

Redes Celulares 5G e Desenvolvimento Nacional

Arismar Cerqueira S. Jr

Lab. WOCA (*Wireless and Optical Convergent Access*), Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí-MG, Brasil. E-mail: arismar@inatel.br

Resumo — Este artigo relata diversas atividades de pesquisa realizadas no Inatel concernentes às futuras redes celulares de quinta geração (5G). O trabalho baseia-se fundamentalmente em três vertentes: antenas e arranjos de antenas para 5G; dispositivos de RF baseados em tecnologias fotônicas para 5G; redes 5G óptico-wireless utilizando o transceptor nacional baseado em GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*). Em todos os casos, buscou-se atender bandas potenciais para 5G, desde micro-ondas até a faixa de ondas milimétricas (30 a 300 GHz). Dentre outros, destacam-se arranjos de antenas baseados em guias de onda fendido reconfiguráveis, amplificadores de RF baseados em fotônica com largura de faixa de 50 GHz e redes óptico-wireless multibanda com vazão de 2 Gb/s na banda de 26 GHz.

Palavras-chave — 5G; antenas; celular; fotônica de micro-ondas; rádio sobre fibra.

I. INTRODUÇÃO

A primeira geração de redes móveis, também conhecida como 1G, viabilizou a comunicação sem fio na faixa de UHF (*Ultra High Frequency*), principalmente na região de 800 MHz, tendo como principal objetivo a transmissão/recepção analógica do sinal de voz. A segunda geração (2G) foi marcada pela revolução digital, resultando na popularização das redes celulares, no aumento significativo da duração da bateria e no início da comunicação de dados utilizando o serviço de mensagens curtas ou SMS (*Short Message Service*). Desta maneira, além dos usuários passarem a trocar informações de textos, iniciaram-se as autorizações de pagamento utilizando redes sem fio e o uso da Internet pelo celular, por meio do Serviço de Rádio de Pacote Geral, do Inglês *General Packet Radio Service*, capaz de prover taxas de transmissão da ordem de dezenas de Kb/s. A partir do 3G (terceira geração), os sistemas celulares se massificaram, com a média de um aparelho por habitante, e dezenas de milhões de pessoas passaram a navegar na Internet utilizando os *smartphones*, tanto para trabalho, quanto para lazer. O principal marco da quarta geração (4G) foi o aumento significativo da vazão da rede, a qual passou a ser tipicamente de alguns Mb/s, alcançando dezenas de Mb/s em condições específicas. Em síntese, a evolução das quatro primeiras gerações fundamentou-se em aumentos na taxa de transmissão da rede.

As redes celulares de quinta geração (5G) [1-3] vão além do aumento da vazão, pois visam também reduzir significativamente a latência de comunicação, assim como aumentar o alcance, a capilaridade e o número de usuários da rede. Nesse contexto, destacam-se quatro cenários principais [1]: comunicações da ordem de Gb/s (*enhanced mobile*

broadband - eMBB); comunicações massivas entre máquinas (*massive machine-type communications - mMTC*); comunicações ultra-confiáveis e de baixíssima latência (*ultra-reliable low latency communications - URLL*); redes de acesso de longo alcance, incluindo aplicações rurais. Particularmente para as áreas rurais e/ou remotas, o Setor de Normatização das Telecomunicações (ITU-T ou *Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunications Union*) autorizou a utilização de dispositivos móveis de redes 4G na banda de 5 GHz, anteriormente utilizada exclusivamente por dispositivos WiFi e *Bluetooth*. Portanto, a migração para o acesso móvel mais rápido, 5G, poderá ter impacto em comunidades rurais e em regiões do Brasil pouco povoadas. Muitas destas localidades atualmente não têm acesso à Internet ou usam conexões muito lentas via satélite ou *links* de rádio de baixa capacidade.

As redes 5G baseiam-se em diferentes premissas [2], as quais tornam-a uma geração disruptiva. Os desafios técnicos estarão presentes em todas as subáreas de telecomunicações, incluindo formatos de modulação avançados, número de usuários, equipamentos, antenas e componentes de radiofrequência (RF), topologia e convergência de rede. O 5G irá revolucionar a sociedade de maneira sem precedentes, principalmente devido à popularização da Internet das Coisas (IoT) e vazões de até 10 Gb/s, as quais irão impactar diretamente nos hábitos das pessoas e no “dia a dia” da sociedade. A conceituada revista Forbes considera as redes 5G uma revolução da industrial móvel, e as previsões da associação 5G PPP (*5G Infrastructure Public Private Partnership*) apontam que teremos mais de 7 bilhões de pessoas e mais 7 trilhões de coisas conectadas à Internet na década de 2020, prevista para o início da comercialização dos serviços.

A taxa de transmissão e a capacidade de uma rede de telecomunicações estão diretamente relacionadas à frequência da portadora a ser modulada. Especificamente para os sistemas sem fio, o aumento na frequência da portadora acarreta em uma expansão de capacidade da rede. Entretanto, tal aumento culmina em desafios técnicos para a geração, transmissão, propagação e recepção do sinal de RF. Tais desafios serão ainda maiores para os sistemas celulares 5G, visto que os mesmos têm sido concebidos para frequências de até dezenas de GHz e na faixa de ondas milimétricas [3]. Técnicas de fotônica de micro-ondas (*microwave photonics*) [4] têm se mostrado potenciais para a geração, a detecção, o processamento e a distribuição de sinais de RF de altas frequências no domínio óptico, por meio da integração eficiente de tecnologias de radiofrequência e optoeletrônica. Sobretudo, o uso de tecnologias fotônicas

permite superar as limitações inerentes aos componentes ativos de RF. Por outro lado, o uso de antenas reconfiguráveis e de múltiplas antenas (MIMO ou *multiple-input multiple-output*) têm se mostrado eficaz para maximizar o desempenho das redes sem fio, tanto em termos de eficiência espectral, quanto de cobertura.

Ao contrário das gerações anteriores, o Brasil tem contribuído com o desenvolvido e a padronização das redes 5G, principalmente no âmbito do Projeto Centro de Referência de Radiocomunicações-CRR (www.inatel.br/crr), iniciado em 2015, com duração de aproximadamente quatro anos e financiamento da Finep/Funntel. O Grupo de Pesquisa do Laboratório WOCA- *Wireless and Optical Convergent Access* (www.inatel.br/woca) do Inatel tem proposto e implementado diversas inovações em redes 5G nas áreas de antenas [5-15] e fotônica de micro-ondas, seja em dispositivos de RF baseados em fotônica [16-24], quanto em redes óptico-wireless [25-28]. O presente artigo visa a apresentação dos principais avanços tecnológicos para as futuras redes 5G nestas áreas. O documento está estruturado em cinco sessões, sendo as três intermediárias voltadas para a apresentação dos resultados de pesquisa e a última sobre as conclusões dos trabalhos desenvolvidos.

II. ANTENAS E ARRANJOS DE ANTENAS PARA 5G

As redes 5G irão operar em pelo menos duas faixas de frequência, sendo uma delas em UHF, a qual está bastante congestionada atualmente, e outra em ondas milimétricas. Alguns grupos de pesquisa e empresas, incluindo a Qualcomm, defendem que teremos três bandas: uma banda abaixo de 1,0 GHz para aplicações mMTC e URLL, incluindo IoT; outra entre 1,0 e 6,0 GHz para comunicações em alta taxa; uma última em *mm-waves* para *eMBB*. Dada à enorme diferença de frequência entre as bandas propostas, torna-se necessário o desenvolvimento de diferentes antenas com diversas tecnologias de fabricação. Os Pesquisadores do Lab. WOCA desenvolveram várias antenas e arranjos de antenas impressos e baseados em guias de onda (*slotted-waveguide antenna arrays* ou SWAAs) para redes 5G nos últimos cinco anos, conforme resumido na Fig. 1. Os projetos e as análises numéricas foram realizados utilizando o software HFSS. Utilizaram-se processos de fresagem e usinagem para a fabricação das antenas impressas e baseadas em guias de onda, respectivamente. Por fim, as caracterizações foram realizadas na câmara anecoica do Inatel.

O arranjo de antenas em guia de onda fendido *SWAA Twisted*, (Fig.1a) [9] consiste em um arranjo de antenas omnidirecional de alto ganho (aproximadamente 12 dBi) e largura de faixa de 1,63 GHz centrada em 26,245 GHz. Esta ampla banda de operação é proveniente do uso de fendas trapezoidais [29], as quais foram objeto de uma patente de invenção. A técnica baseia-se na mudança gradativa da impedância de radiação da fenda, mediante o incremento gradual do comprimento da fenda na direção perpendicular ao plano da mesma, assim como exemplificado na Fig. 2 para um SWAA baseado em guia de onda retangular. A mudança

do comprimento elétrico corresponde ao aumento gradual do comprimento da fenda entre as faces interna e externa da parede do guia de onda. O detalhe da Fig. 2 representa uma vista em corte longitudinal do guia de onda com a técnica aplicada. A variável " $l_{fenda-ret-int}$ " é o comprimento da abertura na superfície interna da parede do guia de onda, e " $l_{fenda-ret-ext}$ " é o comprimento da abertura na superfície externa dessa parede.

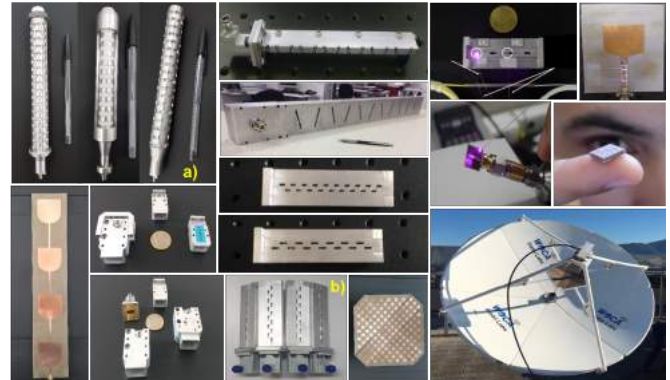


Fig.1. Exemplo de antenas e arranjos de antenas impressos baseados em guias de onda para redes 5G.

A eficiência do uso da técnica de fendas trapezoidais em arranjo de antenas é demonstrada na Fig. 3, a qual apresenta as curvas de resposta em frequência (coeficiente de reflexão ou S_{11}) para diversas configurações de fendas, nas quais o comprimento da abertura na face interna ($l_{fenda-ret-int}$) é mantido em 5,7mm e varia-se o comprimento da abertura na face externa ($l_{fenda-ret-ext}$) entre 5,7 mm e 7,3 mm. É notório o aumento de 50% na banda de operação, considerando a faixa espectral com $S_{11} < -10$ dB, resultando em uma banda de 6,0 GHz de 20,3 a 26,3 GHz, por meio do uso da técnica patenteada.

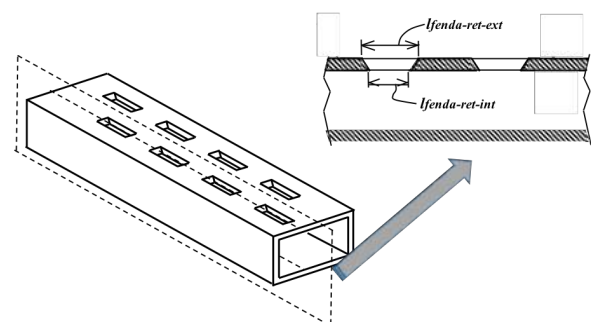


Fig.2. SWAA retangular baseado em fendas trapezoidais [29].

O método das fendas trapezoidais pode ser aplicado em guias de onda de seção retangular, circular (*SWAA Twisted*) ou elíptica, com paredes lisas ou corrugadas. No caso de antenas formadas por fendas na camada condutora de substratos isolantes e dotadas de blindagem eletromagnética em forma de caixa metálica, a mudança é provida por meio de chanfros. Desta maneira, cria-se uma abertura divergente na direção longitudinal da fenda, entre as superfícies da película condutora e da blindagem.

A Fig. 4 relata a implementação e os resultados experimentais da análise de desempenho do arranjo de antenas em guia fendido *SWAA Twisted* na frequência de 24,15 GHz, parte da faixa de 24 a 27 GHz considerada potencial para as redes 5G no Brasil. Utilizou-se um gerador de sinais arbitrários *Keysight AWG M8190A* para gerar um sinal 16-QAM em banda base com taxa de 160 Mb/s e fator de *roll-off* igual a 0,15, resultando em uma ocupação de banda de 46 MHz. O sinal é convertido para RF em 24,15 GHz (*upconversion*) pelo gerador de sinais vetoriais *Keysight PSG E8267D* com potência de transmissão de 15 dBm; em seguida, radiado pelo *SWAA Twisted*, instalado a 2,20 m de altura. Na recepção, espaçada de D metros, uma corneta com 25 dBi de ganho, instalada a 1,40 m de altura, captura o sinal de RF, que em seguida, passa por um estágio de amplificação de 35 dB. Um analisador de sinais digitais *DSA Z632A* recebe o sinal proveniente do amplificador de baixo ruído (LNA) e extrai os valores das métricas de desempenho do sistema digital, tais como: constelação, diagrama de olho, banda espectral, relação sinal-ruído (SNR) e magnitude vetorial de erro (EVM%).

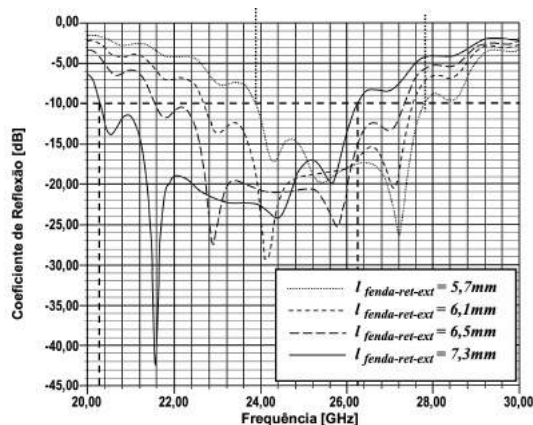


Fig.3. Demonstração do aumento de banda resultante do uso das fendas trapezoidais.

O experimento consistiu na realização de medidas em diversos pontos espacialmente distribuídos em um ambiente *indoor*, a fim de analisar a cobertura de um sinal modulado em ondas milimétricas com a utilização do *SWAA Twisted*. O ambiente escolhido foi o Laboratório WOCA no Inatel, com aproximadamente 91 m² subdividido em três salas de 14,2, 28,4 e 48,5 m². A Fig. 4c apresenta a planta baixa do laboratório, a posição do ponto de acesso (antena transmissora) e as posições onde foram obtidas as métricas de desempenho.

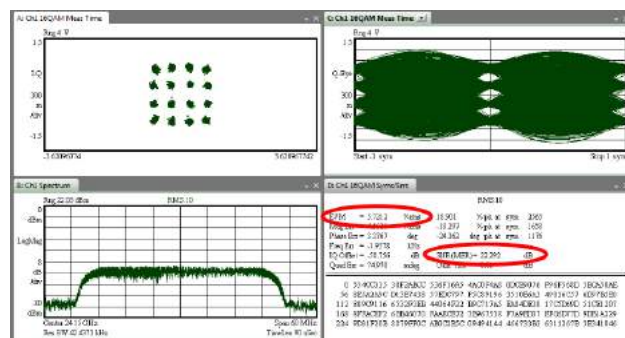
Os valores das métricas SNR e EVM% foram obtidos em cada um dos 23 pontos da Fig. 4c. A relação sinal-ruído representa a razão entre as potências do sinal de interesse e do ruído; quanto maior o valor da SNR, melhor é o desempenho do sistema. Já o parâmetro EVM% é uma figura de mérito que define a magnitude vetorial de erro; quanto maior o valor de EVM%, maior será a influência do ruído no sinal e, consequentemente, pior será o desempenho do sistema. A Fig. 4b demonstra que é possível distinguir os 16 símbolos na constelação e o diagrama de olho apresentada

aberturas adequadas em P2, culminando em EVM% = 5,72% e SNR = 22,3 dB. Já na posição P21, obteve-se o comportamento inverso no desempenho do sistema. O espectro possui baixa magnitude, o que indica uma redução na SNR, com isso não foi possível distinguir os símbolos na constelação, indicando um aumento no EVM% e nenhuma abertura no diagrama de olho. Em P21 os valores de EVM% e SNR foram de 21,7% e 9,2 dB, respectivamente.

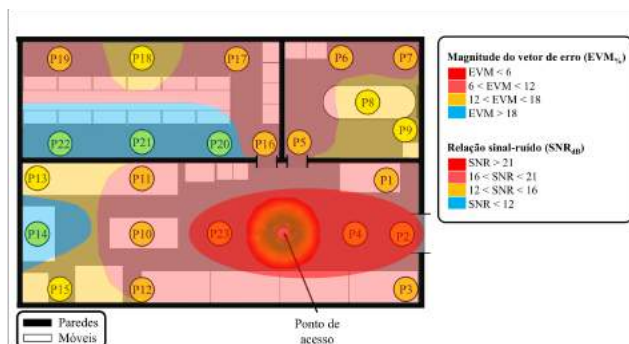
A Fig. 4c reporta o mapa de cobertura da rede sem fio em ondas milimétricas. Com base no critério de EVM% < 12% para prover sinais de alta taxa, é possível concluir que o sistema viabiliza 40% de cobertura do laboratório, sob as condições atuais de potência. A região de cobertura pode ser ampliada aumentando-se a potência de transmissão. Em outras palavras, ao aumentar a potência de transmissão, haverá um aumento direto na SNR de todo o sistema em todas as posições analisadas e, consequentemente, uma redução nos valores do parâmetro EVM%.



(a) Fotografias do experimento.



(b) Métricas de desempenho em P2.



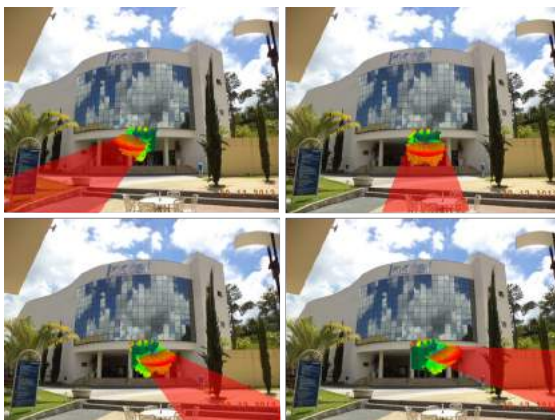
(c) Mapa de cobertura medido.

Fig.4. Implementação indoor do *SWAA Twisted* no Lab. WOCA do Inatel.

O arranjo de antenas em guia de onda fendido *SWAA_4DB* (Fig.1b) baseia-se na montagem de quatro SWAAs, compostos individualmente por dois grupos de fendas com comprimentos elétricos diferentes, tendo como finalidade prover operação ao longo de pelo menos duas bandas de operação. Esta técnica inovadora para desenvolvimento de antenas com múltiplas bandas foi objeto da patente de inovação "Antena com Múltiplas Bandas de Operação", registrada no INPI em dezembro de 2015 [30]. Cada elemento do *SWAA_4DB* usa dois grupos de fendas usinados nas faces maiores e opostas de um guia de onda WR28, que opera de 26,5 GHz a 40 GHz, com o intuito de permitir operação simultânea nas faixas de 28 GHz e 38 GHz [14]. A Fig. 5 apresenta a implementação do arranjo *SWAA_4DB* para cobertura *indoor* e *outdoor* simultânea e com capacidade de guiamento do feixe de radiação nas bandas de 28 e 38 GHz. Nota-se que é possível reconfigurar o diagrama de radiação em função do ambiente rádio móvel e da posição dos usuários da rede sem fio, por meio do uso de diferentes elementos do *SWAA_4DB*. Novas soluções tecnológicas usando sistemas com faixa de operação dupla estão sendo utilizadas para aplicações, que vão desde enlaces de dados com altas taxas de transmissão [6,27], até radares de segurança [15]. Em ambas aplicações, os pré-requisitos incluem sistemas reconfiguráveis para utilizar os conceitos de rádio cognitivo e multifuncionalidade, os quais remetem a radares com funcionalidades conjuntas de detecção e comunicação.



(a) Indoor em 28 GHz



(b) Outdoor em 38 GHz

Fig.5. Implementação do *SWAA_DB* indoor e outdoor simultânea.

III. DISPOSITIVOS DE RF BASEADOS EM FOTÔNICA

A área de pesquisa conhecida como fotônica de micro-ondas representa a integração de tecnologias fotônicas e de micro-ondas em uma plataforma única [4]. Particularmente, tecnologias fotônicas têm sido eficientemente aplicadas a dispositivos de RF, com o objetivo de realizar funções altamente complexas ou até mesmo impraticáveis quando comparadas à eletrônica convencional. Tal dificuldade se deve à complexidade e ao custo das soluções puramente eletrônicas, os quais crescem significativamente com o aumento da frequência de operação [4]. Visto que as redes 5G irão operar em múltiplas bandas, incluindo a faixa de ondas milimétricas, a fotônica de micro-ondas poderá ser eficiente aplicada, não somente para a transmissão e distribuição dos sinais 5G, mas também para a geração, o processamento e a detecção dos mesmos no domínio óptico. Neste contexto, diversos componentes de RF baseados em fotônica têm sido propostos e desenvolvidos no Lab. WOCA do Inatel nos últimos anos:

- PBRC (*Photonics-based RF Converter*) [21-23], que é um conversor de RF reconfigurável ultra banda larga baseado em multiplicação de frequência no domínio óptico.
- PBPS (*Photonics-based Phase Shifter*) [31], que é um defasador de RF banda larga contínuo e reconfigurável baseado no controle da polarização de um modulador eletro-óptico.
- PBRA (*Photonics-based RF Amplifier*) [16,17,24], que é um amplificador de RF ultra banda larga baseado no efeito não-linear óptico *four-wave mixing* (FWM).
- PBRF (*Photonics-based RF Front-end*) [20], que é um *front-end* de RF ultra banda larga baseado em tecnologias fotônicas.

Os detalhes da concepção, do projeto e dos testes do PBRC, do PBPS e do PBRF podem ser obtidos nas referências acima. O enfoque deste artigo será no PBRA, objeto da patente "Sistema, Amplificador e Método de Amplificação em Faixa Larga de Sinais de Radiofrequência Baseados em Tecnologia Fotônica", que foi depositada no INPI no final de 2016 [32].

O projeto e a fabricação de amplificadores de RF são tipicamente realizados com componentes e circuitos eletrônicos para prover ganho de potência a sinais de RF em redes sem fio. O processo de amplificação se dá no domínio elétrico, de modo que o sinal de entrada no dispositivo seja amplificado até alcançar o valor de potência desejado para transmissão e/ou recepção. É comum o uso de diversos estágios de amplificação para atingir o pré-requisito de ganho. Porém, tais amplificadores operam tipicamente em faixas estreitas e bem definidas do espectro eletromagnético devido às limitações da resposta em frequência dos componentes eletrônicos, com isso faz-se necessário *hardwares* distintos para aplicações distintas.

O PBRA baseia-se em uma técnica capaz de proporcionar ganho de potência no domínio de RF utilizando processamento no domínio óptico ao longo de uma ampla faixa de frequências, desde a faixa de dezenas de kHz a dezenas de GHz [16,17,24,32]. Mais especificamente, o nosso amplificador de RF baseado em fotônica provê ganho a partir do efeito não-linear óptico *four-wave mixing* para aplicações em sistemas de rádio sobre fibra (RoF – *Radio over Fiber*). A Fig. 6 apresenta uma comparação entre os esquemáticos do sistema RoF convencional (CRoF) e do PBRA. O sistema CRoF transmite o sinal de RF em uma portadora óptica ao longo de um enlace óptico utilizando um laser e um modulador eletro-óptico. No site de recepção, tem-se um fotodetector para a conversão óptico-elétrica. O sinal óptico passa por um estágio de amplificação constituído por um amplificador de fibra dopada a érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*), antes de ser transmitido pela fibra. Por outro lado, o PBRA baseia-se em duas portadoras ópticas, provenientes dos lasers de bombeamento contínuos (LD₁ e LD₂), as quais passam por dois controladores de polarização (PC–*Polarization Controller*) e são acopladas utilizando um acoplador óptico para alimentar um modulador eletro-óptico (MZM–*Mach-Zehnder modulator*), o qual é excitado por um gerador de sinais de RF. Posteriormente, os sinais de bombeamento são amplificados pelo EDFA e lançados a uma fibra altamente não-linear (HNLF–*Highly Nonlinear Fiber*). Por fim, um filtro óptico passa-faixas sintonizável (OTPF–*Optical Tunable Passband Filter*) é utilizado para seleccionar a portadora óptica, gerada no processo de FWM, que será fotodetectada e utilizada para prover o ganho de RF.

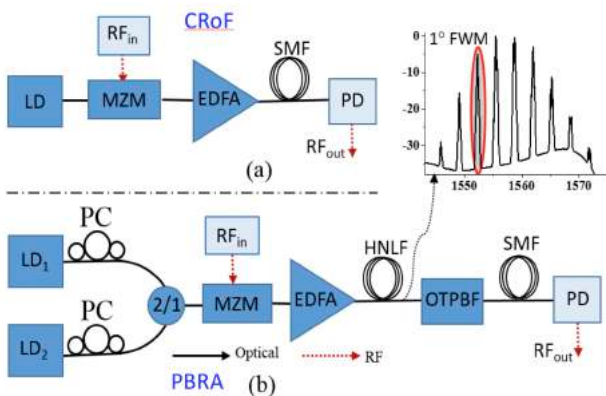


Fig.6. Esquemáticos: (a) Sistema RoF convencional (CRoF); (b) PBRA.

O ganho de RF é definido pela diferença entre a potência elétrica obtida após a fotodetecção do produto de FWM e a potência obtida do sistema CRoF. Essa medida comparativa é realizada para o mesmo nível de potência óptica na entrada do fotodetector. A Fig. 7 mostra uma comparação entre os espectros elétricos do CRoF e do PBRA, perfazendo um ganho de 24 e 23,6 dB para as frequências de 6,0 e 38 GHz, respectivamente. Tal ganho depende fortemente da eficiência do FWM (espaçamento entre as ondas de bombeamento, estado de polarização dos lasers, linearidade da fibra, etc.), da tensão de polarização do modulador (V_{bias}) e do processo

de fotodetecção. Vale ainda ressaltar que o ganho de RF depende também da ordem do produto de FWM a ser analisado, visto que é aumentado gradativamente com os produtos de FWM [24].

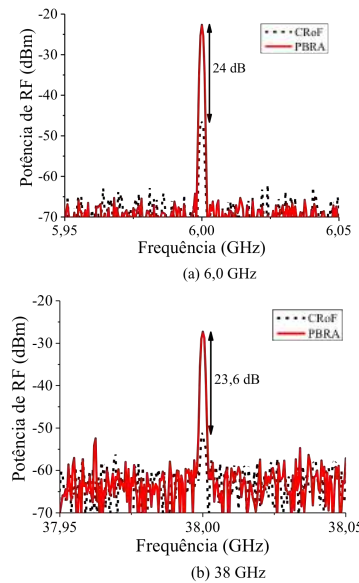


Fig.7. Ganho de RF do PBRA medido para 6,0 GHz e 38 GHz.

A Fig. 8 reporta uma comparação experimental do ganho de algumas versões do PBRA com amplificadores de RF comerciais puramente eletrônicos e um outro amplificador de RF baseado em fotônica [33]. O sistema proposto apresenta banda de amplificação linear e constante para uma ampla faixa de frequência de 50 GHz, limitada pela resposta em frequência dos dispositivos opto-elétricos utilizados na caracterização do PBRA. A banda de operação pode ser expandida até 100 GHz, por meio do uso de dispositivos opto-elétricos disponíveis no mercado. O outro amplificador de RF baseado em fotônica encontrado na literatura [33] se mostrou inferior ao PBRA em termos de ganho e banda de operação, assim como os amplificadores de RF puramente eletrônicos comerciais, tornando-o potencial para o mercado e para amplificação simultânea de todas as bandas do 5G, assim como das bandas das redes 2G, 3G e 4G.

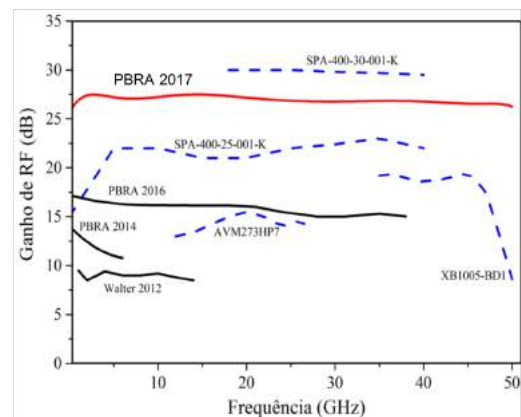


Fig.8. Comparação do ganho do PBRA com amplificadores de RF puramente eletrônicos comerciais.

IV. REDES 5G ÓPTICO-WIRELESS

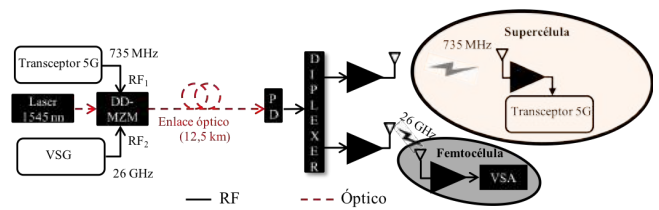
A tecnologia RoF representa uma solução chave para melhorar a cobertura 5G, por meio do aproveitamento da capilaridade da fibra para distribuição dos múltiplos sinais de RF da rede celular. Esta seção apresenta a integração e a análise de desempenho de um transceptor 5G nacional baseado na forma de onda GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*), o qual foi desenvolvido no Inatel no âmbito do Projeto CRR-Centro de Referência em Radiocomunicação (<https://www.inatel.br/crr/>). A multiplexação GFDM é reconhecida como uma solução atrativa em termos de flexibilidade e emissão fora da faixa (OOB) [34,35]. Em resumo, o GFDM é uma forma de onda não-ortogonal, que utiliza subportadoras e transmite símbolos mapeados em amplitude em quadratura (*Quadrature amplitude modulation - QAM*).

O transceptor GFDM (Fig. 9a) foi integrado a um sistema RoF de acordo com o esquemático apresentado na Fig. 9b, o qual pode atuar como *backhaul* ou *fronthaul* das futuras redes 5G [25]. O modulador MZM de duplo estágio (*dual-drive*) foi excitado conjuntamente pelo sinal GFDM em 735 MHz e por um sinal vetorial em 26 GHz com vazão de 2 Gb/s. O sinal GFDM foi mapeado digitalmente em 256-QAM em modo de operação contínuo, código polar para correção de erros, e taxa de codificação de 5/6. A tensão V_{bias} foi ajustada para operação no ponto de quadratura, evitando distorções nos sinais de RF. Os dois sinais 5G em banda passante modulam uma portadora óptica em 1545 nm e o campo elétrico resultante na saída do MZM é transmitido ao longo de um enlace óptico com dezenas de quilômetros de fibra óptica monomodo.

No estágio de recepção, um fotodetector (PD-*photodetector*) realiza a conversão óptico-elétrica, por meio do batimento entre portadora e bandas laterais provenientes da modulação óptica, resultando na recuperação dos sinais em 735 MHz (supercélula) e 26 GHz (femtocélula mostrada na Fig. 9c). Amplificadores de RF foram utilizados para compensar as perdas de potência impostas pelas conversões E/O (eletro-óptico) e O/E (óptico-elétrico), antes da irradiação pelas antenas. Por fim, os sinais 5G são analisados por outro transceptor GFDM e por um analisador vetorial de sinais (VSA-*Vector Signal Analyzer*).



a) Transceptor 5G nacional baseado em GFDM



b) Esquemático do experimento



c) Fotografia da femtocélula em 26 GHz.

Fig. 9. Integração do transceptor GFDM em redes 5G óptico-wireless.

A investigação de desempenho experimental baseou-se nas seguintes métricas: SNR para cada antena do sistema MIMO 2x2; EVM; constelação; MER (*Modulation Error Ratio*); vazão. A Fig. 10 relata a constelação medida do sinal GFDM 256-QAM, recebido em um Escola Pública da região rural do Sul de Minas Gerais, na qual não existe cobertura de Internet por parte das operadoras de telecomunicações. Obteve-se taxa de erro de bits (BER) nula, MER de 29,75 e vazão de 33 Mb/s para a supercélula rural.

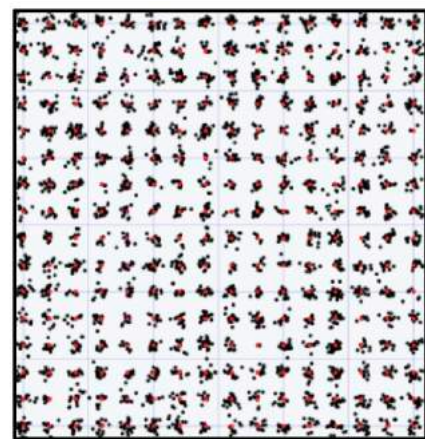


Fig.10. Constelação medida do sinal GFDM em 735 MHz.

A segunda banda de operação da rede 5G óptico-wireless foi avaliada quando transmitida simultaneamente com o sinal GFDM ao longo de um enlace óptico de 12,5 km. A Fig. 11 apresenta os resultados experimentais da femtocélula indoor

em 26 GHz com alcance de 10 m e vazão de 2 Gb/s, utilizando uma banda de 500 MHz. Os valores medido da SNR e EVM% foram 14,57 e 13,81%.

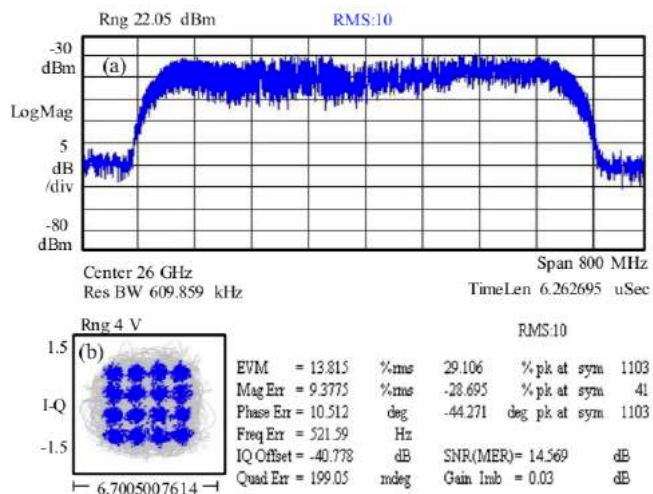


Fig.11. Resultados experimentais da femtocélula em 26 GHz com 2 Gb/s de vazão.

V. CONCLUSÕES

O trabalho descreveu as atividades de pesquisa concernentes ao desenvolvimento de antenas, arranjos de antenas e dispositivos de RF baseados em fotônica, além da implementação de redes 5G óptico-wireless no Lab. WOCA do Inatel. Relatou-se a concepção, a prototipagem e a caracterização de arranjos de antenas reconfiguráveis baseados em guias de onda fendido e um amplificador de RF ultra banda larga baseado no efeito não-linear óptico *four-wave mixing*, intitulado de PBRA. Por fim, foi apresentada a implementação de uma rede 5G óptico-wireless multibanda operando com duas topologias: supercélula de longo alcance em 735 MHz, utilizando o transceptor 5G nacional baseado em GFDM e femtocélula de curto alcance operando em 26 GHz com vazão de 2 Gb/s. A rede proposta foi avaliada experimentalmente utilizando diversas métricas de desempenho, mostrando-se potencial para as futuras redes celulares de quinta geração.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Finep/Funttel No. 01.14.0231.00, no âmbito do projeto do Centro de Referência de Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Brasil. Agradece-se também o apoio financeiro do CNPq, CAPES, MCTI e FAPEMIG e o suporte técnico da Keysight. Por fim, o autor agradece ao Prof. Luciano Leonel, ao Tiago Reis e demais colegas do CRR pelo apoio técnico com o transceptor GFDM e aos membros formados e atuais Pesquisadores do WOCA pela realização das atividades de pesquisa relatadas neste trabalho; em especial ao Ramon Maia, Igor Feliciano, Matheus Borsato, Hugo Filgueiras e Dionísio Fama pela realização da maioria dos experimentos descritos neste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26-35, May 2014.
- [2] L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, and R. Tafazolli, "Multi-Service System: An Enabler of Flexible 5G Air Interface," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 10, pp. 152-159, Oct. 2017.
- [3] 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 Netw.*, vol. 21, no. 8, pp. 2657-2676, Nov. 2015.
- [4] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 319-330, Jun. 2007.
- [5] Arismar Cerqueira Sodré Jr., Igor Feliciano da Costa, Renan Alves dos Santos, Hugo Rodrigues Dias Filgueiras, and Danilo Henrique Spadoti, "Waveguide-Based Antenna Arrays for 5G Networks," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, Article ID 5472045, 10 pages, 2018.
- [6] I. da Costa; A. Cerqueira Sodre Junior; D. Spadoti; L. G. da Silva; J. A. Ribeiro; S. Barbin, "Optically Controlled Reconfigurable Antenna Array for mm-wave Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. PP, no.99, pp.1-1,2017.
- [7] L. G. Silva, A. A. C. Alves, and Arismar Cerqueira Sodré, Jr., "Optically Controlled Reconfigurable Filtenna," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2016, Article ID 7161070, 9 pages, 2016.
- [8] Arismar Cerqueira Sodré Junior, Igor Feliciano da Costa, Leandro Tiago Manera, and José Alexandre Diniz, "Optically Controlled Reconfigurable Antenna Array Based on E-Shaped Elements," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, Article ID 750208, 8 pages, 2014.
- [9] H. R. D. Filgueiras, I. F. da Costa, Arismar Cerqueira S. Jr., J. R. Kelly and Pei Xiao, "A Novel Approach for Designing Omnidirectional Slotted-Waveguide Antenna Arrays" *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Proceedings of ICEAA and AWPC*, 2018.
- [10] R. A. Santos, R. A. Penchel, M. M. Bontempo and S. Arismar Cerqueira, "Reconfigurable printed antenna arrays for mm-wave applications," *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, 2016, pp. 1-5.
- [11] 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.
- [12] da Silva, L. G., da Costa, I. F. and Cerqueira Sodré, A. (2014), Multiphysics design methodology for photonic-based phased array antennas. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 56: 838-843.
- [13] I. F. da Costa, D. H. Spadoti and A. Cerqueira S., "Frequency-agile E-shaped printed antenna for millimeter waves applications," *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver, BC, 2015, pp. 2273-2274.
- [14] I. F. da Costa, A. C. Sodré, L.G. Silva, D. H. Spadoti, A. Bogoni, "Tri-band Slotted Waveguide Antenna Array for Millimetric-waves Applications," in *Proc. 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Apr. 2014, pp. 2052-2054.
- [15] Arismar Cerqueira S. Jr., I. F. da Costa, S. Pinna, S. Melo, F. Laghezza, F. Scotti, P. Ghelfi, D. H. Spadoti and A. Bogoni, "A novel dual-polarization and dual-band slotted waveguide antenna array for dual-use radars," *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, 2016, pp. 1-4.
- [16] D.F. Noque, R.M. Borges, A.L.M. Muniz, A. Bogoni and Arismar Cerqueira S. Jr., "Thermal and dynamic range characterization of a photonics-based RF amplifier", *Optics Communications*, Volume 414, 2018, pp 191-194.
- [17] 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 millimeter-waves applications”, *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 59, p. 2185-2189, 2017.
- [18] Suzanne Melo, Salvatore Maresca, Sergio Pinna, Filippo Scotti, Milad Khosravanian, Arismar Cerqueira S. Jr., Filippo Giannetti, Abhirup das Barman and Antonella Bogoni, "Photonics-Based Dual-Band Radar for Landslides Monitoring in Presence of Multiple Scatterers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 12, pp. 2337-2343, June 15, 2018.
- [19] Filippo Scotti, Daniel Onori, Claudio Porzi, Fabio Falconi, Vito Soriano, Andreia Alves, Muhammad Imran, Sergio Pinna, Arismar Cerqueira, Marco Romagnoli, and Antonella Bogoni, "Dual use architecture for innovative lidar and free space optical communications," *Appl. Opt.*, Vol. 56, pp. 8811-8815, 2017.
- [20] A. L. M. Muniz, R. M. Borges, R. N. Da Silva, D. F. Noque and A. C. S., "Ultra-broadband photonics-based RF front-end toward 5G networks," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 11, pp. B35-B42, Nov. 2016.
- [21] Ramon Maia Borges, André Luiz Marques Muniz and Arismar Cerqueira Sodré Junior, "Development and Performance Analysis of a Photonics-Assisted RF Converter for 5G Applications", *Fiber and Integrated Optics*, 36:1-2, 25-37, 2017.
- [22] Ramon Maia Borges, Daniel Mazzer, Tiago Reis Rufino Marins, Arismar Cerqueira Sodré, "Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter," *Optical Engineering* 55(3), 031118, 2015.
- [23] R. M. Borges, T. N. Rodovalho and A. Cerqueira Sodré Junior, "Reconfigurable multi-band radio-frequency transceiver based on photonics technology for future optical wireless communications," in *IET Optoelectronics*, vol. 9, no. 5, pp. 257-262, 10, 2015.
- [24] A. Cerqueira Sodré *et al.*, "Photonic-assisted microwave amplification using four-wave mixing," in *IET Optoelectronics*, vol. 10, no. 5, pp. 163-168, 10, 2016.
- [25] R. M. Borges, T. R. R. Marins, M. S. C. Borsato, H. R. D. Filgueiras, I. F. da Costa, R. N. da Silva, L. L. Mendes and Arismar Cerqueira S. Jr., "Integration of a GFDM-based 5G Transceiver in a GPON using Radio over Fiber Technology," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Early Access, April, 2018.
- [26] E. Raimundo-Neto, J. R. G. da Rosa, M. A. F. Casaroli, I. Feliciano da Costa, A. M. Alberti, and Arismar Cerqueira Sodré, Jr., "Implementation of an Optical-Wireless Network with Spectrum Sensing and Dynamic Resource Allocation Using Optically Controlled Reconfigurable Antennas," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, Article ID 670930, 11 pages, 2014.
- [27] Igor Feliciano da Costa, Arismar Cerqueira Sodré Jr., Juan Sebastián Rodríguez Páez, Rafael Puerta, Juan José Vegas Olmos, Luis Gustavo da Silva, Danilo Henrique Spadoti and Idelfonso Tafur Monroy, "Photonics-assisted wireless link based on mm-wave reconfigurable antennas," in *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 14, pp. 2071-2076, 11 19 2017.
- [28] R. Maia Borges and A. Cerqueira Sodre Junior, "Reconfigurable Optical-Wireless Communications for Future Generations," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 11, pp. 3580-3584, Nov., 2015.
- [29] Arismar Cerqueira S. Jr., H. R. D. Filgueiras e T. H. Brandão, "Método de Aumento da(s) Banda(s) de Operação em Antenas e Arranjos de Antenas Baseados em Fendas Método de Aumento da(s) Banda(s) de Operação em Antenas e Arranjos de Antenas Baseados em Fendas", Patente: Privilégio de Inovação, Número do registro: BR10201801443, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 13/07/2018.
- [30] Arismar Cerqueira S. Jr. e I. F. da Costa, "Antena com Múltiplas Bandas de Operação", Patente: Privilégio de Inovação, Número do registro: BR1020150318308, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 17/12/2015.
- [31] M. S. B. Cunha, R. N. Da Silva, R. M. Borges and S. A. Cerqueira, "Photonics-based RF phase shifter for ultra-broadband communications," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2017, pp. 1-5.
- [32] Arismar Cerqueira S. Jr., R. M. Borges, A. L. Marques, D. F. Noque, N. Cañas-Estrada e S. A. de S. Melo, "Sistema, Amplificador e Método de Amplificação em Faixa Larga de Sinais de Radiofrequência baseados em Tecnologia Fotônica", Patente: Privilégio de Inovação, Número do registro: BR1020160212510, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 14/09/2016.
- [33] Walter S. Wall and Mark. A. Foster, "Ultra-Wideband Gain in Microwave Photonic Links using Four-Wave Mixing", in *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO Technical Digest*, 2012
- [34] J. S. Ferreira, H. D. Rodrigues, A. A. Gonzalez, A. Nimr, M. Matthé, D. Zhang, L. L. Mendes, and G. Fettweis, "GFDM Frame Design for 5G Application Scenarios," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 54–61, 2017.
- [35] N. Michailow, M. Matthé, I. S. Gaspar, A. N. Caldevilla, L. L. Mendes, A. Festag, and G. Fettweis, "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061, Sep. 2014.