipamentos conectados à rede de *Internet* 5G de altíssima velocidade e latência quase zero deverão necessariamente fazer uso da tecnologia óptica desde *backbones* ópticos de alta vazão de dados até *front-ends* de RF baseados em tecnologia fotônica, convergindo todas as informações na fibra óptica e transmitindo-as nas antenas da rede de comunicação [33][36][37].

Os *front-ends* de RF baseados em tecnologias fotônicas se destacam desde a década passada devido ao desenvolvimento de moduladores ópticos e fotodetectores de até 100 GHz [5]. Como as redes 5G utilizarão portadoras de RF em ondas milimétricas, os *front-ends* de RF devem apresentar resposta em frequência linear e eficiência de transmissão e recepção em toda a banda de operação. Como os *front-ends* de RF puramente elétricos apresentam algumas ineficiências, tais como resposta em frequência não-linear e/ou banda de operação estreita [38][39], os *front-ends* de RF baseados em tecnologia fotônica solucionam as adversidades dos sistemas inteiramente elétricos e proporcionam vantagens na transmissão e recepção dos sistemas sem fio com a ajuda da técnica de fotônica de micro-ondas. Neste cenário, transportam-se os sinais de RF por fibra óptica até à extremidade da rede, para o processo de fotodeteção e cobertura da área desejada. Esta técnica é denominada como fibra até à antena (FTTA - *fiber-to-the-antenna*) e ela apresenta características como minimizar ao máximo as atenuações que poderiam ser causadas por cabos coaxiais, alta banda de operação e imunidade à interferência eletromagnética [7][9][40-44].

### 1.1.2. Contribuições e estrutura da dissertação

Esta dissertação de mestrado baseia-se na tecnologia de fotônica de micro-ondas aplicado em *front-ends* de RF para sistemas de transmissão sem fio de alta vazão, como as redes 5G. A principal contribuição deste trabalho é a demonstração experimental de um *front-end* de RF baseado em tecnologias fotônicas (PBRF – *photronics-based RF front-end*) para os sistemas de comunicações digitais de rádio sobre fibra, composto por dois blocos: geração de sinais de RF (PBRC – *photronics-based RF converter*), já conhecido pela literatura, e outro com a função de

amplificação de RF baseado em tecnologia fotônica (PBRA – *photronics-based RF amplifier*). O desempenho digital do PBRA será apresentado pela primeira vez na literatura, demonstrando desempenho de amplificação uniforme e operação ultra banda larga, além de resposta linear em toda banda de operação, sendo desde kHz até 40 GHz. Adicionalmente, o desempenho para transmissão de sinais digitais para diferentes níveis de modulações e altas taxas de bits validarão o uso do PBRA nas redes 5G. O PBRA demonstra várias vantagens em relação ao sistema de rádio sobre fibra convencional, tais como aumento na eficiência de conversão, simplificação das unidades de transmissão de RF e redução de custos de implementação devido ao uso de menos estágios de amplificação elétrica de RF. A validação e o desempenho do conjunto desses dois blocos fotônicos formarão o sistema de *front-end* proposto neste trabalho, cujo principal objetivo é sua utilização nas redes de telefonia móvel 5G ou comunicações sem fio de altíssima vazão.

A dissertação de mestrado será dividida em cinco seções. A seção II apresenta os fundamentos teóricos sobre fotônica de micro-ondas e sistemas rádio sobre fibra. A seção III descreve o equacionamento e funcionamento dos blocos fotônicos composto no *front-end* de RF proposto. A seção IV relata as análises experimentais de desempenho dos dispositivos de RF baseados em tecnologias fotônicas. Finalmente, na seção V, apresentam-se as conclusões relevantes da dissertação e os trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### 2.1 Fundamentos teóricos

#### 2.1.1. Redes celulares de quinta geração (5G)

Vários ramos de negócios, desde agricultura até transporte, serão transformados para serem mais eficientes e inteligentes com a grande ruptura de inovações propostas pela quinta geração de comunicação sem fio (5G) [34]. As comunicações sem fio são imprescindíveis para a sociedade atual e suas aplicações se estendem em diversos ramos de negócios, como segurança, agricultura, transporte e saúde, sendo que a nova abordagem das redes futuras de comunicações sem fio transcende as comunicações celulares [33]. As redes 5G transformarão a experiência dos usuários em termos de capacidade de transmissão e vazão, e permitirão uma sociedade inteiramente conectada [31].

A Figura 2 ilustra a evolução dos padrões celulares em termos de ano de implementação. Em 1981, a primeira geração (1G) de comunicação sem fio possibilitou a comunicação entre celulares com a transmissão baseada em modulação analógica [32]. Na década de 90, lançou-se o segundo padrão (2G) de comunicação sem fio com transmissão digital, aumentando a capacidade de usuários e possibilitando a troca de mensagens por pequenos textos (SMS – *short message service*) [31]. Os avanços tecnológicos do ano 2000 para o padrão de telefonia de terceira geração (3G) possibilitou o acesso à *Internet* para todos os usuários na cobertura celular [39]. A quarta geração (4G), que foi implementada no ano de 2010 e utilizada até hoje, oferece taxa de dados entre 5 a 20 Mbps por usuário, baixa latência entre 50 milissegundos e densidade de usuários de 2000 dispositivos por quilômetro quadrado [31][39]. Estas características foram importantes para o desenvolvimento dos primeiros conceitos de sociedade conectada e *Internet* das coisas [39]. Entretanto, o acesso à *Internet* por dispositivos e máquinas está sendo

duplicado a cada ano e a necessidade de aplicações banda larga impulsionam novas pesquisas para superar a demanda de tráfego, capacidade e latência [33][39]. O ano de 2020 é o esperado para a primeira implementação das redes de acesso de quinta geração, que não só apresentará taxas de transmissões de dados de até 10 Gbps, mas também capacidade de usuários extremamente alta e latência de resposta da rede muito baixa [37]. Estas qualidades possibilitarão a conectividade massiva de pequeno e grande porte para todos os tipos de aplicações, tais como cidades inteligentes, carros autônomos, cirurgias não-presenciais, telemetria, segurança aeroespacial e casas conectadas [34]-[37].

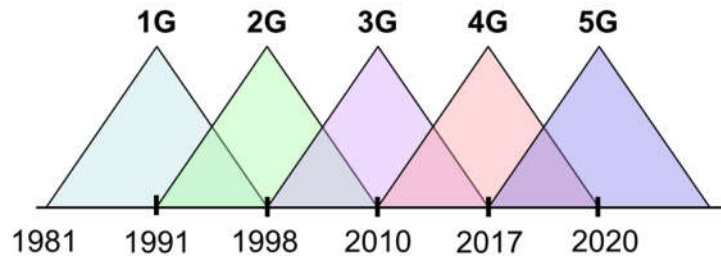


Figura 2: Evolução dos padrões de telefonia celular em função dos anos de lançamento [37].

Há duas vertentes nas redes 5G em relação ao uso do espectro eletromagnético, sendo eles o emprego do espectro em ondas milimétricas e o uso do espectro compartilhado abaixo de 6 GHz [38]. Ambos apresentam vantagens e desvantagens, como por exemplo, a transmissão em ondas milimétricas permite taxas de transmissões elevadas devido ao uso de banda de operação extremamente altas, porém apresenta alto custos de implementação e a necessidade de utilização de várias células de cobertura, entre 20 a 300 metros, devido ao alto índice de atenuação no espaço livre [37]. Entretanto, o uso do espectro compartilhado abaixo de 6 GHz, chamado de *sub-6 GHz*, supera a desvantagem de alta atenuação e custo de implementação, possibilitando maiores coberturas sem fio, porém não comportam taxas de transmissões elevadas [32]. Portanto, cada aplicação nas redes 5G serão beneficiadas para que conectividade, alta vazão e baixa latência sejam permanecidas. Segundo o padrão 5G, ainda em desenvolvimento, a latência de 100 milissegundos utilizará para aplicações de áudio, 10 milissegundos para aplicações de vídeo e 1 milissegundos para aplicações tácteis (*tactile Internet*), isto é, sensíveis ao tempo, como cirurgias não-presenciais e carros autônomos [34][35]. A Figura 3 demonstra



as aplicações envolvidas nas redes 5G em termos de capacidade, vazão de dados e latência.

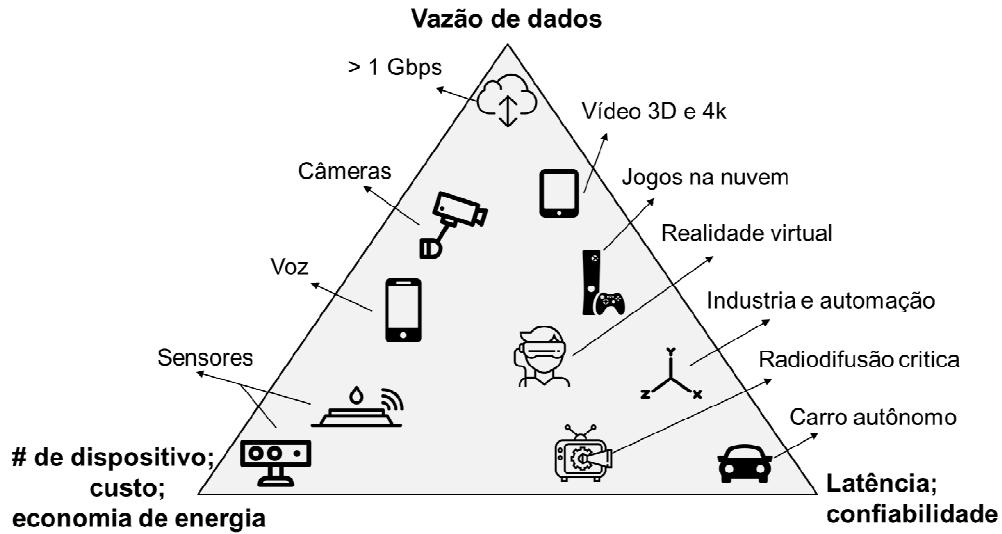


Figura 3: Aplicações para as redes 5G em termos de capacidade, vazão e latência [37].

Enquanto que a cobertura sem fio das redes 5G utilizando frequências abaixo de 6 GHz apresentará cobertura em alguns quilômetros, a cobertura baseada em micro e picocélulas operando em ondas milimétricas dará a máxima vazão de dados no raio entre 30 metros [38]. Na literatura, Theodore S. Rappaport *et al* demonstra experimentalmente diversos cenários em ambientes internos e externos de comunicações sem fio, empregando portadoras de 28 e 38 GHz [37]. Athanasios V. Vasilakos *et al* apresenta um estudo minucioso das potenciais frequências em ondas milimétricas e suas possíveis aplicações nas redes de acesso local, pessoal e heterogênicas [34]. Com estes trabalhos, comprovou-se que as comunicações em ondas milimétricas podem funcionar nas redes celulares de quinta geração.

Portanto, as redes 5G provavelmente utilizarão redes de transporte baseados em tecnologias fotônicas para alcançarem suas três premissas de vazão, capacidade e latência [40]. As redes convergentes óptico-*wireless* estarão mais presentes devido ao fato das vantagens de transmissão e processamento com o uso das comunicações ópticas e flexibilidade permitida pelas comunicações sem fio [5]. Os *front-ends* de RF baseados em tecnologias fotônicas são as principais soluções para maximizar a vazão de dados e capacidade requeridas pelas redes 5G [5]. A principal motivação

em empregar *front-ends* de RF baseados em tecnologias fotônicas nas redes 5G operando em ondas milimétricas é suprir a insuficiência de desempenho de circuitos integrados para geração, transmissão e amplificação de sinais em ondas milimétricas devido aos problemas de ruído de fase, perdas elétricas, desbalanceamento IQ e distorções não-lineares de potência amplificada [39-41].

## 2.1.2. Sistemas rádio sobre fibra

Um sistema rádio sobre fibra (RoF) compreende-se de cabos de fibras ópticas e componentes opto-eletrônicos capazes de modular os sinais de RF em uma portadora óptica e, também, de extrair estas informações na recepção [42]-[44]. Estes componentes são essenciais e exercem grande influência no desempenho dos sistemas ópticos. A Figura 4 apresenta o sistema rádio sobre fibra convencional, utilizado na maioria das aplicações de fotônica de micro-ondas. O sinal de RF é modulado em uma portadora óptica (inset (i) da Figura 4) e transmitido na fibra SMF (inset (ii) da Figura 4) até à recepção, a qual fotodetecta o sinal óptico (inset (iii) da Figura 4) e transmite nas antenas de transmissão [45]. O EDFA é utilizado para amplificar os sinais ópticos, com a principal função de compensar as atenuações do enlace.

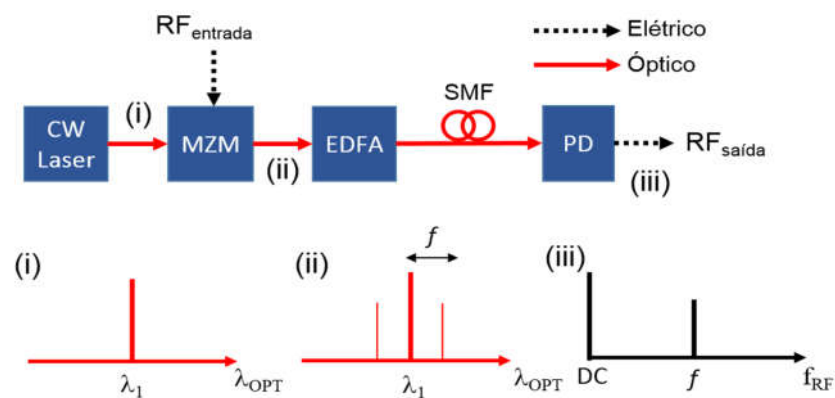


Figura 4: Sistema típico de rádio sobre fibra. (i) portadora óptica; (ii) saída do modulador MZM; (iii) frequência de RF fotodetectada. CW: laser de onda contínua; MZM: modulador Mach-Zehnder; EDFA: amplificador óptico baseado em fibra dopada a érbio; PD: fotodetector.

Na transmissão, podem-se dividir os moduladores ópticos (conversores eletro-ópticos) em dois tipos: modulação direta ou modulação externa [46]. A modulação direta fundamenta-se em aplicar o campo elétrico de RF diretamente no laser semiconductor, produzindo em sua saída óptica um campo óptico modulado em amplitude [47]. Esta técnica de modulação foi predominante no começo das comunicações ópticas devido à simplicidade do sistema e ao menor custo [48]. Entretanto, modulação direta apresenta banda de operação limitada em, aproximadamente, 20 GHz devido ao alto ruído relativo de intensidade (RIN – *relative intensity noise*) e *chirping* [47]. Por outro lado, a modulação externa foi desenvolvida para minimizar estas desvantagens, aumentando a banda de operação e diminuindo o ruído adicionado ao sistema [49]. Esta técnica baseia-se em eletroabsorção ou em efeitos eletro-ópticos [47]. A interação entre luz e micro-ondas é um efeito eletro-óptico, ou chamado de efeito *Pockels*, que causa na portadora óptica um retardamento de fase em função do campo elétrico aplicado [47]. Esta mudança de fase em conjunto com um interferômetro *Mach-Zehnder* produz uma modulação por intensidade, com banda de operação até 100 GHz [50]. Entretanto, este resultado é altamente não-linear, devido às propriedades eletro-ópticas dos semicondutores. Atualmente, há uma grande quantidade de trabalhos e esquemas para linearização dos moduladores ópticos externos apresentando resultados estáveis [51].

Neste sentido, o esquema de modulação por intensidade e detecção direta (IM-DD – *intensity-modulated direct detection*) funciona adequadamente para muitas aplicações de rádio sobre fibra e enlaces ópticos, no qual toda informação é modulada em amplitude e fotodetectada com um único fotodetector [52]. Para as aplicações de transmissões coerentes, não se utiliza o esquema IM-DD, pois é necessário modular a luz não só em amplitude, mas também em fase [53][54]. Neste sentido, moduladores  $\text{LiNbO}_3$  são altamente lineares e são ideais para enlaces de modulação por fase [51]. Analiticamente, o campo elétrico na saída do modulador óptico ( $E_{\text{out}}$ ) *Mach-Zehnder* (MZM - *Mach-Zehnder modulador*) (inset (ii) da Figura 4), considerando perda por inserção nula e o interferômetro do MZM ideal, pode ser descrito como [47]:

$$\begin{aligned}
E_{out}(t) &\propto E_o \left[ \cos \left( \frac{\pi V_m \cos(\omega_{RF}t) + V_{bias}}{2 V_\pi} \right) \right] \cos(\omega_L t) \\
&= E_o \cos \left( \frac{V_{bias} \pi}{V_\pi} \right) \left\{ J_0 \left( \frac{\pi V_m}{2 V_\pi} \right) \cos(\omega_L t) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ J_{2n} \left( \frac{\pi V_m}{2 V_\pi} \right) \cos(\omega_L t + 2n\omega_{RF}t - n\pi) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + J_{2n} \left( \frac{\pi V_m}{2 V_\pi} \right) \cos(\omega_L t - 2n\omega_{RF}t + n\pi) \right] \right\} \\
&\quad + E_o \sin \left( \frac{V_{bias} \pi}{V_\pi} \right) \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[ J_{2n-1} \left( \frac{\pi V_m}{2 V_\pi} \right) \cos[\omega_L t + (2n-1)\omega_{RF}t - n\pi] \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + J_{2n-1} \left( \frac{\pi V_m}{2 V_\pi} \right) \cos[\omega_L t - (2n-1)\omega_{RF}t + n\pi] \right] \right\} \tag{1}
\end{aligned}$$

no qual  $E_o$  é o campo elétrico na entrada do modulador;  $V_m$ ,  $V_{bias}$  e  $V_\pi$  são tensão elétrica do sinal de RF aplicado ao MZM, tensão de polarização (bias) do modulador óptico e tensão de meia-onda característica do MZM, respectivamente.  $\omega_{RF}$  e  $\omega_L$  são as frequências angulares das portadoras de RF e óptica, respectivamente.

Na recepção, os fotodetectores (conversores opto-eletrônicos) realizam a conversão da informação do domínio óptico para o domínio elétrico. O mecanismo utilizado no processo de fotodeteção é a absorção óptica. A corrente fotodetectada ( $I_p$ ), que é diretamente proporcional à potência óptica incidente ( $P_{in}$ ), pode ser calculada da seguinte maneira [56][57]:

$$I_p = RP_{in} = \frac{1}{2} R |E_{in} E_{in}^*| \tag{2}$$

em que  $R$  é a responsividade do foto detector, em amperes por watts, e  $E_{in}$  é o campo elétrico incidente. Podem-se destacar como principais fotodetectores os fotodiodos  $p-n$ , fotodiodos  $p-i-n$  e fotodiodos avalanche [58].

O fotodiodo baseado em uma junção  $p-n$ , alimentado reversamente, cria uma região de depleção, opondo-se ao fluxo de elétrons entre as partes  $n$  e  $p$ . Como descrito acima, o ato de iluminar a face  $p$  cria lacunas por meio do efeito de absorção, gerando uma corrente fotodetectada [55]. Portanto, uma junção  $p-n$  alimentada reversamente atua como fotodetector. Com o intuito de melhorar a resposta temporal do fotodetector, desenvolveu-se o fotodetector  $p-i-n$ , o qual aumenta a região de depleção com a inserção de uma camada não dopada de material semiconductor entre as junções  $p-n$  [55]. Adicionalmente, desenvolveram-se os

fotodetectores avalanche (APD – *avalanche photodetectors*) para aumentar a responsividade dos fotodetectores *p-i-n*, limitados pela eficiência de conversão (no máximo igual a um) [47]. Porém, eles apresentam corrente de escuro (*dark current*) superiores aos convencionais, baixa resposta temporal e banda de operação relativamente menor [55].

Finalmente, o meio de transmissão entre o transmissor e receptor óptico é a fibra óptica, tipicamente monomodo [56-60]. Esta fibra transporta somente um modo de propagação da luz em seu interior, sendo ele o modo fundamental  $HE_{11}$  [47][55]. Em geral, o núcleo e a casca da fibra SMF compõem-se de diâmetros iguais a 8  $\mu\text{m}$  e 125  $\mu\text{m}$ , respectivamente [55]. Outros coeficientes importantes e típicos da fibra SMF, no comprimento de onda de 1550 nm, são: dispersão cromática ( $D$ ) de 17 ps/nm/km, atenuação ( $\alpha$ ) de 0,22 dB/km e coeficiente de não linearidade ( $\gamma$ ) de 2  $\text{W}^{-1}/\text{km}$  [43]. As fibras multimodos, utilizadas no começo das comunicações ópticas, entraram em desuso nos últimos anos devido às distorções causadas pela dispersão modal, que reduz a capacidade de transmissão nas fibras ópticas [12]. Estas fibras são somente utilizadas em enlaces extremamente curtos ou ligações entre equipamentos vizinhos, como por exemplo em *datacenters* [57].

Outro meio de propagação frequentemente utilizado em aplicações de MWP são as fibras altamente não-lineares (HNLF – *highly nonlinear fiber*) [58]. As HNLF apresentam coeficientes não-lineares superiores às SMF, com valores entre 10 a 50  $\text{W}^{-1}/\text{km}$ , e dispersão cromática deslocada para comprimentos de ondas entre 1550 nm [59]. Estas duas características favorecem os efeitos não-lineares nas fibras ópticas, prejudiciais à qualidade e ao desempenho em sistemas DWDM, entretanto podem ser empregados em benefício para técnicas de MWP no domínio óptico [18][60][61]. Nesta dissertação de mestrado, utilizamos uma fibra HNLF para intensificar os efeitos não-lineares na fibra óptica. Os efeitos não-lineares presentes na fibra são: auto modulação de fase (SPM – *self-phase modulation*), modulação de fase cruzada (XPM – *cross phase modulation*), solitons, espalhamento estimulado por Raman, espalhamento estimulado por Brillouin, mistura de quatro ondas (FWM – *four wave mixing*), entre outros [60][62-65].

Neste contexto, as redes óptico-*wireless* utilizam a técnica rádio sobre fibra para transportar sinais de RF pela fibra óptica de um ponto ao outro em um sistema de comunicação [66-69]. Este conceito tem sido vastamente utilizado em inúmeras aplicações, como, por exemplo, transporte de sinais de RF entre estações rádio base e antenas, como demonstrado na Figura 5 [52]. Neste contexto, é possível simplificar as estações rádio base, pois todo processo de geração e modulação são posicionadas na central. Os benefícios das redes óptico-*wireless* são: aumento da frequência de operação e capacidade de escoamento de dados em sistema de transmissão digital, cuja frequência de RF é praticamente transparente para o domínio óptico. Porém, nestas situações, deve-se atentar às dispersões cromáticas nas fibras ópticas [6].

Os principais formatos de modulação e técnicas de múltiplo acesso, utilizados nos últimos anos nas redes óptico-*wireless*, foram: FSK (*frequency-shift keying*), PSK (*phase-shift keying*), N-QAM (N-state quadrature amplitude modulation), CDMA (*code-division multiple access*), OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing), entre outros [54]. Outro esquema utilizado para aumentar a vazão é a multiplexação por comprimento de onda (WDM – *wavelength division multiplexing*). Portanto, pode-se realizar o reúso dos canais ópticos, aumentando a eficiência na transmissão, e aplicar a distribuição dos sinais de RF nas antenas das redes convergentes ópticas e sem fio [70][72][73].

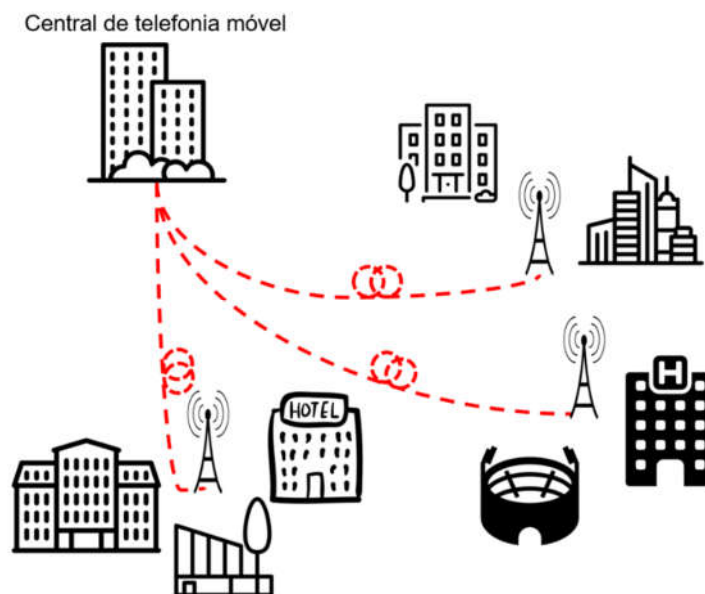


Figura 5: Princípio de uso de redes óptico-*wireless* em aplicações de telefonia móvel.

## Capítulo 3

### 3.1 *Front-end* de RF baseado em tecnologias fotônicas

#### 3.1.1. Revisão bibliográfica

Os *front-ends* de RF puramente elétricos são tipicamente banda estreita [24]. Além disso, osciladores e amplificadores de micro-ondas e de ondas milimétricas apresentam alto grau de complexidade, e os desempenhos dos conversores analógicos-digitais são limitados para baixas frequências, devido à resposta em frequência dos componentes elétricos [14]. Por outro lado, desenvolvimentos em fotônica de micro-ondas demonstram proeminentes vantagens no uso de tecnologias fotônicas para o desenvolvimento de *front-end* de RF, possibilitando amplificação, filtragem, translação de frequência de RF, processamento e amostragem de sinais no domínio óptico [5].

Na literatura, há diversos esquemáticos de *front-ends* de RF baseados em tecnologias fotônicas. M. N. Sakib *et al* em 2014 e J. Yao *et al* em 2009 propuseram *front-ends* de RF reconfiguráveis para operar em frequências de ondas milimétricas [84-86]. J. Mora *et al* em 2006 e E. J. Norberg *et al* em 2011 apresentaram sistemas de filtros de recepção para *front-ends* de RF baseados em fotônica [87-89]. D. Novak *et al* em 2009 e T. Feng *et al* em 2011 demonstraram *front-ends* de RF para sistemas de comunicações óptico-*wireless* de alta eficiência e operação banda larga [90-92]. N. W. Chen *et al* em 2012 e E. Y. Chan *et al* em 2006 propuseram *front-ends* de RF baseados em tecnologias fotônicas para transmissão e recepção simultaneamente de sistemas de micro-ondas e ondas milimétricas [15][57]. L. Maleki *et al* em 2011 e J. Chou *et al* em 2009 apresentaram *front-ends* de RF para osciloscópios digitais com auxílios de tecnologias fotônicas para amostragem e processamento de sinais em altas frequências [93][94]. S. A. Pappert *et al* em 2007 e A. Bogoni *et al* em 2012

demonstraram esquemáticos para transmissão e recepção de sistemas de radares utilizando técnicas fotônicas para melhorar o desempenho e eficiência de detecção de alvos [29][95]. R. M. Borges *et al* em 2014 (membro do laboratório WOCA), C. T. Lin *et al* em 2009 e C. Wang *et al* 2013 relataram sistemas para geração de portadoras de micro-ondas e de ondas milimétricas para operarem em *front-ends* de RF fotônicos, realizando duplicação, quadruplicação, sextuplicação e/ou octuplicação das portadoras de RFs [24][96-98]. W. S Wall *et al* em 2012, S. A S. Melo *et al* em 2015 (ex-membro do laboratório WOCA) e N. Canãs-Estrada *et al* em 2015 (ex-membro do laboratório WOCA) apresentaram amplificadores ultra banda larga de sinais de micro-ondas baseados em tecnologia fotônica, aumentando a energia de sinais analógicos fotodetectados em comparação aos sistemas típicos de rádio sobre fibra [21][22][99].

Adicionalmente, os trabalhos [58][100]-[102] referentes a esta dissertação de mestrado demonstram que a amplificação de RF baseado em tecnologia fotônica melhora expressamente o desempenho digital dos sistemas convergentes óptico-*wireless*. Os resultados obtidos pelo grupo do Laboratório WOCA em amplificação de RF baseado em tecnologia fotônica foi patenteada no INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial) com número de registo BR102014029486-4 e título “Sistema, Amplificador e Método de Amplificação em Faixa Larga de Sinais de RF baseados em Tecnologia Fotônica”.

O *front-end* de RF proposto é composto pelos blocos PBRC (*photronics-based RF converter*) e PBRA (*photronics-based RF amplifier*), formando o sistema PBRF (*photronics-based RF front-end*) [58]. O sistema PBRA apresenta banda de amplificação uniforme e operação ultra banda larga desde 100 kHz a 40 GHz, além de não distorcer o sinal e melhorar a relação sinal-ruído (SNR – *signal-to-noise ratio*). O sistema PBRC demonstra banda de operação banda larga, custo baixo de implementação e pureza espectral em toda faixa de operação. Nas próximas seções, apresentaremos os esquemáticos do PBRC, PBRA e do *front-end* de RF proposto para serem utilizados em sistemas de telefonia móvel 3G, 4G ou até mesmo na futura geração 5G.



### 3.1.2. Conversor de RF baseado em tecnologia fotônica

Os geradores de RF puramente elétricos tipicamente apresentam banda estreita e, assim, cada tecnologia de comunicação sem fio exige o uso de equipamentos de RF específicos [3]. A geração de portadoras de micro-ondas e ondas milimétricas no domínio elétrico apresenta alto grau de complexidade e os desempenhos de conversores analógico-digital (ADC – *analog-to-digital converter*) são limitados para baixa frequência de RF devido à resposta em frequência dos componentes elétricos [24]. Na literatura, há diversos esquemáticos baseados em tecnologias fotônicas para gerar sinais de RF no domínio óptico [5]. Laghezza *et al* em 2014 apresentou o conceito de geração de sinais de RF empregando um laser de modo travado (MLL - *mode-locked laser*) [89]. Esta técnica se baseia no batimento entre portadoras ópticas no fotodetector, criando portadoras de RF no domínio elétrico [68]. Porém, lasers MLL apresentam custo de aquisição alto, inviabilizando sua implementação [66].

J. Ma *et al* em 2008 e Y. Gao *et al* em 2014 demonstraram a geração de portadoras de RF baseado na translação de frequência (*frequency upconverter*) a partir da multiplicação em frequência no domínio óptico (OFM - *optical frequency multiplication*), empregando moduladores MZM em cascata e um oscilador local (LO – *local oscillator*) [13][14]. O fator multiplicativo nesta técnica pode apresentar valores de 2, 4, 6 e 8, dependendo da fase dos sinais de RF e tensões de polarização aplicados aos moduladores MZM [68]. Entre os parâmetros de desempenho dos geradores de RF puramente elétricos e baseados em tecnologia fotônica estão RFSSR (*RF spurious suppression ratio*), distorção temporal, pureza espectral e ruído de fase.

A potência espectral de ruído de fase para sinais de RF gerados ( $S(f)$ ) a partir da técnica de OFM, empregando moduladores ópticos externos, pode ser descrita como [68]:

$$10\log_{10} [S(f)] = 10\log_{10} [S_d(f)] + 20\log_{10} k + 10\log_{10} [S_r(f)] \quad (3)$$

no qual  $S_d(f)$  e  $S_r(f)$  são potência espectral dos sinais de RF do oscilador local e ruído de fase residual do sistema, respectivamente. O parâmetro  $k$  é o fator multiplicativo da técnica OFM. O segundo termo da Equação (3),  $20\log_{10} k$ , representa um aumento de ruído de fase do sinal de RF gerado, que é proporcional ao fator multiplicativo empregado pela técnica OFM. Adicionalmente, o uso de osciladores de RF de alto desempenho pode gerar sinais de RF com baixo nível de ruído de fase, desde que  $S_d(f) \gg S_r(f)$  [66].

Trabalhos anteriores no Laboratório WOCA demonstraram geradores de RF baseados em tecnologia fotônica, nomeados como PBRC (photronics-based RF converter). Estes baseiam-se no uso de um modulador MZM (Figura 6(a)) ou moduladores MZM em cascata (Figura 6(b)). Adicionalmente, ambos apresentam um laser contínuo (CW) e um fotodetector (PD).

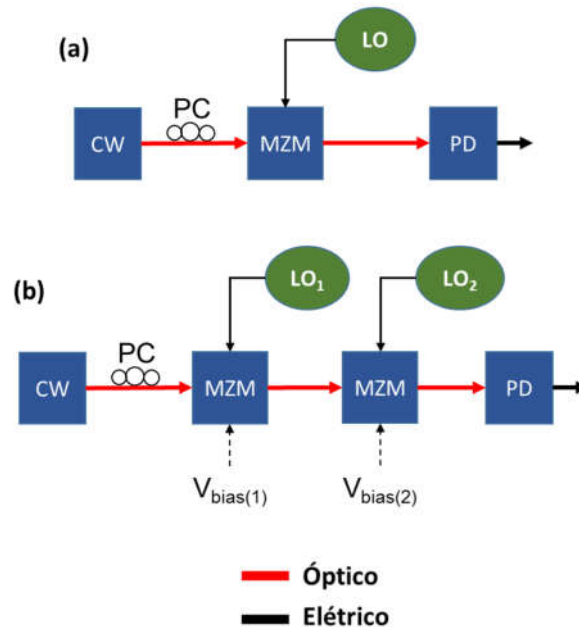


Figura 6: Esquemáticos de conversores de RF baseado em tecnologia fotônica. (a) Esquemático utilizando um modulador Mach-Zehnder. (b) Esquemático utilizando moduladores Mach-Zehnder em cascata.

O primeiro esquemático apresenta maior eficiência de conversão e baixo custo de implementação para geração de sinais de RF até ondas milimétricas. Porém, este esquemático necessita de dispositivos adicionais para estender seu fator multiplicativo de 2. Por outro lado, o uso de moduladores em cascata estende o fator multiplicativo para 4, 6 ou 8. Entretanto, esta técnica aumenta a complexidade do

sistema, devido a necessidade de controle de fase dos osciladores locais, e apresenta menor eficiência de potencia, devido às perdas de inserção dos moduladores MZM.

Baseado nas vantagens apresentadas na Tabela 1, considerou-se o esquemático utilizando um modulador MZM para implementação no *front-end* de RF proposto, com o objetivo de baixo custo de implementação e baixa perda por inserção. Os sinais do oscilador local  $RF_{LO}$  (inset (i) da Figura 7) são aplicados ao modulador MZM. Aplicando a tensão de polarização ( $V_{bias}$ ) igual à  $V_{\pi}$  (ponto de mínima transferência de potência), o fator multiplicativo da técnica OFM será 2, ocasionando supressão de portadora óptica (inset (ii) da Figura 7), segundo a Equação (1) (seção 2.1.2). A partir do processo de fotodetecção, gera-se uma portadora em  $2RF_{LO}$  (inset (iii) da Figura 7). Este resultado consiste no batimento entre bandas laterais de RF no fotodetector, segundo a Equação (2) (seção 2.1.2). Assim, podem ser geradas portadoras de RF duplicadas em função da frequência  $RF_{LO}$  do oscilador local.

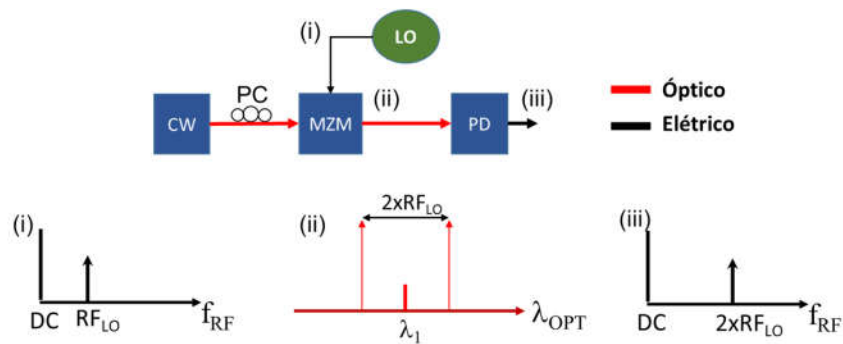


Figura 7: Esquemático baseado em tecnologia fotônica utilizado para gerar sinais de RF no *front-end* proposto.

Tabela 1: Comparação entre arquiteturas PBRC.

Arquitetura PBRC	Vantagens	Desvantagens
Esquemático utilizando um modulador MZM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicidade e redução de custo em 40%;</li> <li>• Baixo ruído de fase residual;</li> <li>• Baixa perda por inserção;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exige dispositivos adicionais para estender o fator multiplicativo de 2, como por exemplo fibras baseadas em rede de Bragg;</li> </ul>
Esquemático utilizando moduladores MZM em cascata	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fator multiplicativo de 2, 4, 6 e 8;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer dois moduladores;</li> <li>• Necessita de um adicional oscilador local;</li> </ul>

### 3.1.3. Amplificador de RF baseado em tecnologia fotônica

Convencionalmente, há dois métodos para intensificar a potência fotodetectada em um sistema RoF [58]. O primeiro é baseado em utilizar um amplificador EDFA para aumentar a potência óptica antes do processo de fotodetecção. Esta estratégia amplificará a potência de RF, como demonstrada na Equação (2) (seção 2.1.2), porém altos níveis de potência óptica podem saturar ou até danificar o fotodetector, cuja máxima potência é tipicamente em torno de 0 dBm [99]. O segundo método é empregar um amplificador de RF convencional após o processo de fotodetecção. Atualmente, estes componentes eletrônicos apresentam tipicamente banda de operação estreita e alta complexidade para aplicações em frequências de ondas milimétricas [90].

Por estas razões, o PBRA apresenta a vantagem de amplificar a potência de RF fotodetectada em comparação aos sistemas RoF convencionais. O sinal fotodetectado pelo PBRA apresentará um ganho de RF em comparação ao sistema RoF convencional, sabendo que ambos os sistemas são fotodetectados em uma mesma potência óptica. Define-se ganho de RF como sendo a diferença de potência de RF fotodetectada para a mesma potência óptica de recepção entre o sistema proposto (PBRA) e convencional (RoF) [58]. A Figura 8 descreve o cenário comparativo entre PBRA e RoF convencional. Os sinais ópticos fotodetectados em uma mesma potência implicarão em potências de RF diferentes, portanto o PBRA amplifica a potência de RF do sinal resultante na saída do fotodetector.

O esquemático do bloco PBRA pode ser visto na Figura 9. O mecanismo de amplificação é composto por dois lasers de bombeio ( $CW_1$  e  $CW_2$ ), controles de polarização (PC – *polarization controller*), um modulador MZM, um amplificador óptico EDFA, uma fibra altamente não-linear (HNLF – *highly non-linear fiber*) e um filtro óptico reconfigurável (OTPF – *optical tunable pass-band filter*). Modulam-se ambas as portadoras ópticas (inset (i) da Figura 9) no modulador MZM com sinais de RF (inset (ii) da Figura 9) e se amplificam opticamente no EDFA para serem transmitidas na HNFL.

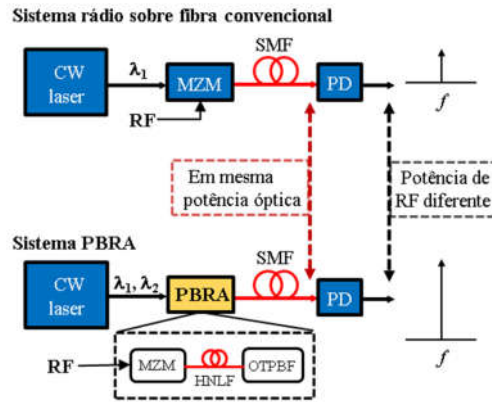


Figura 8: Comparação entre o sistema convencional de rádio sobre fibra e PBRA. PBRA: *photronics-based RF amplifier*; MZM: modulador *Mach-Zehnder*; PD: fotodetector; SMF: fibra monomodo.

Esses procedimentos são adotados para favorecer o efeito não-linear referente à mistura de quatro ondas (FWM – *four-wave mixing*), sendo este o princípio de provimento de ganho de RF do PBRA. O efeito FWM consiste na geração de novas componentes ópticas oriundas da interação e transferência de energia entre pelo menos duas portadoras ópticas [60]. A interação entre os sinais modulados em  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  implica na criação de novas componentes ópticas em  $\lambda_3$  e  $\lambda_4$ , moduladas e espaçadas de  $2\lambda_1 - \lambda_2$  e  $2\lambda_2 - \lambda_1$  (inset (iii) da Figura 9) [47][60]. Subsequentemente, o efeito se repete entre todas as componentes ópticas, incluindo as portadoras recentemente criadas [59].

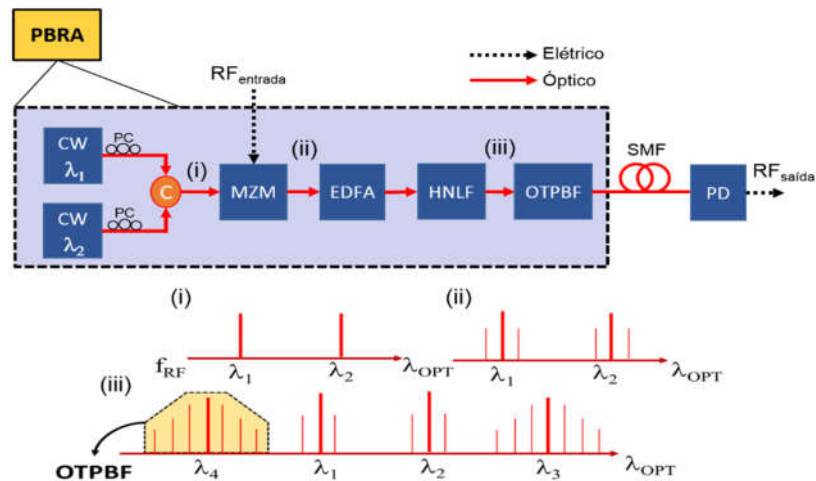


Figura 9: Esquemático proposto de amplificação de RF baseado em tecnologia fotônica.

Matematicamente, pode-se equacionar o efeito FWM a partir da equação abaixo [60]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_m}{\partial z} = i\gamma P_0 \left[ \left( |U_m|^2 + 2 \sum_{k \neq m} |U_k|^2 \right) U_m \right. \\ + 2 \sum_{def} U_d U_e U_f^* \exp(i\Delta\beta_{defm} z) \\ + 2 \sum_{de} U_d U_e U_m^* \exp(i\Delta\beta_{dem} z) \\ \left. + \sum_{de} U_d^2 U_e^* \exp(i\Delta\beta_{dem} z) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

em que  $U_i = A_i(z)/\sqrt{P_0}$ ,  $A_i(z)$  é a amplitude na direção em  $z$  do  $i$ -ésimo sinal óptico,  $P_0$  é a máxima potência óptica incidente e  $\gamma$  é o coeficiente não-linear da fibra.  $\omega_m$  e  $\omega_f$  são as frequências angulares dos produtos FWM da esquerda e direita, respectivamente. Os parâmetros  $\omega_d$  e  $\omega_e$  são as frequências angulares das portadoras óptica, enquanto que  $\Delta\beta_{defm}$ ,  $\Delta\beta_{dem}$  e  $\Delta\beta_{dem}$  são as diferenças de constante de propagação, descrevendo o descasamento de fase induzido pela dispersão cromática. O primeiro termo da equação descreve os efeitos não-lineares SPM e XPM. O segundo representa o FWM não-degenerado e os dois últimos descrevem o efeito FWM parcialmente degenerado. O efeito não-degenerado (Figura 10(a)) representa a mistura das portadoras com um produto FWM já criado, com o resultado de um novo produto, isto é  $\lambda_m = \lambda_d + \lambda_e - \lambda_f$  ou  $\lambda_f = \lambda_d + \lambda_e - \lambda_m$ . Já o efeito parcialmente degenerado (Figura 10(b)) denota a mistura somente das portadoras ópticas, com o resultado da criação dos produtos de FWM da esquerda e da direita, isto é  $\lambda_m = \lambda_d - \lambda_e$  e  $\lambda_f = 2\lambda_e - \lambda_d$ , respectivamente [60]. É importante mencionar que ambos devem satisfazer a igualdade  $\lambda_m + \lambda_f = \lambda_d + \lambda_e$  [60].

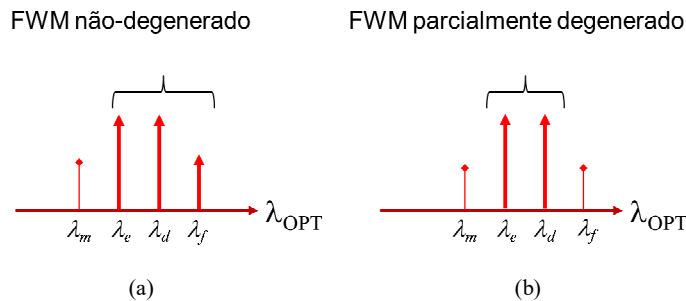


Figura 10: FWM parcialmente degenerativo e FWM não-degenerativo.

Estas novas componentes ópticas, chamadas de produtos de FWM, em comparação com os do sistema RoF convencional, apresentam duas características: aumento das bandas laterais de RF e acréscimo na energia presente em cada banda lateral. Seleciona-se pelo menos um dos produtos de FWM para transmitir no enlace óptico de SMF a partir de um filtro óptico reconfigurável (OTPBF) (inset (iii) da Figura 10). Por fim, na recepção, o processo de fotodetecção do sinal incidente ao PD gera a portadora de RF em sua saída, apresentando maior potência de RF em comparação com o sistema RoF convencional para uma mesma potência óptica de recepção.

Pode-se concluir que, para o sistema RoF, a maior parte da energia está contida na portadora óptica e não nas bandas laterais de modulação. Tal característica limita a eficiência do enlace devido à saturação de potência no processo de detecção. No método de amplificação proposto, como a envoltória das bandas laterais do sinal óptico referente aos produtos de FWM tem uma relação não-linear entre as portadoras ópticas, a energia total contida nas bandas laterais é comparativamente maior, dando, assim, a origem ao ganho de RF baseado em tecnologia fotônica.

Adicionalmente, a dispersão cromática na HNLF rege um importante parâmetro no desempenho do amplificador proposto, cujo casamento de fase é extremamente dependente da dispersão. Como as ondas ópticas se propagam em uma mesma direção, o casamento de fase requerido para o efeito FWM ocorrer é [58]:

$$\Delta\beta = \beta(\omega_m) + \beta(\omega_f) - \beta(\omega_d) - \beta(\omega_e) = 0 \quad (5)$$

no qual  $\beta(\omega)$  é a constante de propagação para o  $i$ -nêssimo sinal óptico. A potência óptica dos produtos de FWM cresce ao longo da fibra HNLF, sendo que seu fator de crescimento depende diretamente da potência óptica aplicada à HNLF, do coeficiente não-linear da fibra e comprimento utilizado da fibra não-linear. O efeito de múltiplas misturas de quatro ondas (MFWM – *multiple four wave mixing*) representa a geração de mais de um produto de FWM no espectro óptico. Este resultado, chamado de pente de frequência óptica (*optical frequency comb*), emprega as portadoras ópticas criadas no efeito de FWM para gerar novas portadoras ópticas [60]. As potências ópticas dos produtos de FWM respeitam a seguinte equação [59]:

$$P_m = \left( \frac{D_{edf}}{3} \gamma L \right)^2 P_e P_d P_f e^{-\alpha L} \eta \quad (6)$$

sendo  $P_m$  a potência óptica do produto de FWM e  $P_{i,j,k}$  as potências para  $i$ -,  $j$ -,  $k$ -néssimas portadoras ópticas. O fator  $D_{ijk}$  será 6 e  $P_e = P_f$  quando for FWM não-degenerado, e 3 para FWM parcialmente degenerado.  $L$  e  $\alpha$  representam o comprimento e atenuação da fibra óptica, respectivamente. O fator  $\gamma$  é o coeficiente não-linear da fibra e  $\eta$  é a eficiência do processo de FWM, que é altamente dependente do casamento de fase [21]:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{\{1 - e^{-\alpha L}\}^2} \right] \quad (7)$$

em que  $\alpha$  é o coeficiente de perda na fibra e  $L$  é o comprimento da fibra óptica. A eficiência do processo de FWM atinge o máximo valor de 1 quando  $\Delta\beta = 0$ . Portanto, o efeito de FWM se intensifica nos comprimentos de onda em que a dispersão cromática tende a zero ( $\lambda_0$ ), devido ao casamento da constante de propagação.

Em resumo, podem ser apontadas as principais vantagens da técnica PBRA como:

1. Ganho de RF uniforme e operação ultra banda-larga: o ganho de RF presente na técnica se estende desde frequências próximas a 100 kHz até 100 GHz. O ganho de RF é limitado apenas pela resposta em frequência dos moduladores MZM e fotodetectadores.
2. Ausência de distorções: pelo fato de a técnica ser derivada do efeito não-linear FWM na fibra óptica, o resultado não apresenta nenhuma distorção ao desempenho digital ou analógico dos sistemas ópticos;
3. Aumento da relação sinal-ruído elétrica: como o processo de amplificação de RF é inteiramente fotônico, a inserção de ruído elétrico e, conseqüentemente, a figura de ruído do sistema, é extremamente baixo ou quase zero, comparados aos amplificadores elétricos, cujo processo de amplificação baseia-se em transistores elétricos.
4. Utilização de menos estágios de amplificação nas estações rádio base: nas redes óptico-*wireless*, os sinais de RF derivados dos sistemas rádio sobre



fibra convencionais proporcionam baixo nível de potência de RF, apresentando o uso de amplificadores de RF elétricos. Como estes apresentam banda de operação estreita, o uso do PBRA pode diminuir ou retirar a utilização destes estágios de amplificação elétrica, simplificando os *front-end* de RF.

### 3.1.4. *Front-end* de RF baseado em tecnologia fotônica

O *front-end* de RF proposto, chamado de PBRF (*photonics-based RF front-end*), pode ser visto na Figura 11. Cria-se portadoras de RF a partir da técnica OFM, empregando o esquemático de um laser contínuo, um modulador MZM e um fotodetector, de acordo com a Figura 6 (seção 3.1.2). Os sinais de RF do oscilador local em uma frequência  $RF_{LO}$  são aplicados ao modulador MZM. Configurando-o no ponto de mínima transferência de potência ( $V_{bias} = V_{\pi}$ ), o fator multiplicativo da técnica OFM será 2, ocasionando supressão de portadora óptica. A partir do processo de fotodeteção, gera-se uma portadora em  $2RF_{LO}$ . As portadoras de RF geradas no PBRC alimentam um modulador com a função de transladar os sinais digitais para banda passante nas frequências ( $f_{RF}$ ) provindas pelo PBRC. Os sinais digitais em banda passante alimentam o segundo MZM do sistema PBRA, de acordo com o esquemático apresentado na Figura 8 (seção 3.1.3). Neste estágio, o amplificador de RF baseado em tecnologia fotônica emprega o efeito não-linear FWM para amplificar as portadoras de RF no domínio óptico. O filtro óptico reconfigurável filtra o 1º ou 2º produto de FWM. Após o estágio de amplificação de RF no domínio óptico, no PBRA, transmitem-se os sinais ópticos na fibra SMF até à recepção, os quais são fotodetectados e transmitidos pela antena.

Outro ponto importante neste *front-end* de RF é o compartilhamento dos lasers entre os blocos PBRC e PBRA. Porém, o PBRA é extremamente dependente dos comprimentos de ondas utilizados, contanto que os comprimentos de ondas dos lasers estejam próximos do comprimento de onda de dispersão cromática zero ( $\lambda_o$ ) para garantir o casamento de fase do processo de FWM. Por outro lado, o PBRC não

depende do comprimento de onda e, nestas condições, ambos os lasers são configurados para satisfazer as condições do PBRA. Adicionalmente, utilizam-se controladores de polarização (PC) para garantir mesmo estado de polarização entre as portadoras ópticas e maximizar o efeito não-linear FWM. Em um sistema real, é possível utilizar um controlador dinâmico de polarização para assegurar que ambas as portadoras ópticas permaneçam em mesmo estado de polarização.

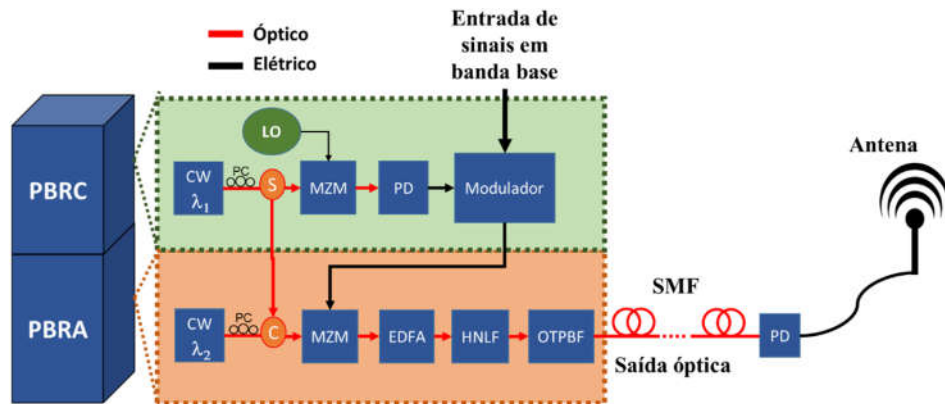


Figura 11: Esquemático do *front-end* de RF baseado em tecnologia fotônica para as redes 5G.

Os sistemas RoF exercem um importante papel na convergência dos mundos ópticos e sem fio, além de usufruir de técnicas fotônicas para o melhoramento do desempenho do sistema de transmissão e recepção, como a técnica de amplificação do PBRA e geração de sinais de RF do PBRC. Especialmente nas redes 5G, picocélulas de transmissão em ondas milimétricas proveem altíssimas bandas de operações e são capazes de proporcionar transmissão para aplicações banda larga entre, por exemplo, câmeras, computadores pessoais e *smartphones*. A Figura 12 demonstra uma potencial aplicação em ambiente interno para as redes 5G utilizando o PBRF.

A técnica FTTA pode ser usada para minimizar as atenuações causadas nos cabos coaxiais para altas frequências. As informações da rede provinda da *Internet* são roteadas no *gateway* e, então, o modulador digital processa os sinais digitais para as modulações do padrão celular 3G, 4G e 5G. A fibra SMF transporta os sinais ópticos para as antenas e os sinais amplificados são transmitidos conectando todos os

dispositivos da cobertura celular. O principal objetivo do PBRF é baixo custo de implementação e operação ultra banda larga de sinais de RF. O PBRC é um simples esquema capaz de prover portadoras de RF com pureza espectral independentemente da frequência de operação. O PBRA aumenta a eficiência de potência da conversão opto-elétrico a partir da amplificação no domínio fotônico, e conseqüentemente, favorece o aumento na área de cobertura. Este dispositivo reduz significativamente a complexidade do transmissor e supera as limitações de banda de amplificação dos amplificadores de RF elétricos. Adicionalmente, pode-se utilizar o PBRF na central telefônica e distribuir os sinais amplificados pela rede óptica para as antenas de transmissão, simplificando os *front-end* de RF e estações rádio base, como demonstrado na Figura 13.

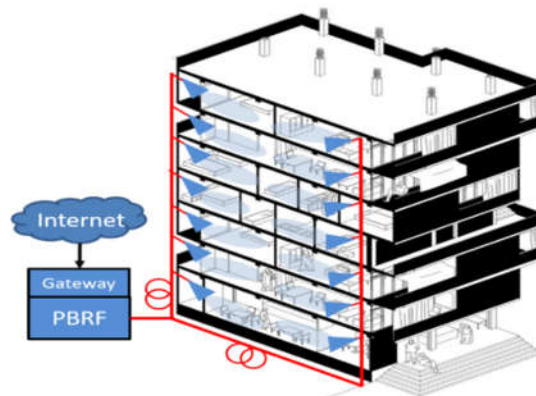


Figura 12: Futura aplicação do PBRF na transmissão celular em picocélulas 5G.

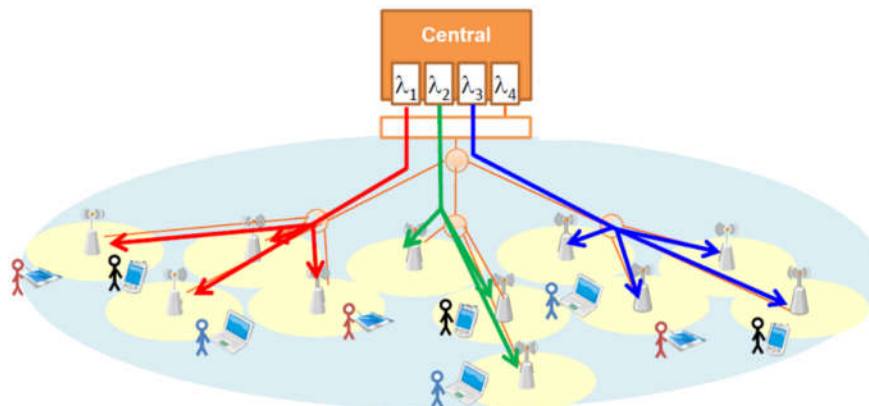


Figura 13: Cenário para aplicações de redes celulares utilizando rádio sobre fibra.

## Capítulo 4

### 4.1 Caracterização do *front-end* de RF baseado em tecnologias fotônicas

#### 4.1.1. Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a caracterização do *front-end* de RF baseado em tecnologias fotônicas e análises de desempenho para transmissões de sinais digitais. O *front-end* de RF proposto é composto por dois blocos baseados em tecnologias fotônicas: conversor de RF baseado em fotônica (PBRC) e amplificador de RF baseado em fotônica (PBRA). Em resumo, o primeiro bloco (PBRC) tem sido reconhecido como um importante elemento para as redes 5G devido a sua funcionalidade de conversão de RF até ondas milimétricas, provendo flexibilidade, pureza espectral e livre de interferências eletromagnéticas. Já o segundo bloco (PBRA) é capaz de amplificar sinais de RF no domínio óptico, desde poucos kHz até dezenas de GHz, com ganho uniforme independentemente da frequência de operação.

#### 4.1.2. Desempenho do conversor de RF baseado tecnologia fotônica

Nesta seção será apresentado o desempenho experimental do conversor baseado em tecnologia fotônica, empregando um laser contínuo, um modulador MZM e um fotodetector, como demonstrado no Capítulo 3 (seção 3.1.2). A Figura 14 demonstra o espectro óptico, modulado com uma frequência ( $f_{LO}$ ) de 14 GHz e com potencia de RF de entrada de 12 dBm, na saída de um modulador MZM na configuração de tensão de polarização igual a  $V_{\pi}/2$ . Nesta condição, chamado de

ponto de quadratura, tanto as bandas laterais ímpares e quanto as bandas laterais pares aparecem no espectro óptico de acordo com a Equação (1) (seção 2.1.2).

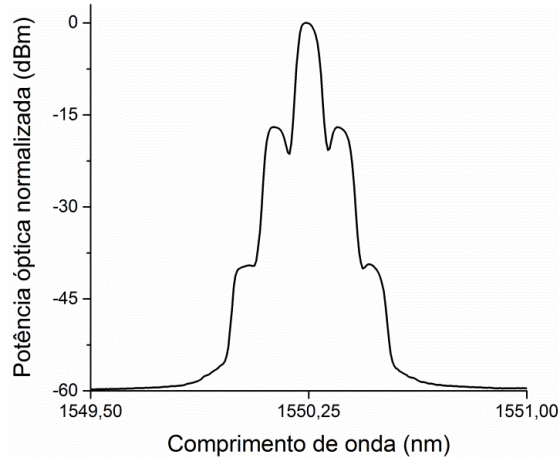


Figura 14: Espectro óptico na saída do MZM para a configuração de tensão de polarização (bias) igual a  $V_{\pi/2}$ .

A relação entre portadora óptica e a primeira banda lateral de RF é 15 dB e, para a segunda banda lateral de RF, é 40 dB. Com o processo de fotodetecção entre bandas laterais e portadora óptica, o sinal de RF gerado terá frequência  $f_{LO}$ , que corresponde à mesma frequência inserida no MZM. A Figura 15 apresenta a supressão de portadora quando se configura a tensão de polarização com  $V_{\pi}$ , e a relação entre portadora óptica e a primeira banda lateral de RF é 27 dB. Nesta etapa dos experimentos, empregou-se uma portadora de RF de 14 GHz devido a resolução mínima do analisador de espectros ópticos ser de 0,025 nm (12 GHz).

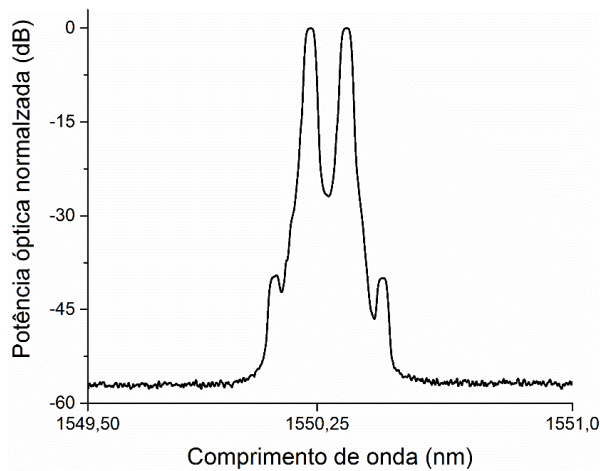


Figura 15: Espectro óptico na saída do MZM para a configuração de tensão de polarização ( $V_{bias}$ ) igual a  $V_{\pi}$ .

Como demonstrado na Equação (1) (seção 2.1.2), quando  $V_{bias}$  é configurado em  $V_{\pi}$  as bandas laterais pares e a portadora óptica são atenuadas severamente. Com isso, a frequência resultante no processo de fotodetecção será  $2f_{LO}$ . A Figura 16 reporta o espectro elétrico na saída do fotodetector. Todas as frequências geradas com o PBRC apresentam pureza espectral sem a necessidade de uso de filtros. Há uma variação de potência de RF de 2,1 dB devido à resposta em frequência do modulador MZM (Fujitsu® FTM7939EK) e do fotodetector (u2t® XPDV2150RA).

Estas características permitem a reconfigurabilidade da frequência de operação, apenas variando a frequência de entrada ( $f_{LO}$ ), e possibilitando flexibilidade de geração de portadoras de RF para as possíveis bandas distintas do 5G, sendo elas 6, 28 e 38 GHz. Adicionalmente, o PBRC implementado no esquemático do PBRF, como na Figura 10 (seção 3.1.4), pode fornecer portadoras de RF para modular sinais de banda base em banda passante, em frequências distintas do padrão de telefonia móvel utilizado.

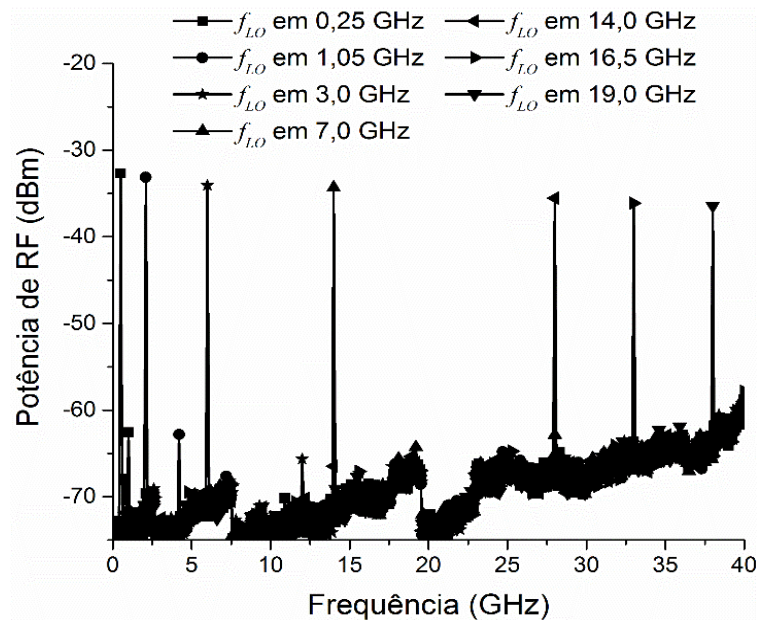


Figura 16: Espectro elétrico duplicado na saída do fotodetector.

### 4.1.3. Demonstração do mecanismo de ganho do amplificador de RF baseado em tecnologia fotônica

Como apresentado na seção 3.1.3, o sistema PBRA tem a capacidade de amplificar sinais de RF no domínio óptico. Nesta seção, será exposto, experimentalmente, o mecanismo de ganho de RF do PBRA. A Figura 17 apresenta a bancada experimental da implementação do esquemático do PBRA para análise analógica, no qual duas portadoras ópticas com  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  de 1.555,35 e 1.558,65 nm, respectivamente, são moduladas com sinais de RF e amplificadas opticamente com o EDFA para a entrada na HNLF. O espectro na saída da fibra altamente não-linear, no qual aplicou-se 20 dBm de potência óptica, apresenta as duas portadoras ópticas e os produtos de FWM gerados a partir do processo não-linear FWM, exibido na Figura 18.

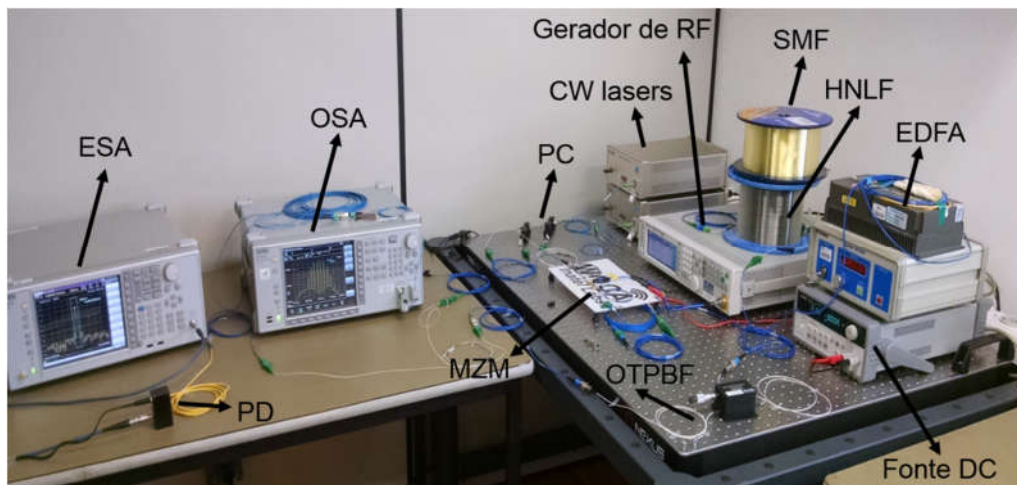


Figura 17: Bancada de testes para análise de ganho do PBRA. ESA: analisador de espectros elétricos; OSA: analisador de espectros ópticos; MZM: modulador Mach-Zehnder; PC: controlador de polarização; CW lasers: laser de onda contínua; SMF: fibra monomodo; HNLF: fibra altamente não-linear; EDFA: amplificador de sinais ópticos; OTPBF: filtro passa-faixa óptico reconfigurável; PD: fotodetector.

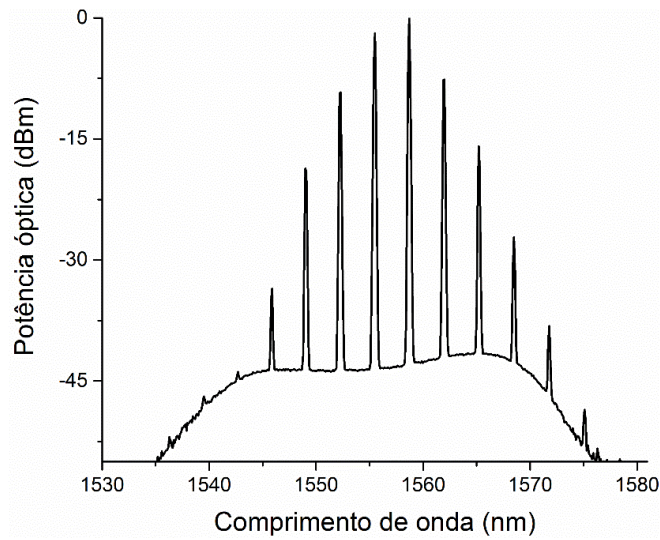
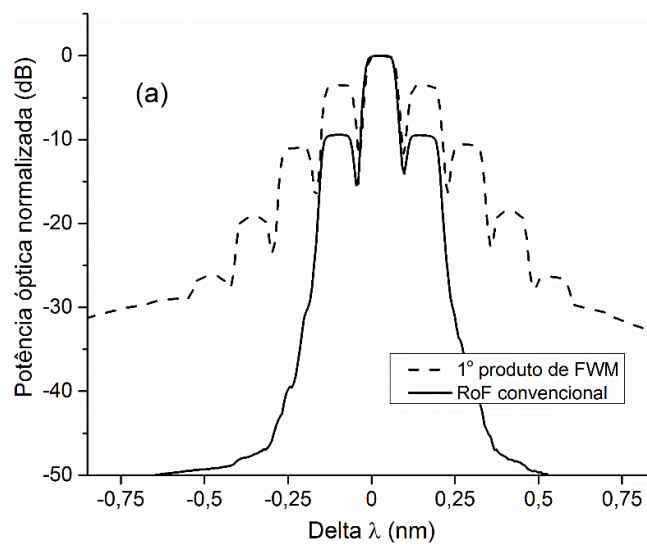


Figura 18: Espectro óptico na saída da HNLF.

Se analisados detalhadamente o primeiro e segundo produto de FWM do espectro da Figura 19, pode-se concluir que, em comparação com o espectro do sistema rádio sobre fibra convencional (Figura 14), o efeito não-linear FWM fez com que seus produtos tenham mais bandas laterais de RF e com maior nível de potência. Este efeito resulta em uma maior potência de RF fotodetectada. As Figuras 19(a) e 19(b) apresentam esta comparação entre os espectros ópticos do RoF convencional com o 1º e 2º produto de FWM.





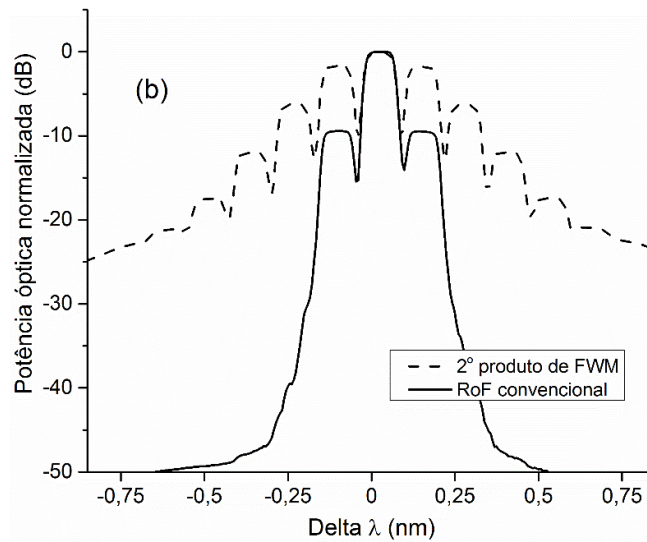


Figura 19: Comparação de espectros ópticos. (a) RoF convencional comparado ao 1º produto de FWM. (b) RoF convencional comparado ao 2º produto de FWM.

O resultado deste efeito no domínio elétrico é a amplificação dos sinais de RF, visto que o processo de fotodetecção demonstrado na Equação (2) (seção 2.1.2) é diretamente proporcional ao batimento das bandas laterais de RF. Após filtrar o primeiro ou o segundo produto de FWM e fotodetectá-lo, o sinal de RF apresenta maior potência elétrica em comparação com o sistema RoF convencional, sendo eles fotodetectados em mesma potência óptica. As potências de RF resultantes do primeiro e do segundo produto de FWM, para uma portadora de RF em 14 GHz, são -32,19 e -21,63 dBm, respectivamente. Sabendo que a potência de RF do RoF é de -47,65 dBm, pode-se concluir que houve um ganho de RF de 16 e 27 dB para o 1º e 2º produto de FWM, respectivamente, sem apresentar nenhuma distorção no sinal analógico fotodetectado, como demonstrado na Figura 20.

A relação sinal-ruído elétrica (SNR) é outro ponto melhorado no PBRA. Considerando o 1º produto de FWM, a SNR é de 57 dB; já o 2º produto de FWM, a SNR é de 59 dB. Sabendo que o RoF convencional exibe SNR de 43 dB, o sistema PBRA melhora a SNR do sinal de RF em 14 e 16 dB para o 1º e 2º produto de FWM, respectivamente. Como demonstrado, o uso do sistema PBRA é apropriado nas redes convergentes óptico-*wireless*, podendo prover ganho e melhoramento de SNR nos sinais de RF para a transmissão de dados em uma célula de telefonia celular ou sistemas sem fio de comunicação, por exemplo.

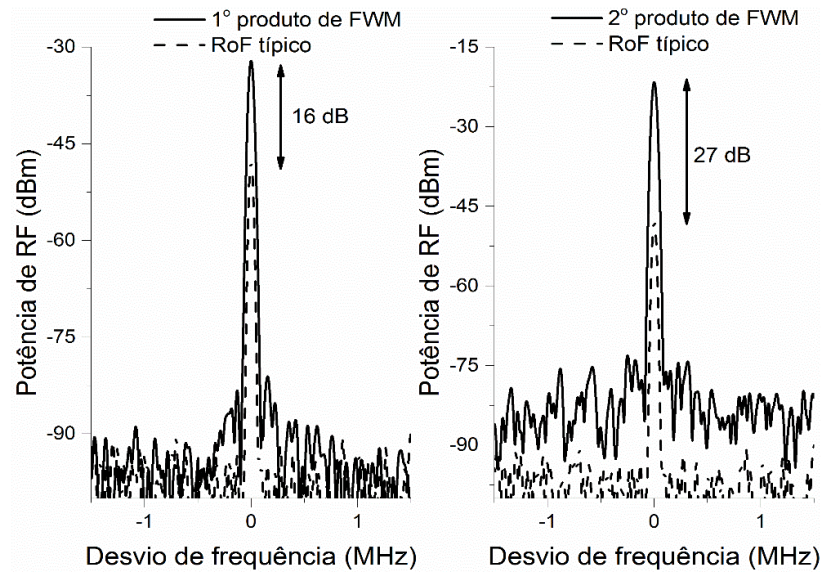


Figura 20: Comparação de espectros elétricos fotodetectados para o PBRA e RoF típico.

Outro ponto investigado no PBRA pela primeira vez na literatura é o ruído de fase dos sinais amplificados. A Figura 21 apresenta o ruído de fase dos sinais de RF na saída do fotodetector em comparação com o sistema RoF convencional. Pode-se notar que não há oscilação ou incremento de ruído de fase nos sinais amplificados. Adicionalmente, após 110 dBc/Hz, tanto o 1º quanto o 2º produto de FWM apresentam valores de ruído de fase inferiores ao sistema RoF, deixando claro que o ruído de fase residual do sistema é amenizado com o processo de amplificação do PBRA.

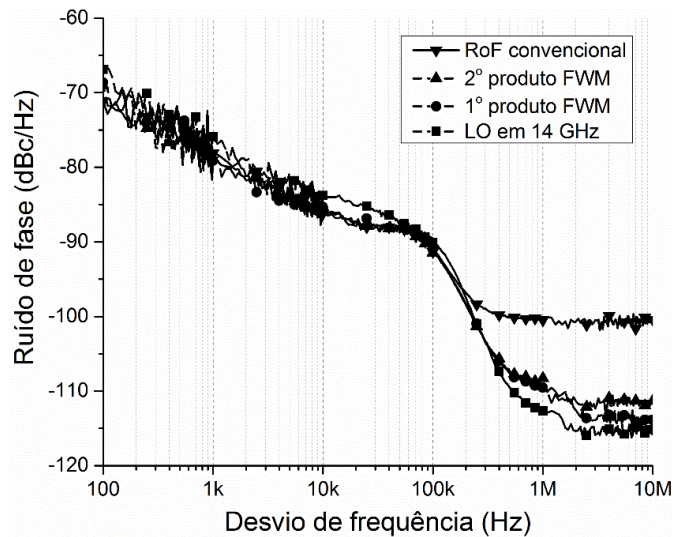


Figura 21: Ruído de fase dos sinais fotodetectado pelo PBRA e RoF convencional.

A Figura 22 exibe o desempenho do ganho ultra banda larga. As curvas de ganho de RF em função da frequência de operação para o 1º e 2º produto de FWM apresentam padrão de ganho linear e constante até 40 GHz. Entretanto, há somente uma pequena variação de 3 dB, novamente devido às respostas em frequência do modulador MZM e fotodetector utilizados no experimento. Adicionalmente, a estabilidade do sistema PBRA foi analisada em função do tempo de funcionamento. O sistema permaneceu ligado durante quatro horas e não houve mudanças significativas no ganho de RF, sendo que a temperatura do sistema foi mantida constante em toda a análise. A análise do desempenho do ganho de RF em função da temperatura do sistema está como trabalho futuro do projeto.

O desempenho do PBRA em comparação com outros amplificadores de RF elétricos demonstra que o sistema proposto apresenta banda de amplificação linear e constante até 40 GHz. Porém, a frequência limitante desta aplicação é devido às respostas em frequências dos dispositivos opto-elétricos utilizados, sendo que há possibilidade de expandir até 100 GHz se utilizar dispositivos opto-elétricos disponíveis no mercado.

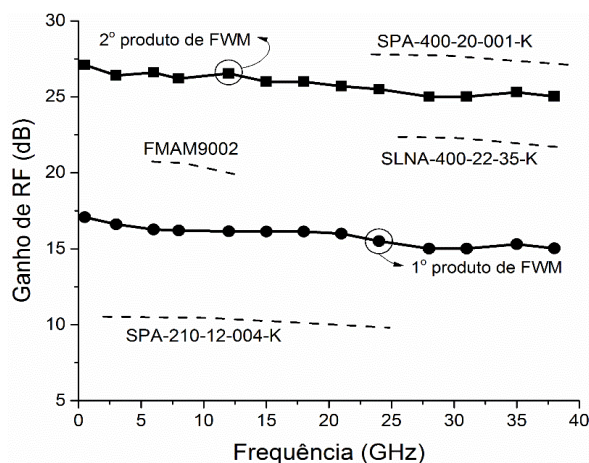


Figura 22: Desempenho ultra banda larga do PBRA.

Os resultados analógicos de ganho de RF do PBRA comprovam que o sistema é capaz de amplificar os sinais de RF no domínio óptico e melhorar a eficiência de potência elétrica, em comparação com o sistema RoF convencional, para uma mesma potência óptica na entrada do fotodetector. Os ruídos de fase dos sinais amplificados não são distorcidos ou incrementados e apresentam uma melhora

no ruído de fase residual após o desvio de frequência de 110 kHz. Os espectros elétricos dos sinais do PBRA não apresentam distorções e a relação sinal-ruído elétrica para ambos os sinais do 1º e 2º produto de FWM demonstram melhoramento da SNR em 15 dB. O ganho ultra banda larga do PBRA é constante e linear desde 100 kHz até 40 GHz. As vantagens do uso do sistema proposto demonstram que o PBRA pode ser utilizado em sistemas convergentes óptico-*wireless* com o intuito de amplificar os sinais no domínio óptico e transmiti-los às antenas de transmissão, diminuindo os estágios de amplificação nos *front-ends* de RF.

#### 4.1.4. Análise de desempenho digital do amplificador de RF baseado em tecnologia fotônica

Esta seção apresenta uma análise experimental de desempenho digital do PBRA para sinais modulados em banda passante, utilizando a bancada de teste da Figura 23. As métricas de desempenho serão ganho de RF; magnitude de erro vetorial (EVM – *error vector magnitude*); SNR. Portanto, o PBRA não só deve apresentar ganho de RF, mas também um desempenho satisfatório na transmissão da informação com modulações multi-níveis. Para isso, deve-se analisar o efeito não-linear FWM na HNLF em função de seus parâmetros para que os sinais digitais apresentem amplificação e nenhuma distorção. Para este estudo, variando a potência óptica na entrada da HNLF, é possível analisar a eficiência do FWM com o intuito de maximizar o ganho de RF e SNR, e minimizar o parâmetro EVM. O parâmetro de desempenho EVM representa a magnitude do vetor de erro, calculado a partir da diferença entre os fasores do sinal medido e do sinal ideal na recepção, diretamente proporcional à taxa de erro de bits. Portanto, quanto menores forem os valores de EVM, melhor será a qualidade do sinal digital fotodetectado.

A Figura 24 apresenta a caracterização do PBRA para sinais digitais (QPSK e 16-QAM em 100 Msymb/s) utilizando uma portadora em 3,3 GHz e somente o 1º produto de FWM. Os valores de EVM estão em função da potência óptica na entrada da HNLF. É importante mencionar também que, neste experimento, foram

fotodetectados os sinais ópticos do sistema RoF convencional e PBRA em uma mesma potência óptica (-3 dBm) para diferentes potências ópticas na entrada da HNLF. Para a fibra não-linear utilizada nos experimentos, a curva do desempenho caracterizado do PBRA demonstra que há um ponto ótimo para o ganho máximo de RF e minimização do EVM. O desempenho do PBRA é fortemente dependente da eficiência do FWM e da relação sinal-ruído óptica (OSNR – *optical signal-to-noise ratio*). Aplicando a potência óptica de 20 dBm na entrada da HNLF, as modulações QPSK e 16-QAM apresentam o melhor desempenho de EVM, sendo eles 4,1 e 6,2 %RMS, respectivamente. Entretanto, esses valores aumentam para, aproximadamente, 20 %RMS para as potências ópticas menores que 16 dBm devido à baixa eficiência do processo de FWM. Adicionalmente, há uma degradação no desempenho para potência ópticas acima de 25 dBm devido ao alto ruído ASE (*amplified spontaneous emission*) incrementado pelo EDFA e a saturação do 1º produto de FWM. Esta saturação significa que o produto de FWM para de aumentar sua potência óptica e começa a transferir sua energia para produtos de FWM de ordens maiores.

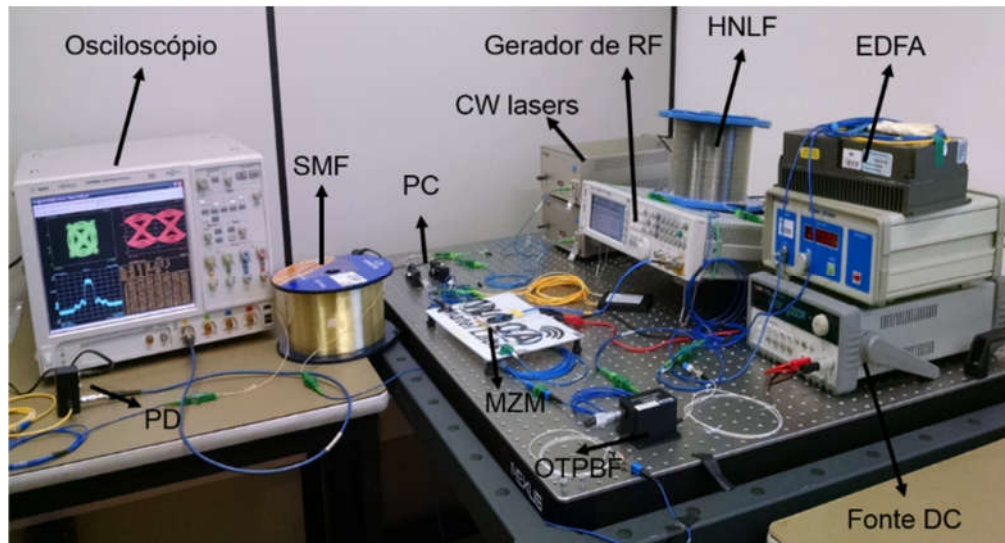


Figura 23: Bancada de testes para caracterização de desempenho digital do PBRA. ESA: analisador de espectros elétricos; OSA: analisador de espectros ópticos; MZM: modulador Mach-Zehnder; PC: controlador de polarização; CW laser: laser de onda contínua; SMF: fibra monomodo; HNLF: fibra altamente não-linear; EDFA: amplificador de sinais ópticos; OTPBF: filtro passa-faixa óptico reconfigurável; PD: fotodetector.

O segundo produto de FWM não foi avaliado devido ao alto nível de ruído ASE incrementado pelo EDFA para alcançar potência suficiente. Para uma profunda análise de EVM utilizando o 2º produto de FWM, seria necessário minimizar o ruído ASE com lasers de bombeio com maiores potências, sendo, assim, desnecessário o uso do EDFA antes da HNLF.

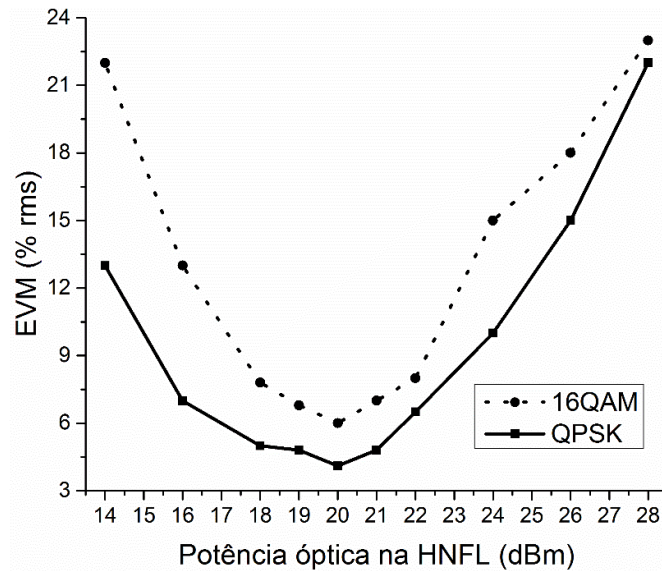


Figura 24: Desempenho do EVM em função da potência óptica na HNLF.

Portanto, para os futuros experimentos, escolhe-se o uso do 1º produto de FWM e o ponto de 20 dBm para implementar as análises de transmissão do PBRF no cenário óptico-*wireless*, devido à mínima taxa de erro de bit na transmissão digital e ganho máximo de RF. Os diagramas de olho dos sinais digitais para as potências ópticas aplicadas à HNLF de 16, 20 e 26 dBm são apresentadas na Figura 25. No ponto ótimo do sistema, que corresponde à potência óptica de 20 dBm, o PBRA não distorce o sinal digital e maximiza a relação sinal-ruído elétrica, apresentando máxima abertura horizontal e vertical dos diagramas de olho. A Figura 26 exibe o espectro elétrico amplificado em 16 dB do PBRA (utilizando o 1º produto de FWM) em comparação com o RoF convencional, apresentando nenhuma distorção.

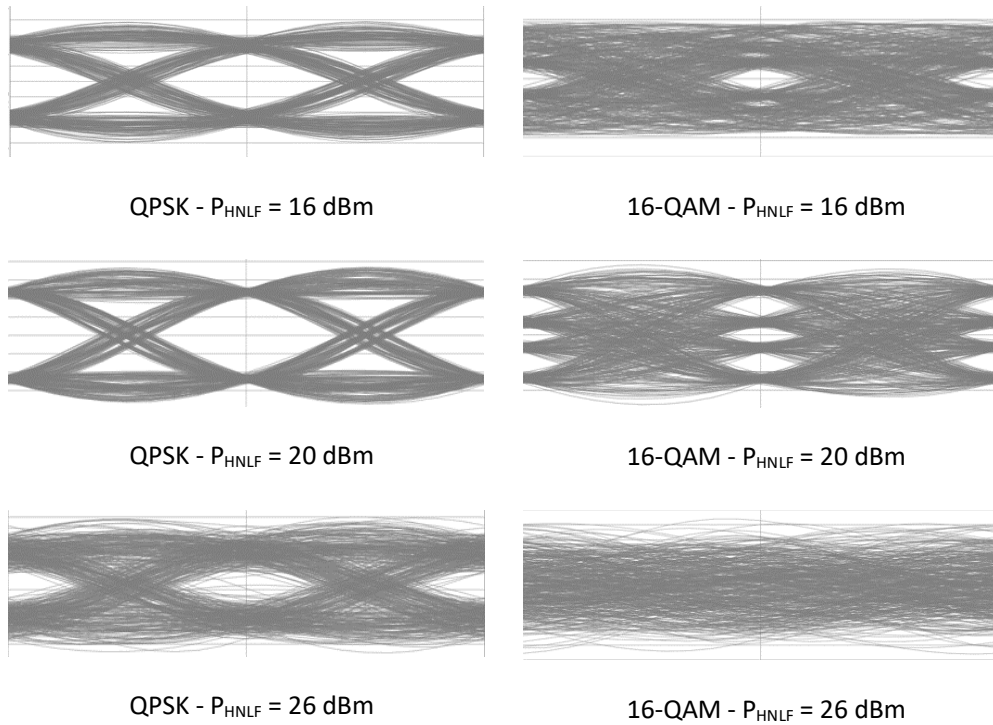


Figura 25: Desempenho das modulações QPSK e 16-QAM em função da potência óptica na entrada da HNLf.

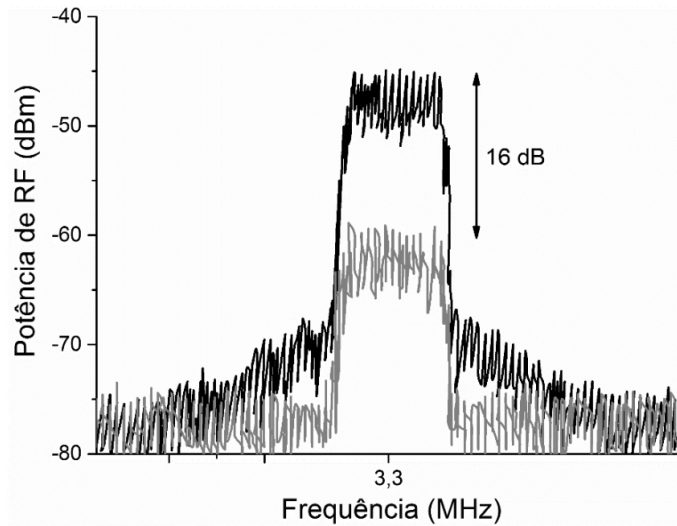


Figura 26: Sinal digital amplificado para potência óptica na entrada da HNLf de 20 dBm.

O desempenho do sistema PBRA para sinais digitais é superior ao RoF convencional, pois amplifica-se os sinais digitais sem distorções. Esse processo de amplificação aumenta a relação sinal-ruído dos sinais digitais, comprovado tanto na análise qualitativa com os diagramas de olho, quanto na quantitativa com os espectros elétricos. Outro teste de desempenho do PBRA em comparação com o RoF

convencional é a amplificação dos sinais de RF em um cenário convergente óptico-*wireless* de uma rede 3G viva da empresa TIM, como demonstrado na Figura 27. A Femtocelula conectada à *Internet* provê a comunicação de dados na área de cobertura do padrão 3G UMTS (*universal mobile telecommunication system*) na portadora de 2,1275 GHz. O objetivo desta análise é comprovar a melhoria no sinal de RF utilizando o PBRA e a conectividade com a rede amplificada, considerando que, se o sinal digital do padrão 3G for distorcido, o celular não irá se conectar.

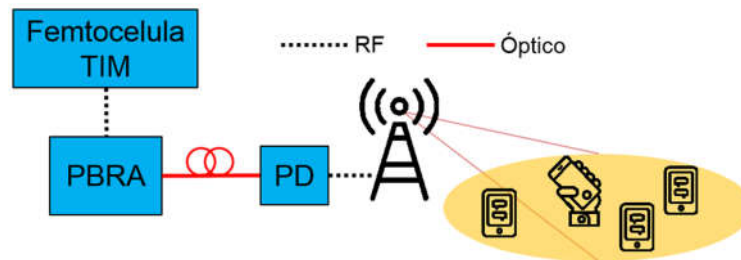


Figura 27: Cenário de teste óptico sem fio em uma rede viva 3G.

A Figura 28 exibe a bancada de testes para análise de desempenho do PBRA na rede viva 3G. O sistema PBRA, quando ligado, transmite os sinais da Femtocelula, que, por sua vez, procura usuários na área de cobertura para estabelecer conectividade. A potência óptica aplicada na fibra HNLF foi de 20 dBm para atender ao ponto ótimo de operação demonstrado na análise anterior. Uma antena impressa de ganho igual a 3 dBi e banda de operação de 1,7 a 2,7 GHz, com diagrama omnidirecional no plano horizontal em toda a faixa de operação, transmite o sinal fotodetectado proveniente do 1º produto de FWM.

Todos os dispositivos móveis na área de cobertura da Femtocélula se conectaram a Femtocélula, quando ligado, devido à maior potência desta rede do que a rede 3G externa “TIM 35” (ERB padrão da cidade de Santa Rita do Sapucaí – MG, local onde foi realizado o experimento). Quando o PBRA for desligado, os dispositivos móveis da rede da Femtocelula comutam de volta para a rede 3G externa “TIM 35”. A Figura 29 demonstra o espectro elétrico na antena de recepção dos sinais transmitidos por ambas tecnologias. A Figura 30(a) exibe a conectividade do *smartphone* com a rede 3G da Femtocelula, chamada de “Blue Zone TIM”, quando o PBRA é ligado. Por outro lado, a Figura 30(b) apresenta o cenário quando o PBRA é desligado, comutando o *smartphone* de volta para a rede padrão.



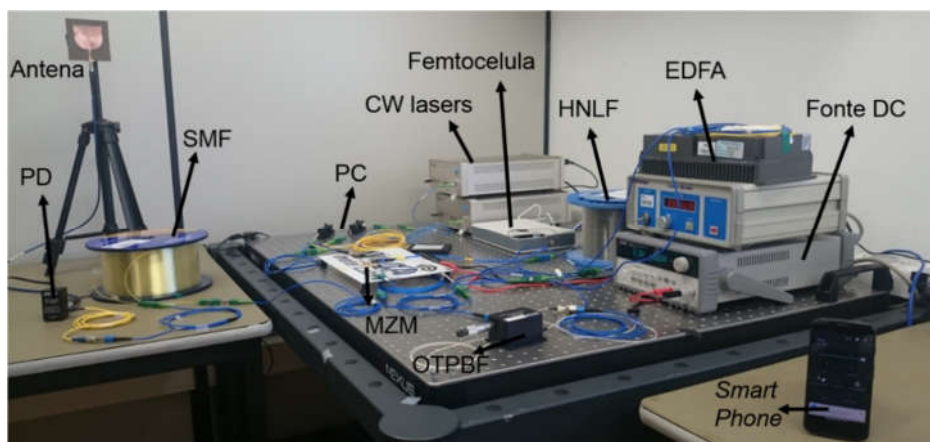


Figura 28: Bancada de testes para validação do desempenho do PBRA em uma rede viva 3G. MZM: modulador Mach-Zehnder; PC: controle de polarização; HNLF: fibra altamente não-linear; PC: controlador de polarização; CW laser: laser de onda contínua; SMF: fibra monomodo; HNLF: fibra altamente não-linear; EDFA: amplificador de sinais ópticos; OTPBF: filtro passa-faixa óptico reconfigurável; PD: fotodetector.

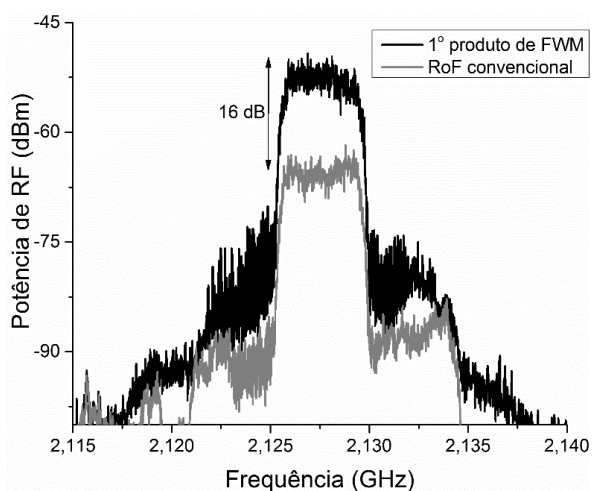


Figura 29: Espectros elétricos na antena de recepção para o sistema rádio sobre fibra e PBRA.

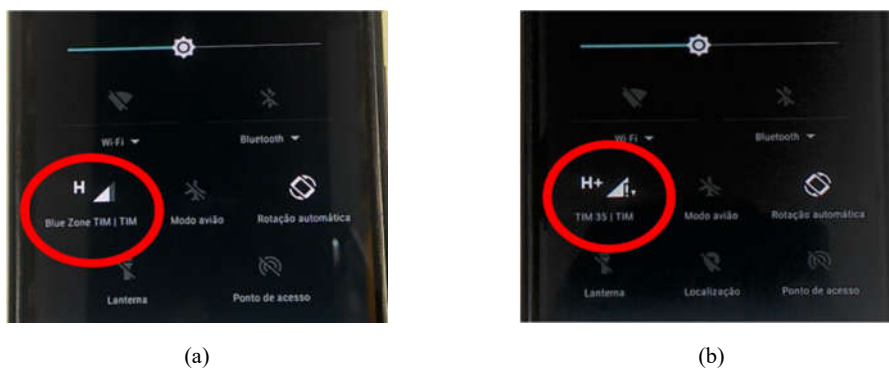


Figura 30: Validação digital do PBRA em uma rede viva 3G. (a) Conectividade com a rede Blue Zone TIM quando o PBRA é ligado; (b) Comutação à rede TIM 35 quando o PBRA é desligado.

Esta validação com a Femtocelula 3G comprova que o sistema de amplificação fotônico pode ser utilizado nas redes de transmissão celular, provendo distribuição dos sinais de telefonia móvel pela rede óptica e os amplificando no domínio óptico. A partir da conectividade, o uso do PBRA demonstra ser vantajoso para as redes celular 3G, 4G e 5G devido ao seu potencial de amplificação dos sinais digitais, em um sistema rádio sobre fibra, no domínio fotônico sem nenhuma distorção.

#### 4.1.5. Implementação do *front-end* de RF baseado em tecnologias fotônicas

A implementação do *front-end* de RF baseado em tecnologias fotônicas se baseia no esquemático proposto na seção 3.1.4, empregando os comprimentos de ondas dos lasers  $\lambda_1 = 1555,35$  nm e  $\lambda_2 = 1558,65$  nm. A primeira comparação de desempenho entre o sistema RoF convencional e PBRF é o cenário *sub-6* GHz de um sistema 5G de transmissão de dados composto por enlaces ópticos e sem fio. Considerou-se que ambos os sistemas transmitem em uma mesma potência óptica (3 dBm) os sinais ópticos à rede óptica do Inatel (Instituto Nacional de Telecomunicações), composta por 26 km de fibra monomodo e distribuída geograficamente pelo campus da instituição.

O principal objetivo foi avaliar o desempenho do PBRF em condições reais de temperatura, pressão e umidade, sendo que os cabos ópticos são distribuídos em galerias subterrâneas. Após a propagação pelos cabos ópticos, os sinais são fotodetectados e transmitidos por uma antena em um enlace sem fio de 20 metros. Neste teste, o PBRC gerou a portadora de 6,0 GHz para um gerador vetorial (Keysight® PSG E8267D) modular em banda passante os sinais digitais com taxa de transmissão de 100 Msymb/s. A Figura 31 exibe os espectros dos sinais na antena de recepção. Pode-se concluir que o PBRF amplificou em 16 dB sem apresentar nenhuma distorção e, com isso, melhorou a SNR dos sinais digitais na recepção.

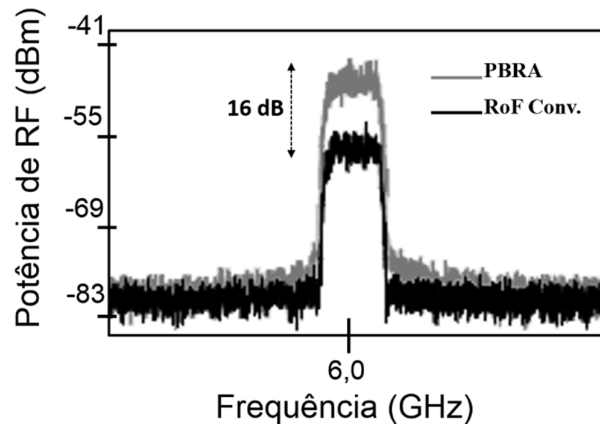


Figura 31: Espectro de RF do RoF convencional e PBRF na antena de recepção.

A Figura 32 exibe a análise de desempenho baseado em constelações e diagramas de olho dos sinais digitais (QPSK, 16-QAM, 32-QAM e 64-QAM) na antena de recepção, considerando que os resultados da esquerda para direita são, respectivamente, do PBRF e do RoF convencional. A análise comparativa entre PBRF e RoF convencional no cenário convergente óptico-*wireless* demonstra que o sistema proposto amplificou 16 dB o sinal digital sem apresentar nenhuma distorção.

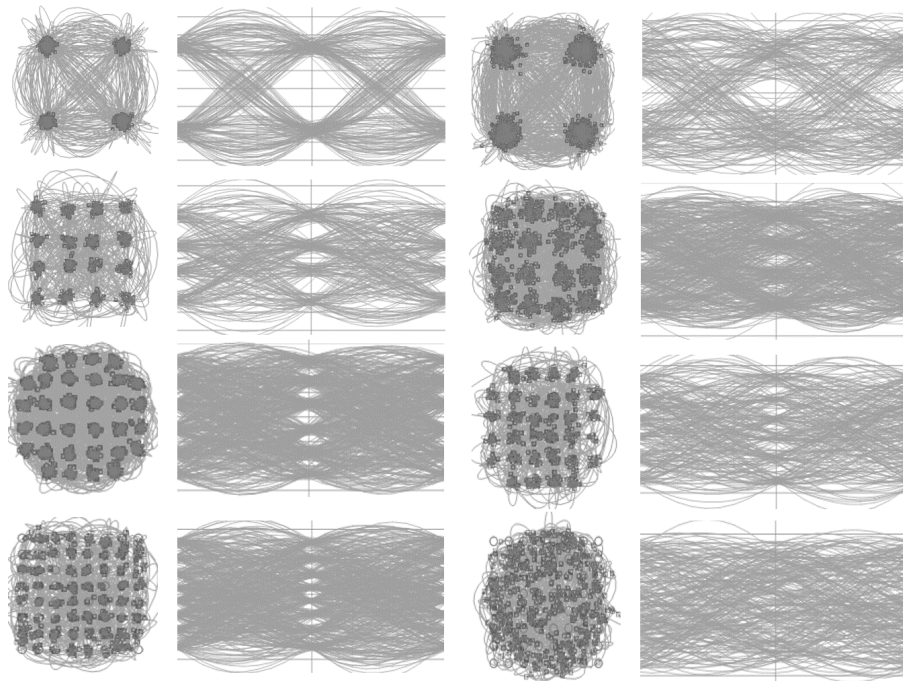


Figura 32: Análise digital do PBRF em comparação com o RoF convencional na antena de recepção.

Os parâmetros de desempenho para as modulações digitais na recepção são exibidos na Tabela 2. Os resultados deste teste demonstram que o *front-end* de RF proposto é uma potencial aplicação nos sistemas de transmissão digital, como as redes de telefonia móvel, provendo melhorias na SNR de 6,6 para 20 dB e melhorando o EVM em 15 %RMS.

Tabela 2: Resumo dos parâmetros de desempenhos medidos.

Modulação	RoF convencional		PBRA	
	EVM*	SNR*	EVM*	SNR*
QPSK	22 %RMS	6,6 dB	7,0 %RMS	20 dB
16-QAM	23 %RMS		7,5 %RMS	
32-QAM	26 %RMS		8,3 %RMS	
64-QAM	28 %RMS		8,49 %RMS	

\*RMS = root mean square, dB = decibel.

Adicionalmente, validou-se o PBRF em um cenário de transmissão banda larga da estação rádio base até à antena de transmissão, utilizando um gerador de ondas arbitrarias (AWG – *arbitrary waveform generator*) de 2 Gsym/s (Keysight® AWG M8190A) nas portadoras de RF de 16, 18 e 20 GHz (provindas pelo PBRC) e modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM. A Figura 33 exibe a bancada de testes do *front-end* de RF proposto, em que um osciloscópio digital (Keysight® V Series DSAV334A) analisa os sinais fotodetectados do PBRF e RoF convencional em mesma potência óptica.

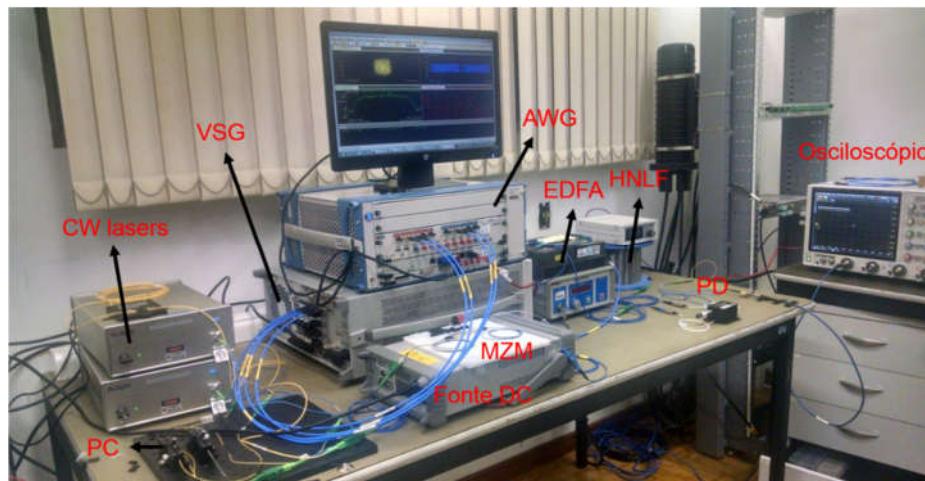


Figura 33: Bancada de teste do *front-end* de RF proposto para o cenário de transmissão banda larga de 2 Gsym/s. CW lasers: laser de onda contínua; PC: controle de polarização; HNLF: fibra altamente não-linear; PC: controlador de polarização; SMF: fibra monomodo; EDFA: amplificador de sinais ópticos; OTPBF: filtro passa-faixa óptico reconfigurável; PD: fotodetector.

Nesta avaliação, utilizou-se também a rede óptica subterrânea do Inatel (Instituto Nacional de Telecomunicações) para validar os testes em condições reais de temperatura, pressão e umidade. A Figura 34 demonstra os espectros elétricos fotodetectados pelo sistema PBRF, nas frequências de portadora de 16, 18 e 20 GHz. Observa-se que as bandas dos sinais digitais não são distorcidas após o processo de fotodeteção pelo PBRF, para diferentes frequências de operação.

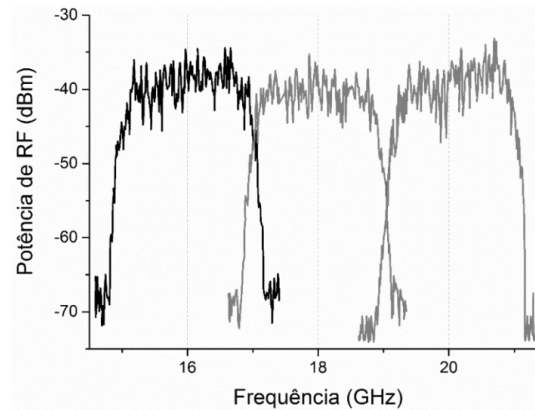


Figura 34: Espectro elétrico dos sinais banda larga fotodetectado no PBRA para as portadoras de RF de 16, 18 e 20 GHz.

Adicionalmente, a Figura 35 apresenta a comparação dos espectros elétricos do PBRF e RoF convencional, demonstrando o ganho de 16 dB na banda do sinal digital sem aumento do piso de ruído. A Figura 36 exibe as constelações para as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM dos sinais fotodetectados na recepção para o sistema proposto (esquerda) e RoF convencional (direita) na portadora de RF em 20 GHz.

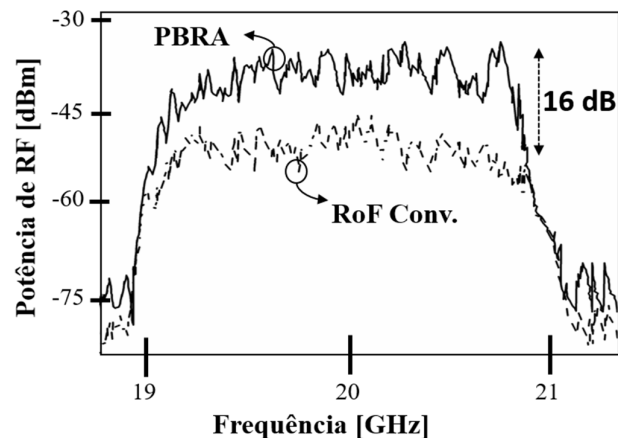


Figura 35: Comparação entre os espectros elétricos fotodetectados do PBRA e do RoF convencional.

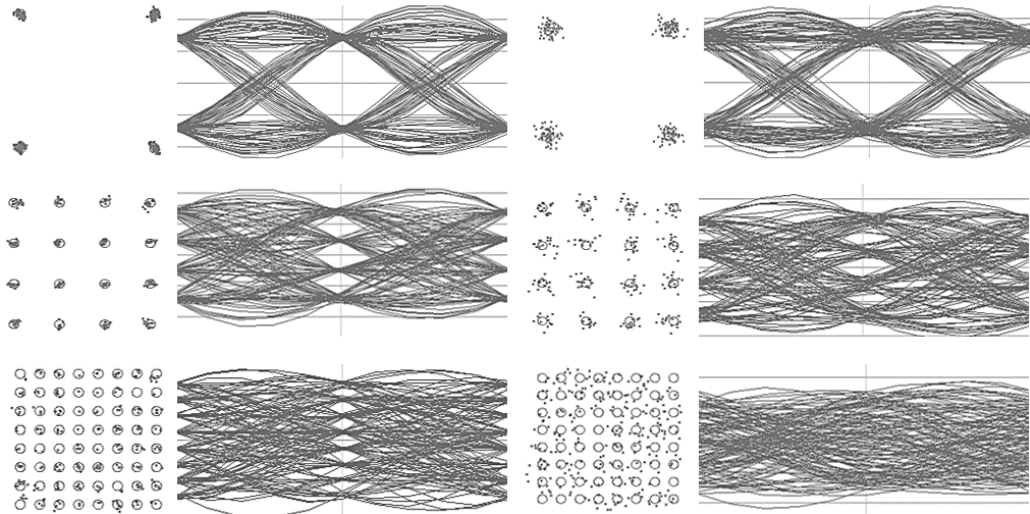


Figura 36: Análise digital baseada em constelações e diagramas de olho do PBRF (esquerda) em comparação com o RoF convencional (direita) após o processo de fotodetecção.

A partir desta avaliação, pode-se concluir que os sinais de RF oriundos do *front-end* de RF proposto obtiveram maiores potências elétricas em comparação ao RoF convencional. As análises baseadas em constelações e diagramas de olho também demonstram que o PBRF amplifica os sinais banda larga sem nenhuma distorção. A Tabela 3 exibe os valores de EVM e SNR para ambos os sistemas, em que EVM diminuiu em 6,0 %RMS e o SNR aumentou em 8,4 dB. Adicionalmente, a potência da banda do sinal digital ( $Potência_{BW}$ ) amplificou de -31 para -16 dBm utilizando o PBRF.

Tabela 3: Resumo dos parâmetros de desempenhos medidos.

Modulação	RoF convencional			PBRF		
	EVM*	SNR*	Potência <sub>BW</sub> *	EVM*	SNR*	Potência <sub>BW</sub> *
QPSK	11,2 %RMS	19,0 dB	-31,5 dBm	5,0 %RMS	27,4 dB	-16,0 dBm
16-QAM	11,5 %RMS			6,1 %RMS		
64-QAM	13,0 %RMS			7,1 %RMS		

\*RMS = *root mean square*, dB = decibel, dBm = decibel miliwatts.

Em conclusão, as duas validações experimentais de desempenho digital do *front-end* de RF proposto em comparação ao sistema RoF convencional comprovam que o PBRF é um sistema potencial nos cenários de transmissões convergentes óptico-*wireless* das futuras redes banda largas. Nestes testes, o PBRF amplifica de 16 dB os sinais digitais tanto no cenário com taxa de transmissão de 100 Msymb/s

quanto no outro cenário com taxa de transmissão de 2 Gsymb/s. Em ambas as situações não há distorções e as relações sinal-ruído elétricas melhoram em 13 e 8 dB, respectivamente. Portanto, com estes resultados, o PBRF apresenta não só reconfigurabilidade em frequência e amplificação linear desde poucos kHz até 40 GHz, mas também demonstra melhoramento na relação sinal-ruído elétrica, cuja capacidade de vazão do sistema convergente pode ser aumentada.

# Capítulo 5

## 5.1. Conclusões

Foi proposto e avaliado experimentalmente um *front-end* de RF baseado em tecnologias fotônicas para as redes óptico-*wireless* baseadas na tecnologia rádio sobre fibra. Suas vantagens impulsionam as pesquisas das próximas gerações de sistema sem fio que suportarão altas frequências de portadora com elevadas taxas de transmissão e permitirão a convergência de diferentes tecnologias, como 3G, 4G, 5G e WiFi. O *front-end* de RF baseado em tecnologia fotônica (PBRF) baseou-se em dois blocos: geração de RF baseado em multiplicação em frequência no domínio óptico (PBRC), e outro de amplificação de sinais de RF ainda no domínio óptico baseado no efeito não-linear FWM (PBRA).

O bloco PBRC emprega a técnica chamada de translação de frequência a partir da multiplicação em frequência no domínio óptico. Ele tem sido reconhecido também na literatura por ser um importante elemento nas redes futuras 5G devido à sua funcionalidade de conversão de sinais de RF para as ondas milimétricas, provendo flexibilidade, ausência de distorções e pureza espectral. O desempenho obtido pelo PBRC demonstra que a técnica é apta para produzir portadoras de RF em diferentes canais de padrões de comunicações sem fio do espectro eletromagnético, tais como WiFi, 3G, 4G e até mesmo o 5G. A técnica OFM apresenta imunidade eletromagnética, baixo custo de implementação, rápida sintonização e pureza espectral, além de banda de operação linear desde poucos kHz até dezenas de GHz.

O PBRA, previamente proposto pelo grupo do Laboratório WOCA, amplifica os sinais de RF ainda no domínio fotônico e demonstra ser um importante avanço tecnológico de alto impacto e inovador para as comunicações convergentes óptico-*wireless*, cujo desempenho e aplicabilidade é a principal contribuição desta tese de mestrado. A inovação do método PBRA é amplificar os sinais de RF em um sistema



rádio sobre fibra ainda no domínio óptico, sem depender de componentes elétricos e utilizar as vantagens de fotônica de micro-ondas para obter banda de operação ultra banda larga e imunidade eletromagnética. Este método de amplificação tem sido desenvolvido e avaliado em termos de desempenho de ganho de RF e métricas de qualidade para sinais analógicos e digitais, tais como relação sinal-ruído, ruído de fase, distorções temporais e EVM.

Em linhas gerais, podem ser apontadas as principais vantagens da técnica PBRA como: ganho de RF uniforme e operação ultra banda-larga estendendo desde frequências próximas às 100 kHz até dezenas de GHz; ausência de distorções causada pelo processo de amplificação no domínio elétrico; melhoramento da relação sinal-ruído elétrica, apresentando baixa inserção de ruído de amplificação; e simplificação dos *front-ends* de RF devido à utilização de menos estágios de amplificação nas estações rádio base. As avaliações experimentais deste método de amplificação demonstraram também o fundamento físico da técnica PBRA e aplicabilidade para as redes de telefonia móvel, provendo conectividade na *Internet* e ausência de distorções.

O desempenho do sistema PBRA para sinais digitais é superior aos RoF convencionais, no qual os sinais fotodetectados de RF apresentam maior potência elétrica e sem distorções. Este processo de amplificação aumenta a relação sinal-ruído dos sinais digitais, comprovado tanto na análise qualitativa com os diagramas de olho, quanto na quantitativa com os espectros elétricos e valores de EVM e SNR. Como o processo de amplificação de RF é inteiramente fotônico, a inserção de ruído elétrico e, conseqüentemente, a figura de ruído do sistema, é extremamente baixo ou quase zero, comparados aos amplificadores elétricos, cujo processo de amplificação baseia-se em transistores elétricos.

O PBRF é o conjunto dos blocos PBRC e PBRA, cujos cenários convergentes ópticos-*wireless* validaram seu desempenho para transmissões de sinais digitais de diferentes modulações e frequências de portadora. Validou-se o desempenho do PBRF em comparação com o sistema RoF convencional em um cenário de rede óptica real do Instituto Nacional de Telecomunicações, composto por 26 km de fibra óptica subterrânea e distribuída geograficamente pelo campus da instituição. O

principal objetivo foi avaliar o desempenho entre o sistema proposto e o convencional em condições reais de temperatura, pressão e umidade. No primeiro cenário de teste, utilizou-se taxa de transmissão de 100 Msymb/s na portadora de 6,0 GHz, na qual após a propagação pelos cabos ópticos, os sinais foram fotodetectados e transmitidos por uma antena com 20 metros de enlace sem fio. Esta análise comparativa entre PBRF e o sistema típico de RoF em um cenário óptico-*wireless* demonstra que o sistema proposto amplificou em 16 dB o sinal digital sem apresentar nenhuma distorção. O *front-end* proposto apresenta uma aplicação potencial nos sistemas 5G de *sub-6* GHz de transmissão digital, provendo reconfigurabilidade em frequência e melhorias na SNR de 6,6 para 20 dB e no EVM em 15,0 %RMS.

No segundo cenário de teste, empregou-se taxa de transmissão de 2 Gsymb/s na portadora de 16, 18 e 20 GHz, frequência máxima que o gerador vetorial poderia modular os sinais digitais em banda passante. Esta validação analisa os sinais transmitidos na rede óptica subterrânea e fotodetectados em mesma potência óptica, para ambos os sistemas. Neste caso, os sinais digitais oriundos do PBRF obtiveram maiores potências de RF e melhores desempenhos digitais em comparação ao RoF convencional, pois amplificaram-se em 16 dB, diminuindo o EVM em 6,0 %RMS e aumentando o SNR em 8,4 dB. Adicionalmente, a potência da banda do sinal digital foi de -31 para -16 dBm. O segundo cenário comprova a aplicabilidade do PBRF para os sistemas digitais sem fio de altíssima vazão e elevadas frequências de operação, podendo também ser aplicado nas futuras redes convergentes óptico-*wireless*, sendo elas telefonia móvel convergente 3G, 4G e 5G ou tecnologias de comunicação sem fio de alta capacidade de dados como *WiFi Offload*.

O principal objetivo alcançado pelo PBRF foi baixo custo de implementação e operação ultra banda larga de sinais de RF. O PBRC é um simples esquema capaz de prover portadoras de RF com pureza espectral independentemente da frequência de operação. O PBRA aumenta a eficiência de potência da conversão opto-elétrico a partir da amplificação no domínio fotônico e, conseqüentemente, favorecendo no aumento na área de cobertura e capacidade de transmissão do sistema. Este dispositivo reduz significativamente a complexidade do transmissor e supera as limitações de banda de amplificação dos amplificadores de RF elétricos.

## 5.2. Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros para esta dissertação de mestrado compreendem em melhorias no sistema de amplificação do PBRA e novos experimentos com o PBRF. Para o PBRA, novos experimentos de amplificação de RF em fibras altamente não-lineares com coeficientes não-lineares maiores poderiam reduzir a potência óptica na entrada da HNLF. Esse procedimento pode melhorar a eficiência energética do sistema, ou até mesmo deixar de usar o equipamento de amplificação óptico EDFA, o que diminuirá o piso de ruído óptico e, portanto, possibilitará explorar novos produtos de FWM. Outro ponto importante neste contexto seria empregar lasers de bombeio com maiores potências ópticas e/ou moduladores ópticos com menores perdas por inserção, com o intuito de minimizar as perdas ópticas e maximizar a eficiência de amplificação na HNLF. Adicionalmente, análises do PBRA em função da temperatura e tempo de funcionamento do sistema pode quantificar seu desempenho de ganho de RF para as futuras aplicações em campo e/ou prototipagem.

Para o PBRF, a aquisição de geradores vetoriais em conjunto com geradores arbitrários banda larga possibilitará explorar modulações de níveis maiores e com técnicas de multiplexação, como OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*), GFDM (*generalised frequency division multiplexing*), FBMC (*filter bank multi-carrier*), UFMC (*universal filter multi-carrier*) ou F-OFDM (*filtered OFDM*), compondo taxas de transmissão superiores a 2 Gsymb/s. Adicionalmente, com estes equipamentos, seria possível avaliar o PBRF em portadoras de RF superiores a 20 GHz, visando à análise de transmissão em um cenário óptico-*wireless* de até 38 GHz.

## Referências Bibliográficas

- [1] Ming-Jun Li e Daniel A. Nolan, "Optical Transmission Fiber Design Evolution," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, pp. 1079-1092, 2008.
- [2] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nature Photonics*, vol. 1, no. 6, pp. 319–330, 2007.
- [3] S. A. Pappert, "RF photonics: Status, challenges and opportunities," *Avionics, Fiber- Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP), 2011 IEEE*, San Diego, CA, 2011, pp. 7-8.
- [4] P. Ghelfi et al., "Photonics in Radar Systems: RF Integration for State-of-the-Art Functionality," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 16, no. 8, pp. 74-83, 2015.
- [5] T. R. Clark and R. Waterhouse, "Photonics for RF Front Ends," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 87-95, May 2011.
- [6] <http://www.thefoa.org/tech/ref/OSP/nets.html>. Acessado em 24/02/2017.
- [7] M. Abtahi, M. Mirshafiei, S. LaRochelle, and L. A. Rusch, "All-optical 500-Mb/s UWB transceiver: An experimental demonstration," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 15, pp. 2795–2802, 2008.
- [8] Philip C. D. Hobbs, "Photodiode Front Ends: The Real Story," *Optics & Photonics News*, 12(4), 44-47 (2001).
- [9] S. R. Abdollahi, H. S. Al-Raweshidy, A. Ahmadinia and R. Nilavalan, "An All-photonics Digital Radio over Fiber architecture," *IEEE Communication Technologies Workshop (Swe-CTW)*, Stockholm, Swedish, pp. 62-67, 2011.
- [10] H. Harun, S. M. Idrus, A. B. Mohammad and N. Mohamed, "Optical front-end receiver configuration for 30 GHz millimeter-wave signal Radio over Fiber system," *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, pp. 1248-1251, Macao, 2008.
- [11] Alwyn J. Seeds and Keith J. Williams, "Microwave Photonics," *Journal of*

*Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 4628-4641 (2006).

- [12] J. P. Yao, "Microwave Photonics," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 1–4, pp. 314–335, 2009.
- [13] Y. Gao, A. Wen, Q. Yu, N. Li, G. Lin, S. Xiang, and L. Shang, "Microwave generation with photonic frequency sextupling based on cascaded modulators," *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 26, no. 12, pp. 1199–1202, 2014.
- [14] J. Ma, X. Xin, J. Yu, C. Yu, K. Wang, H. Huang, and L. Rao, "Optical millimeter wave generated by octupling the frequency of the local oscillator," *Journal of Optical Networking*, vol. 7, no. 10, p. 837, 2008.
- [15] N.W. Chen, J.W. Shi, H.J. Tsai, J.M. Wun, F.M. Kuo, J. Hesler, T. W. Crowe, and J. E. Bowers, "Design and demonstration of ultra-fast W-band photonic transmitter-mixer and detectors for 25 Gbits/sec error-free wireless linking.," *Optical Express*, vol. 20, no. 19, pp. 21–34, 2012.
- [16] A. O. J. Wiberg, D. J. Esman, L. Liu, J. R. Adleman, S. Zlatanovic, V. Ataie, E. Myslivets, B. P. P. Kuo, N. Alic, E. W. Jacobs, and S. Radic, "Coherent filterless wideband microwave/millimeter-wave channelizer based on broadband parametric mixers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 20, pp. 3609–3617, 2014.
- [17] M. Cao, J. Li, K. Xu, Y. Dai, F. Yin, and J. Lin, "Bandpass Sampling in digital coherent receiver with free-running local oscillator laser for phase modulated radio-over-fiber systems," *2014 Int. Topical Meeting on Microwave Photonics / 9th Asia-Pacific Microwave*, vol. 22, no. 22, pp. 247–250, 2014.
- [18] A. E. Willner, O. F. Yilmaz, J. Wang, X. Wu, A. Bogoni, L. Zhang, and S. R. Nuccio, "Optically efficient nonlinear signal processing," *IEEE Journal of Selected Topics on Quantum Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 320–322, 2011.
- [19] I. Morohashi, T. Sakamoto, M. Sudo, A. Kanno, A. Chiba, J. Ichikawa, I. Hosako, and T. Kawanishi, "80 Gb/s PDM 16QAM generation by

- polarization-multiplexing QPSK modulator,” *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting PHO 2011*, vol. 2, pp. 765–766, 2011.
- [20] S. Kilmurray, T. Fehenberger, P. Bayvel, and R. I. Killey, “Comparison of the nonlinear transmission performance of quasi-Nyquist WDM and reduced guard interval OFDM,” *Optical Express*, vol. 20, no. 4, pp. 4198–4205, 2012.
- [21] W. S. Wall and M. A. Foster, "Ultra-Wideband Gain in Microwave Photonic Links using Four-Wave Mixing," *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2012.
- [22] S. A. S. Melo, N. G. González, D. F. Noque, A. Cerqueira Sodré, J. C. R. F. Oliveira, R. M. Borges, and N. Cañas-Estrada, “Photonic-assisted microwave amplification using four-wave mixing,” *IET Optoelectronics*, pp. 1–6, 2015.
- [23] I. F. da Costa, C. S. Arismar, E. Reis, D. H. Spadoti and J. R. M. Neto, "Optically controlled reconFigurable antenna array based on a slotted circular waveguide," *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, 2015, pp. 1-4.
- [24] R. M. Borges and S. Arismar Cerqueira, “Convergent and reconFigurable optical-wireless network for LTE and Wi-Fi offloading applications,” *2014 IEEE Latin-America Conference Communication*, 2014.
- [25] T. Sakamoto and A. Chiba, “Coherent synthesis of optical multilevel signals by electrooptic digital-to-analog conversion using multiparallel modulator,” *IEEE Journal of Selected Topics on Quantum Electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1140–1149, 2010.
- [26] S. Y. Jung, S. M. Jung, and S. K. Han, “AMO-FBMC for asynchronous heterogeneous signal integrated optical transmission,” *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 27, no. 2, pp. 133–136, 2015.
- [27] J. Capmany, B. Ortega, and D. Pastor, “A tutorial on microwave photonic filters,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 201–229, 2006.
- [28] P. Ghelfi, F. Scotti, F. Laghezza, and A. Bogoni, “Phase coding of RF pulses in photonics-aided frequency-agile coherent radar systems,” *IEEE Journal of*

*Quantum Electronics*, vol. 48, no. 9, pp. 1151–1157, 2012.

- [29] P. Ghelfi, F. Scotti, F. Laghezza, and A. Bogoni, “Photonic generation of phase-modulated RF signals for pulse compression techniques in coherent radars,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 11, pp. 1638–1644, 2012.
- [30] CISCO, " Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020" *White Paper*, pp 1-39, 2016.
- [31] Nokia, “5G Use Cases and Requirements,” *White Paper*, pp. 1–16, 2014.
- [32] B. Skubic, G. Bottari, A. Rostami, F. Cavaliere, and P. Ohlen, “Rethinking optical transport to pave the way for 5G and the networked society,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1084–1091, 2015.
- [33] P. T. Dat, A. Kanno, N. Yamamoto and T. Kawanishi, "5G transport networks: the need for new technologies and standards," *in IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 9, pp. 18-26, September 2016.
- [34] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, and A. V. Vasilakos, “A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges,” *Wireless Networks*, vol. 21, no. 8, pp. 2657–2676, 2015.
- [35] Huai-Yung Wang, Yu-Chieh Chi, and Gong-Ru Lin, "Remote beating of parallel or orthogonally polarized dual-wavelength optical carriers for 5G millimeter-wave radio-over-fiber link," *Optics Express* 24, pp. 17654-17669 (2016)
- [36] R. Baldemair et al., "Evolving Wireless Communications: Addressing the Challenges and Expectations of the Future," *in IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 24-30, March 2013.
- [37] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!,” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.

- [38] National Instruments, “mmWave : Battle of the Bands,” *White paper*, pp. 1-8, 2016.
- [39] Anritsu, “Physical Layer Measurement for Next-Generation 5G / IoT Wired Communications,” *White paper*, pp.1-16, 2016.
- [40] D. P. Van, B. P. Rimal, S. Andreev, T. Tirronen, and M. Maier, “Machine-to-machine communications over FiWi enhanced LTE networks: A power-saving framework and end-to-end performance,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 4, pp. 1062–1071, 2016.
- [41] N. Gay and W. J. Fischer, “A compact RF/analog front-end for microwave RFID transponders,” *IEEE Semiconductor Conf. Dresden Technol. Des. Packag. Simul. Test, Int. Conf. Work. Table-Top Exhib.*, pp. 26–29, 2011.
- [42] H. Yu, M. Chen, H. Gao, S. Yang, H. Chen, and S. Xie, “RF photonic front-end integrating with local oscillator loop,” *Optics Express*, vol. 22, no. 4, p. 3918, 2014.
- [43] C. Lim et al., "Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 390-405, Feb.15, 2010.
- [44] M. Nakazawa et al., "High Spectral Density Optical Communication Technologies", *Optical and Fiber Communications Reports*, pp. 11-49, 2010.
- [45] E. B. Embaye, O. A. Otesile and M. Toyacan, "Converged optical wireless network featuring active and dynamic routing of radio signals," *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, Magosa, 2013, pp. 219-222.
- [46] S. C. J. Lee, S. Randel, F. Breyer and A. M. J. Koonen, "PAM-DMT for Intensity-Modulated and Direct-Detection Optical Communication Systems," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 23, pp. 1749-1751, Dec.1, 2009.
- [47] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems*. 3<sup>a</sup> Edição. University of Rochester: A John Wiley & Sons, 2002. vol. 6, pp. 563.



- [48] C. Browning, K. Shi, S. Latkowski, P. M. Anandarajah, F. Smyth, B. Cardiff, and L. P. Barry, "Increased bit rate direct modulation AMO-OFDM transmission by optical injection using monolithically integrated lasers," *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 24, no. 11, pp. 879–881, 2012.
- [49] M. T. Rahman, A. Abdullah, M. K. Alam, M. S. Jamil, M. R. Islam, and K. Abdullah, "An efficient modulation technique to mitigate nonlinearities in optical OFDM," *Australas. Telecommun. Networks Appl. Conf. ATNAC 2014*, pp. 189–194, 2015.
- [50] S. Yu, T. Jiang, J. Li, R. Zhang, G. Wu, and W. Gu, "Linearized frequency doubling for microwave photonics links using integrated parallel Mach-Zehnder modulator," *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 4, 2013.
- [51] J. Svarny, "Bias driver of the Mach-Zehnder intensity electro-optic modulator , based on harmonic analysis," *Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits Conference*, pp. 184–189.
- [52] M. F. L. Abdullah and S. W. Bong, "Adaptive differential amplitude pulse-position modulation technique for optical wireless communication channels based on fuzzy logic," *IET Communication*, vol. 8, no. 4, pp. 427–432, 2014.
- [53] A. Caballero, D. Zibar, and I. T. Monroy, "Performance evaluation of digital coherent receivers for phase-modulated radio-over-fiber links," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 21, pp. 3282–3292, 2011.
- [54] Matthias Seimetz, *High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission*. Springer: Optical Sciences, 2005, pp. 262.
- [55] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications*. 3<sup>a</sup> edição. Pearson Education, 2009, pp. 1127.
- [56] E. Ip, A. Pak, T. Lau, D. J. F. Barros, and J. M. Kahn, "Coherent detection in optical fiber systems," *Optics Express*, vol. 16, no. 2, pp. 861–866, 2008.
- [57] E. Y. Chan, M. W. Beranek, and D. N. Harres, "Gigabit Fiber Optic Transceiver Technology Evolution for Avionics," *IEEE Conf. Avion. Fiber-*

*Optics Photonics*, 2006., vol. 1, pp. 50–51, 2006.

- [58] A. L. M. Muniz, R. M. Borges, Regivan N. Da Silva, D. F. Noque, and Arismar Cerqueira S., "Ultra-broadband Photonics-Based RF Front-End Toward 5G Networks," *Journal of Optical Communication and Networking* vol. 8(11), pp. 35-42 (2016).
- [59] A. Cerqueira S, J. M. C. Boggio, a a Rieznik, H. E. Hernandez-Figueroa, H. L. Fragnito, and J. C. Knight, "Highly efficient generation of broadband cascaded four-wave mixing products.," *Optics Express*, vol. 16, no. 4, pp. 2816–2828, 2008.
- [60] X. Xu, Y. Yao, X. Zhao, and D. Chen, "Multiple four-wave-mixing processes and their application to multiwavelength erbium-doped fiber lasers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 14, pp. 2876–2885, 2009.
- [61] G. Bosco, V. Curri, A. Carena, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "On the performance of nyquist-WDM terabit superchannels based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM subcarriers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 53–61, 2011.
- [62] X. Yi, Y. Li, J. Wu, K. Xu, and J. Lin, "Impact of nonlinear signal-noise interactions on symbol-aligned and -interleaved formats in dispersion managed coherent PM-QPSK systems," *Optics Express*, vol. 20, no. 15, p. 17183, 2012.
- [63] M. H. Shoreh, "Compensation of Nonlinearity Impairments in Coherent Optical OFDM Systems Using Multiple Optical Phase Conjugate Modules," *Journal of Optical Communication and Networking*, vol. 6, no. 6, p. 549, 2014.
- [64] S. Dimitrov, S. Member, and H. Haas, "Information Rate of OFDM-Based Optical Wireless Communication Systems With Nonlinear Distortion," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 918–929, 2013.
- [65] C. Xie, "WDM coherent PDM-QPSK systems with and without inline optical dispersion compensation.," *Optics Express*, vol. 17, no. 6, pp. 4815–23, 2009.

- [66] W. Z. Li and J. P. Yao, "Microwave Generation Based on Optical Domain Microwave Frequency Octupling," *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 22, no. 1, pp. 24–26, 2010.
- [67] T. Berceci and P. R. Herczfeld, "Microwave Photonics - A Historical Perspective," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique*, vol. 58, no. 11, pp. 2992–3000, 2010.
- [68] J. Yao, "A Tutorial on Microwave Photonics," *Photonics Society Newsletter*, vol. 24, no. April, pp. 4–12, 2012.
- [69] C. C. Wei, C. T. Lin, M. I. Chao, and W. J. Jiang, "Adaptively modulated OFDM RoF signals at 60 GHz over long-reach 100-km transmission systems employing phase noise suppression," *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 24, no. 1, pp. 49–51, 2012.
- [70] William Shieh, "OFDM for Flexible High-Speed Optical Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, 1560-1577 (2011)
- [71] L. Dai, C. Zhang, Z. Xu, and Z. Wang, "Spectrum-efficient coherent optical OFDM for transport networks," *IEEE Journal of Selected Areas of Communication*, vol. 31, no. 1, pp. 62–74, 2013.
- [72] Y. Zhang and I. B. Djordjevic, "Adaptive coded-modulation for the next-generation intelligent optical transport networks," *International Conference on Transparent Optical Networks*, no. 1, pp. 4–8, 2013.
- [73] N. Nabavi, S. Abdul-Majid and T. J. Hall, "Symmetric dual polarization diverse digital optical coherent receiver," *2015 Photonics North*, Ottawa, ON, 2015, pp. 1-1.
- [74] J. A. Nanzer *et al.* "Millimeter-Wave Photonics for Communications and Phased Arrays Millimeter-Wave Photonics for Communications and Phased Arrays," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 34, no. 4, pp. 159–174, 2016.
- [75] L. Chen, S. Wen, Y. Li, J. He, H. Wen, Y. Shao, Z. Dong, and Y. Pi, "Optical front-ends to generate optical millimeter-wave signal in radio-over-fiber systems with different architectures," *Journal of Lightwave Technology*, vol.

- 25, no. 11, pp. 3381–3387, 2007.
- [76] CTIA: Everything Wireless, "The Next Generation of Wireless: 5G Leadership in the U.S.," *White paper*, 2016.
- [77] F. Scotti et al., "In-Field Experiments of the First Photonics-Based Software-Defined Coherent Radar," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 20, pp. 3365-3372, Oct.15, 15 2014.
- [78] J. Morosi, J. Hoxha, P. Martelli, P. Parolari, G. Cincotti, S. Shimizu, N. Wada, and P. Boffi, "25 Gbit/s per User Coherent All-Optical OFDM for Tbit/s-Capable PONs," *Journal of Optical Communication and Networking*, vol. 8(4), p. 190, 2016.
- [79] M. Chen, J. He, J. Tang, X. Wu, and L. Chen, "Real-time 10.4-Gb/s single-band optical 256/64/16QAM receiver for OFDM-PON," *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 26, no. 20, pp. 2012–2015, 2014.
- [80] A. de la Fuente, R. P. Leal and A. G. Armada, "New Technologies and Trends for Next Generation Mobile Broadcasting Services," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 11, pp. 217-223, Nov. 2016.
- [81] J. Chou, J. Conway, G. Seffler, G. Valley, and B. Jalali, "150 GS/s real-time oscilloscope using a photonic front end," *IEEE International Topics Meeting on Microwave Photonics*, vol. 1, pp. 35–38, 2008.
- [82] S. Jin, L. Xu, Y. Li, and P. Herczfeld, "A photonic RF front-end with optically distributed LO and ACP-OPLL," *2013 IEEE International Topics Meeting on Microwave Photonics*, vol. 3, pp. 233–236, 2013.
- [83] J. Wang, M. Chen, Y. Liang, H. Chen, S. Yang, and S. Xie, "Broadband RF front-end using microwave photonics filter," *Optics Express*, vol. 23, no. 2, p. 839, 2015.
- [84] M. N. Sakib, M. S. Hai, and O. Liboiron-Ladouceur, "A silicon photonic integrated packaged coherent receiver front-end for soft-decision decoding," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 24, pp. 4151–4156, 2014.

- [85] A. B. Matsko, V. S. Ilchenko, P. Koonath, J. Byrd, A. A. Savchenkov, D. Seidel, and L. Maleki, "RF photonic receiver front-end based on crystalline whispering gallery mode resonators," *IEEE Radar Conference*, 2009.
- [86] S. Pan and J. Yao, "Optical Clock Recovery Using a Polarization-Modulator-Based Frequency-Doubling Optoelectronic Oscillator," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 16, pp. 3531-3539, Aug.15, 2009.
- [87] J. Mora, B. Ortega, A. Díez, J. L. Cruz, M. V. Andrés, J. Capmany, and D. Pastor, "Photonic microwave tunable single-bandpass filter based on a mach-zehnder interferometer," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 7, pp. 2500–2509, 2006.
- [88] E. J. Norberg, R. S. Guzzon, J. S. Parker, L. A. Johansson, and L. A. Coldren, "Programmable photonic microwave filters monolithically integrated in InP-InGaAsP," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 11, pp. 1611–1619, 2011.
- [89] F. Laghezza, F. Scotti, P. Ghelfi, and A. Bogoni, "Photonics-assisted multiband RF transceiver for wireless communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 16, pp. 2896–2904, 2014.
- [90] R. B. Waterhouse and D. Novak, "Broadband antennas and efficient electro-optic interfaces for fiber-radio applications," *2009 Conference on Optical Fiber Communication*, vol. 1, pp. 4–6, 2009.
- [91] T. Feng and L. Ruan, "Design of a Survivable Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 5, pp. 458-464, May 2011.
- [92] S. Sarkar, S. Dixit, and B. Mukherjee, "Hybrid wireless-optical broadband-access network (WOBAN): A review of relevant challenges," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 11, pp. 3329–3340, 2007.
- [93] L. Maleki, J. Byrd, A. A. Savchenkov, W. Liang, V. S. Ilchenko, D. Seidel, and A. B. Matsko, "On the development of photonic rf oscillators and resonant electro-optic modulators for advanced RF front-end applications," *IEEE MTT-*

*S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1–4, 2011.

- [94] J. Chou, J. A. Conway, G. A. Seidler, G. C. Valley, and B. Jalali, "Photonic bandwidth compression front end for digital oscilloscopes," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 22, pp. 5073–5077, 2009.
- [95] S. A. Pappert and B. Krantz, "RF Photonics for Radar Front-Ends," *IEEE Radar Conference*, Boston, MA, 2007, pp. 965-970.
- [96] C. T. Lin et al., "Optical Millimeter-Wave Up-Conversion Employing Frequency Quadrupling Without Optical Filtering," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 8, pp. 2084-2092, Aug. 2009.
- [97] Nael A. Al-Shareef, "A Cost-Effective Method For High-Quality 60 GHz Optical Millimeterwave Signal Generation Based On Frequency Quadrupling," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 137, 255–274, 2013.
- [98] S. Yu, W. Gu, A. Yang, T. Jiang, and C. Wang, "A frequency quadrupling optical MM-wave generation for hybrid fiber-wireless systems," *IEEE Journal of Selected Areas Communications*, vol. 31, no. 12, pp. 797–803, 2013.
- [99] N. Cañas-Estrada, C. S. Arismar, D. F. Noque, R. M. Borges, N. G. Gonzalez and J. C. R. F. Oliveira, "Development and performance analysis of a photonic-assisted RF amplifier," *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International*, Porto de Galinhas, 2015, pp. 1-5.
- [100] N. G. Gonzalez and A. C. S. Jr, "Performance Analysis of a Novel Photonically Amplified 10Gbit / s Radio over Fiber System," *IEEE Latin-America Conference Communication*, pp. 4–7.
- [101] D. F. Noque, A. L. M. Muniz, R. M. Borges, and A. C. S. Jr, "Análise de Desempenho Experimental de um Amplificador de RF Baseado em Tecnologia Fotônica," *MOMAG*, 2016, Porto Alegre. Proceedings do MOMAG 2016.
- [102] A. L. M. Muniz, D. F. Noque, R. M. Borges, T. N. Rodovalho, R. N. Da Silva,

R. A. Santos, and A. Cerqueira, “Rede Opto - Wireless Amplificada baseada em Tecnologia Fotônica,” *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, 2016, Santarém. Proceedings do SBrT 2016.