



## **Evolução da tecnologia de telefonia móvel e estudo e caracterização de um sistema móvel 5G de quinta geração**

### **Evolution of mobile service and study and description of fifth generation (5G) mobile system using OFDM**

Vitor Luiz Gomes Mota<sup>1</sup>

Roberta Carvalho<sup>2</sup>

Carina Correa<sup>3</sup>

Roberto Brauer Di Renna<sup>4</sup>

Vanessa Magri<sup>5</sup>

Tadeu Ferreira<sup>6</sup>

Pedro Castellanos<sup>7</sup>

Leni Matos<sup>8</sup>

**Resumo:** O sistema de telefonia móvel celular veio transformar a forma como nos comunicamos hoje, permitindo a troca de informações, seja por áudio, vídeo ou texto, desde qualquer local mesmo no interior das residências. A telefonia móvel celular tornou-se popular no mundo na década de 1960 e, no Brasil, na década de 90, com o intuito de permitir comunicação em mobilidade, sendo um grande diferencial para a época. Com a popularização do serviço e a evolução dos sistemas e dos transceptores móveis (aparelho celular) as funcionalidades e serviços são cada vez maiores. Inicialmente, apenas era possível realizar chamadas de voz. Hoje em dia, os celulares são uma realidade constante na vida dos usuários e permitem uma infinidade de possibilidades, como acesso à Internet, uso de aplicativos, *streaming* de vídeos e tantos outros. Nesse contexto, este trabalho realiza o estudo das diversas gerações de telefonia móvel celular, desde a primeira geração (1G), incluindo a segunda geração (2G), terceira geração (3G) e quarta geração (4G). Além disso, a geração que ainda está por vir, a quinta geração (5G), é avaliada neste artigo, através do desenvolvimento de um sistema 5G que utiliza a técnica de multiplexação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) por meio da implementação de uma plataforma de transmissão e recepção, que é realizada com

<sup>1</sup>UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>2</sup>UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>3</sup>UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>4</sup>UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>5</sup>UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>6</sup>UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>7</sup>UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>8</sup>UFF – Universidade Federal Fluminense

as ferramentas computacionais *MATLAB* e *Labview*, e um conversor que possui saídas e entradas A/D (Analógico-Digital), D/A (Digital-Analógico), para transmissão e recepção do sinal 5G. São realizados testes experimentais em antenas e em trechos de fibra óptica plástica (POF), para caracterizar um sistema de transmissão 5G *indoor* e *outdoor*.

**Palavras-chave:** telefonia móvel; 5G; POF; OFDM.

---

**Abstract:** The cellular technology and mobile system communication has changed throughout the years, our information exchanges either by audio, video or text, are in anywhere, even indoor and outdoor environments. Nowadays, the mobile phones are popular in Brazil and around the world. The main objective of this service is to provide mobility. The systems has been developed for years to allow more possibilities. Firstly, it was possible to make only voice calls, but nowadays, smartphones access to internet applications, video streaming and some many others. In the evolution context, a descriptive study is made about generations of mobile service. Among all of them are the first generation (1G), passing by second generation (2G), third generation (3G) and fourth generation (4G). Besides, conjectures are made about the future fifth generation (5G). A mobile system using OFDM technique (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) is also object of study in this article. It is developed a transmitter and receive platform using softwares as *Matlab* and *Labview* as well as A/D (Analog-Digital), D/A (Digital-Analog) converters. The transmission system is characterized both in indoor and in outdoor environments through measurements using antennas and plastic optical fiber (POF).

**Keywords:** mobile service; 5G; POF; OFDM

---

## 1. Introdução

Os primeiros sistemas móveis terrestres eram constituídos, basicamente, de transmissores que apresentavam alta potência. Esses transmissores eram dispostos em locais altos, com o objetivo de atenderem às necessidades de cobertura. O principal desafio encontrado era o de cobrir grandes áreas com um número limitado de canais. Assim, a estratégia encontrada foi a de dividir a área total em áreas menores denominadas células. Nos sistemas celulares, cada célula usa apenas um subconjunto dos canais do sistema, sendo o mesmo diferente do subconjunto utilizado pelas células vizinhas. O conjunto de células vizinhas que utiliza todos os recursos do sistema é denominado *cluster*. O tamanho do *cluster* é dimensionado de forma que os canais sejam disponíveis para atender às necessidades dos usuários tendo em vista um determinado serviço [1].

Desta forma, os sistemas móveis celulares atuais diferem dos sistemas móveis mais tradicionais, basicamente por apresentarem alta densidade de usuários, cobertura subdividida em células, transmissores de baixa potência, reuso de frequências e possibilidade de expansão, tendo em vista um planejamento de frequências para controlar a interferência entre células.

Um sistema celular de redes de voz, aplicado à primeira geração, basicamente é composto de três componentes que são utilizados, também, nas gerações seguintes com diferentes funcionalidades. São eles:

- Estação Móvel (EM);
- Central de Comutação e Controle (CCC);
- Estação Rádio Base (ERB).

Assim, as tecnologias envolvidas diferem em características como: topologia básica, protocolo de comunicação, técnicas de acesso ao meio, etc. A escolha da tecnologia que melhor se aplica depende do serviço a ser oferecido, levando em consideração as facilidades de planejamento e gerenciamento da rede, do ponto de vista da operadora. A estação móvel, a central de comutação e controle e a estação rádio base constituem a configuração básica que, interligada à rede pública, estabelecem o sistema completo de comunicação sem fio do usuário na célula. A imagem 1 ilustra de forma resumida a arquitetura básica moderna do sistema móvel celular, sendo o usuário definido como EM- estação móvel celular [1] [2].



**Imagem 1:** Arquitetura básica do sistema de comunicação móvel.

Buscando um maior aproveitamento do espectro disponível de acordo com o aumento significativo de usuários, foram desenvolvidas técnicas que permitem o acesso de múltiplos usuários ao meio de transmissão. Este aumento da eficiência ocorre a partir do compartilhamento de canais de rádio. A alocação de canais sob demanda é conhecida por *Demand-Assigned Multiple Access (DAMA)*. Destacam-se três métodos de acesso ao meio nos sistemas de comunicação móvel: *Frequency-Division Multiple Access (FDMA)*, *Time-Division Multiple Access (TDMA)* e *Code-Division Multiple Access (CDMA)*.

O FDMA é caracterizado por alocar canais de frequência individuais a usuários individuais. É o método mais comum de acesso, tendo boa receptividade em sistemas analógicos. Neste caso, o espectro é dividido em canais onde cada assinante sintoniza sua portadora (*carrier frequency,  $f_c$* ). Assim, uma única banda de frequência ou canal é alocada a cada usuário, tendo em vista a demanda por parte dos usuários. No momento da chamada, nenhum outro usuário pode solicitar ou compartilhar esse recurso. Uma vantagem do FDMA é a de possuir pouca interferência inter-simbólica, o que implica no requerimento mínimo de equalização, entretanto, as EMs encarecem pela necessidade de filtros de canal com alta seletividade. Tendo em vista que muitos canais compartilham o mesmo amplificador de potência, os dispositivos de amplificação operam próximo à região não-linear da curva característica, para reduzir os efeitos da intermodulação [1].

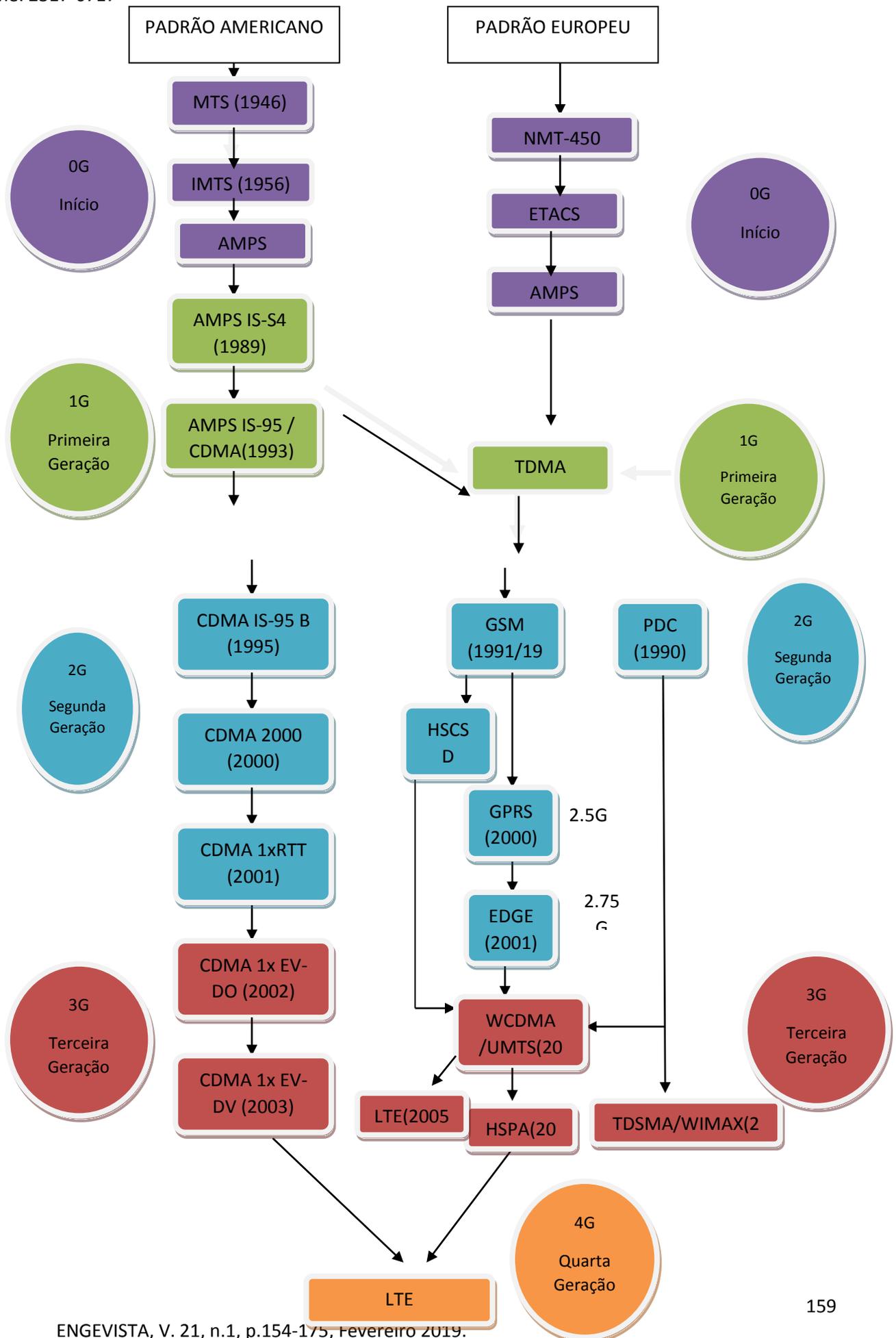
O TDMA consiste em uma multiplexação por divisão do tempo, repartindo um canal físico em janelas de tempo. Neste caso, todos os usuários utilizam a mesma largura de banda, mas o recurso tempo é partilhado. A tecnologia TDMA faz com que os usuários do canal não sofram interferências de outras transmissões simultâneas. Há maior imunidade a ruído e interferência. No caso da interferência resultante dos multipercursos, o TDMA tenta minimizar este efeito ao inserir um limiar de tempo no sistema. Este método possui como grande vantagem

a flexibilidade nas taxas de transmissão, o controle na potência do sinal e na taxa de erros de bit [1].

O CDMA foi desenvolvido nos EUA pelo segmento militar. Neste método de acesso, as estações móveis transmitem na mesma portadora e ao mesmo tempo, mas cada comunicação individual é provida com um código pseudo-aleatório distinto, contribuindo para privacidade na comunicação. Na recepção, cada usuário extrai seu sinal dentre os demais, a partir do código atribuído ao seu canal. A razão entre a faixa espalhada do sinal e sua faixa original é denominada ganho de processamento. Teoricamente, poderíamos ter tantos assinantes quanto códigos geradores, entretanto, cada estação móvel insere uma parcela de ruído, o ruído total é proporcional à quantidade de chamadas em curso. A capacidade do sistema é determinada pelo nível da relação sinal ruído e pelo ganho de processamento. Tal nível de ruído pode ser minimizado usando-se taxas menores nos períodos de silêncio da conversação e optando por antenas diretivas [1].

A multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM) é uma técnica que utiliza subportadoras ortogonais para transmitir a informação dos usuários, onde cada subportadora transmite uma sequência de símbolos modulados digitalmente. As subportadoras são selecionadas de forma que cada uma seja ortogonal às demais. Caso essa condição de ortogonalidade não seja atendida, ocorrerá a interferência entre portadora (*intercarrier interference*, ICI) [2] [3]. Se a ortogonalidade for mantida, é possível recuperar os sinais das subportadoras.

Seguindo a análise das técnicas de multiplexação, assim como a evolução dos transceptores (EM), de acordo com o aumento das taxas de transmissão e recepção (*uplink* e *downlink*), que implicam na complexidade das tecnologias empregadas nos sistemas analógico e digital, incluindo o considerável aumento do número de usuários na rede móvel. O fluxograma na imagem 2 mostra a evolução dos sistemas celulares [4] de acordo com os padrões americanos e europeu (a partir da segunda geração), vale ressaltar que a evolução brasileira segue a européia.



Os aparelhos e serviços prestados evoluíram a cada geração. Com isso, os transceptores móveis deixaram de ser usados apenas para serviços de voz, conforme é visto na tabela 1, que relaciona os modelos dos EM de cada geração e os serviços oferecidos ao usuário.

**Tabela 1:** Evolução dos aparelhos e serviços ao longo das gerações.

Geração	Modelos de Aparelhos	Serviços
Primeira Geração (1G)		A tecnologia de serviços era analógica e oferecia apenas o serviço de voz. Os aparelhos possuíam IMEI ( <i>Mobile Equipment Identify</i> ), mas não possuíam cartão SIM ( <i>chip</i> ).
Segunda Geração (2G)		A tecnologia de serviços era digital, oferecia serviços de voz e também de mensagens de texto (SMS). Fornecia acesso a e-mail e pouco recurso de internet. Aparelhos com IMEI e cartão SIM de memória com alguns kbits de armazenamento.
Terceira Geração (3G)		A tecnologia de serviços era digital. Além dos serviços oferecidos na geração anterior, surgem os aplicativos, redes sociais e a possibilidade de navegar em sites e a realização de vídeo conferências. Os aparelhos passam a ser conhecidos como <i>smartphones</i> devido à presença de sistema operacional para gerenciamento de sua capacidade. Aparelhos com IMEI e cartão dual SIM de memória com Mbits de armazenamento.

<p>Quarta Geração (4G)</p>		<p>A tecnologia de serviços é similar a do 3G, entretanto, nessa geração o objetivo é alcançar maiores taxas. Ela é baseada em tecnologia IP e passa a priorizar o tráfego de dados em relação ao de voz. Apresenta serviço de acesso a internet em tempo real com vídeos e TV Digital. Aparelhos com IMEI e cartão dual SIM de memória com Mbits de armazenamento.</p>
--------------------------------	---	---

## 2. Sistemas de Primeira Geração (1G)

Nos sistemas de primeira geração, destacam-se três padrões: americano, europeu e japonês. Cada padrão possuía suas particularidades conforme é visto na tabela 2, que apresenta a ordem da evolução destes padrões de acordo com o tipo de acesso, a banda e as técnicas de modulação empregadas.

**Tabela 2:** Sistemas móveis celulares utilizados na América, Europa e Japão na primeira geração.[5]

Padrão	Acesso	Faixa de frequência utilizada	Modulação	Faixa/Canal
AMPS	FDMA	824-894 MHz	FM	30 kHz
NAMPS	FDMA	824-894 MHz	FM	10 kHz
CDPD	FH/Packet	824-894 MHz	GMSK	30 kHz
NMT-450	FDMA	450-470 MHz	FM	25 kHz
E-TACS	FDMA	900 MHz	FM	25 kHz
C-450	FDMA	450-465 MHz	FM	20/10 kHz
NMT-900	FDMA	890-960 MHz	FM	12,5 kHz
NTT	FDMA	400/800 MHz	FM	25 kHz
JTACS	FDMA	860-925 MHz	FM	25 kHz
NTACS	FDMA	843-925 MHz	FM	12,5 kHz

## 3. Sistemas de Segunda Geração (2G)

A segunda geração foi marcada pelas tecnologias CDMA e GSM, com evoluções para GPRS e EDGE. A tabela 3 mostra as características de cada uma das tecnologias de acordo com a banda ocupada no Brasil, tempo de latência na transmissão, taxa de dados e técnica de acesso.

**Tabela 3:** Sistemas móveis de segunda geração, 2G.[5]

Tecnologia	Faixa de frequência utilizada	Acesso	Taxa de dados máxima teórica (Downlink)	Taxa de dados máxima teórica (Uplink)	Taxa de dados média teórica	Canalização	Tempo de latência
GSM	850- 900 e 1700-1800 MHz	TDMA	14,4 kpbs	-----	10-40 kbits/s	0,2 MHz	500 ms
GPRS	1700-1800 MHz	TDMA	171,2 kpbs	-----	40-50 kbits/s	0,2 MHz	500 ms
EDGE	1700-1800 MHz	TDMA	473,6 kpbs	473,6 kpbs	100-130 kbits/s	0,2 MHz	300 ms
CDMA IS-95 B	824-849 MHz e 869-894 MHz	CDMA	-----	-----	153 kpbs	1,25 MHz	-----
CDMA 2000	450MHz, 850 MHz	CDMA	144 kpbs	153 kpbs	-----	1,25 MHz	-----

#### 4. Sistemas de Terceira Geração 3G

A terceira geração proporcionou maiores taxas teóricas no *uplink* e *downlink* e quatro tecnologias se destacam, conforme é observado na tabela 4, constando banda, técnica de acesso, taxa de dados, canalização e tempo de latência na transmissão.

**Tabela 4:** Sistemas móveis de terceira geração, 3G.[5]

Tecnologia	Faixa de frequência utilizada	Acesso	Taxa de dados máxima teórica ( <i>Downlink</i> )	Taxa de dados máxima teórica ( <i>Uplink</i> )	Taxa de dados média teórica	Canalização	Tempo de latência
WCDMA(U MTS)	1700-1800 MHz e 1900-2100 MHz	CDMA	2 Mbps	474 kbps	128-384 kbits/s	5 MHz	250 ms
HSPA	1900-2100 MHz	CDMA	7,2/14,4 kpbs	5,76 Mbps	1-10 Mbps	5 MHz	70 ms
HSPA+	1900-2100 MHz	CDMA	21/42 Mbps	7,2/11,5 Mbps	-----	5 MHz	30 ms
LTE	1700-1800 MHz	OFDMA	100 Mbps	50 Mbps	-----	20 MHz	10 ms
CDMA 1x EV-DO	800 MHz	CDMA	-----	-----	2400 kbps	1,25 MHz	-----
CDMA 1x EV-DV	800 MHz	CDMA	-----	-----	2400 kbps	1,25 MHz	-----

## 5. Quarta Geração 4G

A quarta geração é marcada pela tecnologia *LTE Advanced* que aumentou a canalização em 20 vezes em relação a da geração anterior, portanto, nessa tecnologia cada canal possui largura de banda de 100 MHz. Além disso, o tempo de latência diminuiu para, aproximadamente, 5 ms e as taxas médias teóricas são de 1 Gbps, no caso de *downlink*, e 0,5 Gbps, no caso de *uplink*. A taxa real alcançada é de 200 Mbps no Brasil para o *uplink*. A faixa de frequência utilizada para essa tecnologia no Brasil compreende a faixa de frequências entre 2,5-2,690 MHz [4] [6].

## 6. Quinta Geração 5G

A Quinta Geração da telefonia móvel não é uma realidade ainda, mas já faz parte do futuro próximo. Estima-se que seus serviços sejam implementados em 2020. Ela surge com o aumento da demanda por conectividade e com a premissa de alcançar taxas maiores que as alcançadas na tecnologia anterior, sendo possível alcançar taxas reais superiores a 200 Mbps e teóricas acima de 1,5 Gbps. Por se tratar de uma geração ainda em estudo, não existem faixas de

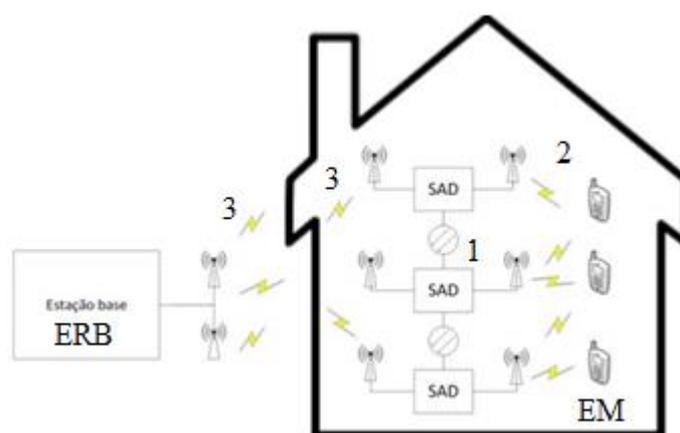
frequências e canalização definidas. A ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) ainda está realizando os estudos para disponibilizar as faixas do 5G no Brasil. Ao redor do mundo algumas frequências são testadas [6] [7] [8], de acordo com a tabela 5.

**Tabela 5:** Faixas de frequências em estudo para o 5G.[6]

País/Bloco	Faixa de frequência abaixo de 6 GHz	Faixa de frequência acima de 6 GHz
União Européia	3,4 - 3,8 GHz	24,25 - 27,25 GHz
China	3,3 - 3,6 GHz/4,8 - 4,99 GHz	14/ 24,25 - 27,5/ 38 - 43,5 GHz
Japão	3,6 - 4,2 GHz/4,4 - 4,9 GHz	27,5 - 28,28 GHz
Coréia do Sul	3,4 - 3,8 GHz	26,5 - 29,5 GHz
Estados Unidos	3,1 - 3,55 GHz; 3,7 - 4,2 GHz	27,5 - 28,35 GHz/37 - 40 GHz

As três técnicas que vêm sendo mais cogitadas para o 5G no mundo são a OFDM, a Filter Bank Multicarrier (FBMC) e a Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM). A OFDM é uma técnica de modulação ideal para sistemas que necessitam de altas taxas de transmissão, alta eficiência espectral e que sejam eficientes em condições de multipercurso. Já a FBMC supera a eficiência espectral da OFDM, mas a sua complexidade computacional é muito maior, o que faz com que a OFDM seja um dos principais candidatos como técnicas de multiplexação, modulação e demodulação para o 5G.

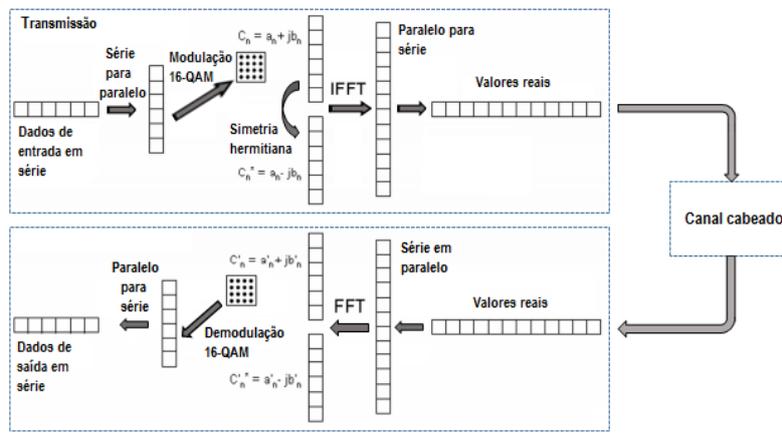
O objetivo desta pesquisa é desenvolver e propor um esquema de modulação/demodulação OFDM, para aplicações de redes de acesso de quinta geração e para uso nas estações rádio-base (ERBs). O sistema proposto é observado na imagem 3.



**Imagem 3:** Esquemático proposto para implementação do sinal 5G em micro células ou femto células.

### 6.1 Desenvolvimento de um sistema de quinta geração utilizando OFDM

A multiplexação OFDM pode ser aplicada tanto no equipamento de Sistema de Antena Distribuído (SAD) quanto no de recepção de usuário, (EM) móvel. O OFDM proposto pode ser utilizado para interconectar SADs *indoor*, segundo o enlace 1 ilustrado na imagem 3, por meio de fibra óptica, ou na comunicação entre antenas e usuários, segundo o enlace de RF 2 da imagem 3. Também pode ser usada em ambientes *outdoor*, realizando a comunicação entre as antenas e as ERBs, segundo o enlace de RF 3. O esquemático do OFDM aqui adotado pode ser visto na imagem 4. Para dar mais robustez ao sistema, evitando *Inter-Block Interference* (IBI) e ICI é utilizado o *Cyclic Prefix* OFDM (CP-OFDM) [9].



**Imagem 4:** Esquemático de implementação do OFDM modificado de [14].

Na figura 4, considera-se  $\{s_{n,k}\}_{k=0}^{N-1}$  como símbolos complexos gerados pelo modulador digital. O sinal gerado pela transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) é dado por:

$$s_n = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{2N-1} S_k e^{(j\frac{2\pi}{2N}kn)} \quad (1)$$

onde,  $n = 0, 1, \dots, 2N, 0 \leq t \leq T_s, T_s$  e  $N$  são, respectivamente, a duração dos símbolos e o número de subportadoras. Para a correta demodulação do sinal, a ortogonalidade entre as subportadoras deve ser mantida. O sinal OFDM é gerado com bits separados em blocos, ainda no transmissor, sendo cada bloco modulado digitalmente. No caso, utiliza-se a modulação 16-QAM. Após a modulação, a transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) é realizada e o prefixo cíclico (CP) é inserido. A seguir, o sinal é transmitido [9].

Quando a transmissão é realizada por fibra óptica, utiliza-se o *Optical OFDM* (O-OFDM). Nesse caso, o sinal transmitido deve ser modificado para que a componente de RF seja suprimida. Para omitir a componente, o sinal transmitido deve ser real no domínio do tempo, ou seja, os dados transmitidos devem satisfazer à simetria hermitiana no domínio da frequência,

representada por  $C_{2N-n} = C_n$  onde  $n = 1, 2, \dots, N - 1$ , onde  $C^*$  indica o conjugado de  $C$ . Para a simetria hermitiana, é realizado um espelhamento do bloco OFDM e, na parte espelhada, é aplicado o complexo conjugado. É inserido um elemento nulo no primeiro elemento do vetor [10].

Após a aplicação da simetria hermitiana, o sinal é transmitido. Quando chega ao receptor, o CP é retirado e, logo após, é realizada a transformada discreta de Fourier (DFT). Ainda no receptor a equalização é efetuada, de maneira a reduzir a dispersão causada pelo canal e realizada a demodulação.

A equalização é um método de combater a interferência inter-simbólica (ISI), que é originada em canais dispersivos no tempo. Para realizar a equalização, é transmitida uma sequência de treinamento com comprimento fixo, de maneira que o equalizador ajuste os seus coeficientes. Após a transmissão do sinal de treinamento, usa-se um algoritmo que estima os coeficientes do equalizador. Há diversos tipos de equalizadores, o *Zero-Forcing* (ZF) é o escolhido neste trabalho, por possuir um baixo custo computacional. Esse algoritmo inverte a resposta em frequência do canal, e pode, em algumas situações, amplificar o ruído.

### 6.1.1 Implementação do MUX/DEMUX OFDM, em *software*

Inicialmente, a implementação do transmissor/receptor OFDM é feita no MATLAB. São realizadas duas caracterizações. Na primeira implementação, são especificados o tamanho do CP e a quantidade de subportadoras e o número de símbolos de acordo com a variação da Relação Sinal Ruído (SNR) do canal, para que o transmissor e o receptor possam ser simulados. Esta análise considera, primeiro, um modelo de canal ideal com ruído AWGN (Ruído Aditivo Branco Gaussiano). Outros modelos de canal RF são avaliados em trabalhos futuros.

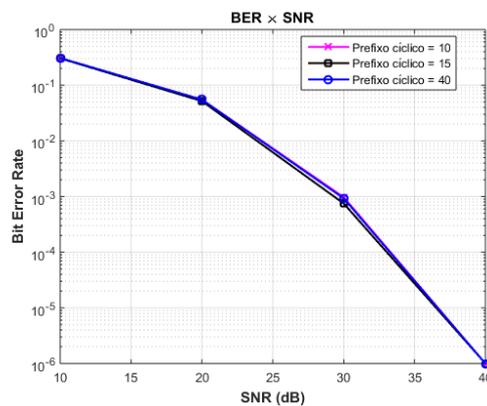
Para verificar a viabilidade do sistema, é calculada a taxa de erro, sendo considerada satisfatória para sistemas de radio frequência (RF) uma taxa de erro menor que  $10^{-4}$ , o que é compatível com aplicações do tipo *streaming* de vídeo em sistemas móveis [11]. As taxas de erro calculadas são vistas na tabela 6.

**Tabela 6:** Valores de entrada e respectivas taxas de erro.

Número de subportadoras	Número de símbolos	Tamanho do CP	SNR (dB)	Taxa de erro
63	3000	15	40	$10^{-6}$
63	3000	15	30	$7,513 \times 10^{-4}$
63	3000	15	20	$5,185 \times 10^{-2}$

Número de subportadoras	Número de símbolos	Tamanho do CP	SNR (dB)	Taxa de erro
63	3000	15	10	$3,046 \times 10^{-1}$
403	4000	40	40	$10^{-6}$
403	4000	40	30	$9,299 \times 10^{-4}$
403	4000	40	20	$5,519 \times 10^{-2}$
403	4000	40	10	$3,089 \times 10^{-1}$
631	6000	10	40	$10^{-6}$
631	6000	10	40	$9,759 \times 10^{-4}$
631	6000	10	40	$5,532 \times 10^{-2}$
631	6000	10	40	$3,089 \times 10^{-1}$

A partir da análise desses resultados, concluiu-se que o sistema possui confiabilidade em sistemas de RF que possuem alta SNR, acima de 33 dB, como pode ser visto na imagem 5, tanto para 63,403 ou 631 portadoras.

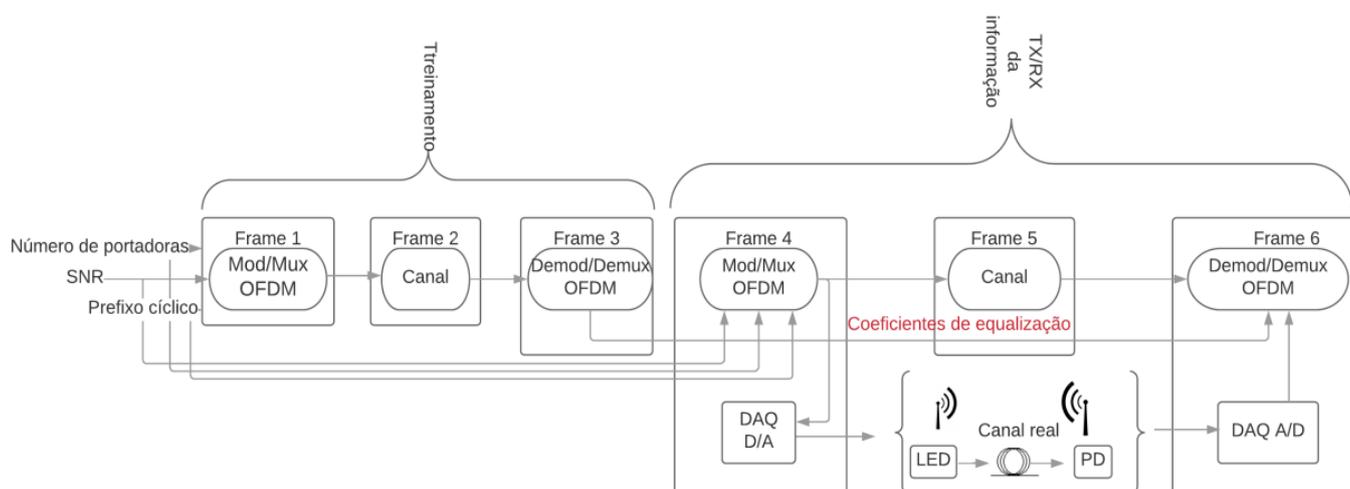


**Imagem 5:** BER em relação à SNR para cenários de simulação descritos na Tabela 6.

O modelo de canal OFDM óptico é considerado segundo resultados obtidos na literatura que fornecem SNR melhores que  $10^{-12}$  para um número alto de subportadoras[10]. Desta forma, a simulação ideal do canal óptico nesta realização segue os valores obtidos por Jean [10].

Para iniciar a implementação no Labview, foi inserido o código implementado no MATLAB. Para isto, foi utilizado o *math script*. Outras estruturas utilizadas para esta implementação são os *frames*, que garantem que a sequência de transmissão ocorra corretamente. São utilizados seis *frames*. Os três primeiros realizam a multiplexação, transmissão pelo canal e demultiplexação do sinal de treinamento, os três últimos realizam as mesmas operações, mas trata-se do sinal que contém a informação desejada. O esquema de implementação no Labview pode ser visto na imagem 6. Como pode ser observado, é solicitado o número de subportadoras, o tamanho do CP e o valor da SNR. O sinal de treinamento é inicialmente transmitido, de forma a calcular os coeficientes de equalização e depois, é retransmitido o sinal com a informação no canal real.

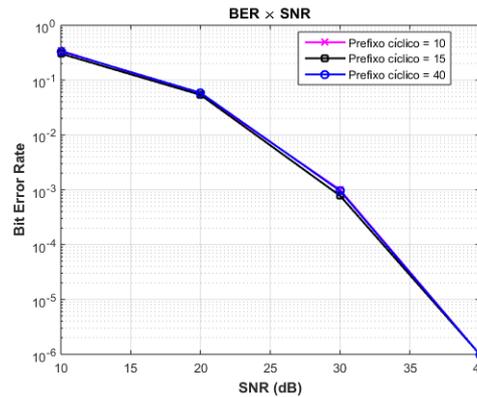
A viabilidade do sistema implementado no Labview, que utiliza o conversor A/D e D/A de altas taxas, cujo modelo é NI-USB 6343 da NI (*National Instruments*) é comprovada pelas taxas de erro obtidas, quando utilizados os mesmos valores de entrada de CP, número de subportadoras e SNR usados no MATLAB, para simulação do enlace de RF. Como os resultados são semelhantes aos do MATLAB, a implementação em Labview também pode ser validada, considerando a simulação *back-to-back* do canal RF no *frame 5* da imagem 6. Na imagem 7 pode ser visto um gráfico comparativo de BER x SNR com a variação dos cenários que consideram diferentes valores de SNR para diferentes números de subportadoras, símbolos e prefixo cíclico determinados na tabela 7.



**Imagem 6:** Diagrama de implementação do sistema de transmissão e recepção no Labview integrado com o MATLAB.

**Tabela 7:** Valores de entrada e respectivas taxas de erro

Número de subportadoras	Número de símbolos	Tamanho do CP	SNR (dB)	Taxa de erro
63	3000	15	40	$10^{-6}$
63	3000	15	30	$7,78 \times 10^{-4}$
63	3000	15	20	$5,37 \times 10^{-2}$
63	3000	15	10	$3,27 \times 10^{-1}$
403	4000	40	40	$10^{-6}$
403	4000	40	30	$9,58 \times 10^{-4}$
403	4000	40	20	$5,87 \times 10^{-2}$
403	4000	40	10	$3,35 \times 10^{-1}$
631	6000	10	40	$10^{-6}$
631	6000	10	40	$9,98 \times 10^{-4}$
631	6000	10	40	$3,44 \times 10^{-1}$



**Imagem 7:** BER em relação à SNR para cenários de simulação descritos na Tabela 4.

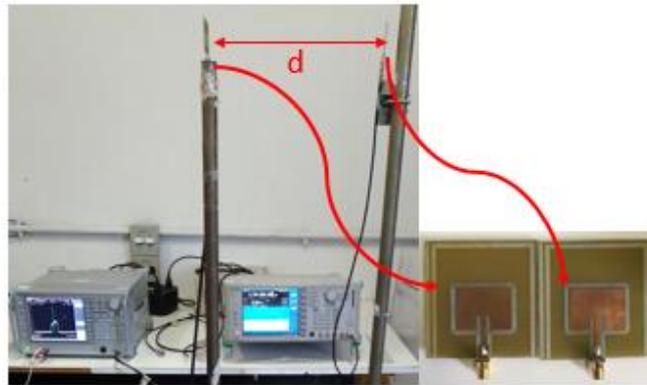
A taxa de amostragem utilizada é a de 900 kS/s (aproximadamente 1Mbps). A simulação *back-to-back* do canal óptico no *frame* 5 da imagem 6 também deve ser considerada, de forma que as portas de saída do conversor D/A e entrada do A/D, possam alternar entre o enlace óptico e o enlace de RF.

### 6.1.2 Medições e análise de resultados

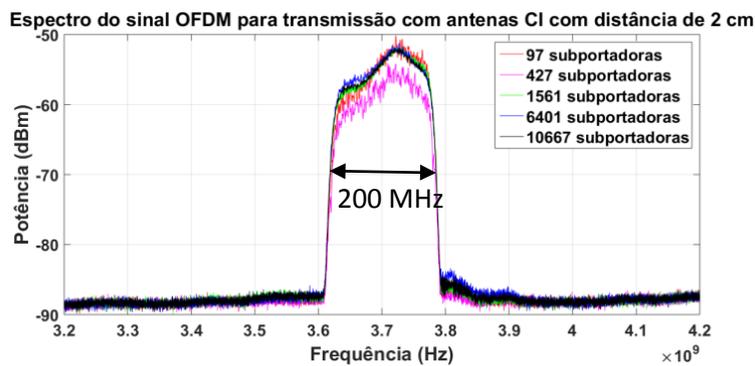
A primeira medição foi feita para o meio sem fio. Nesta configuração, o conversor DAQ foi substituído por um gerador, pois o próprio gerador faz o *upconverter* do sinal gerado pelo MATLAB para a frequência de operação da antena. A realização da transmissão com o DAQ exige a utilização de um *mixer* que fará a conversão do sinal para a portadora ( $f_c$ ) da antena, entretanto nesta primeira caracterização experimental o *mixer* e o DAQ são substituídos pelo gerador vetorial MG3700 da Anritsu, que trabalha no intervalo entre 250 kHz até 6 GHz e o analisador vetorial MS2692A, que trabalha entre 50 Hz até 26,5 GHz. Foi realizada uma medição que utiliza antenas de circuito impresso (CI). Essa transmissão é realizada transmitindo o sinal OFDM em uma frequência ( $f_c$ ) próxima das que estão sendo cogitadas para o 5G. A continuação deste trabalho prevê a comparação destes resultados com a utilização do *mixer* e do DAQ.

Assim, para esta medição, é utilizado 3,7 GHz, que é a portadora candidata à faixa de operação do 5G na Europa, Coréia do Sul, Japão e Estados Unidos. A imagem 8 apresenta duas antenas de microfita [11] que utilizam o substrato FR-4, projetadas no LAPROP (Laboratório de Antenas e Propagação da Universidade Federal Fluminense, UFF) e que operam em faixa de frequência bem próxima a 3,5 GHz que é a cogitada no Brasil para o 5G segundo a ANATEL, e para medição com esta antena é calculada a distância de campo distante. A distância obtida é de 1,67 cm. Nesta medição, são variados o número de subportadoras e a distância entre as antenas, sendo feitas medições com as antenas distantes por 2 cm, 15 cm e 30 cm. Nas Imagens 8 a 11 pode ser vista a implementação em bancada para esta medição e as antenas utilizadas para a medição além dos gráficos de densidade de potência por frequência com a variação de número de subportadoras com a distância, para 2 cm, 15 cm e 30 cm.

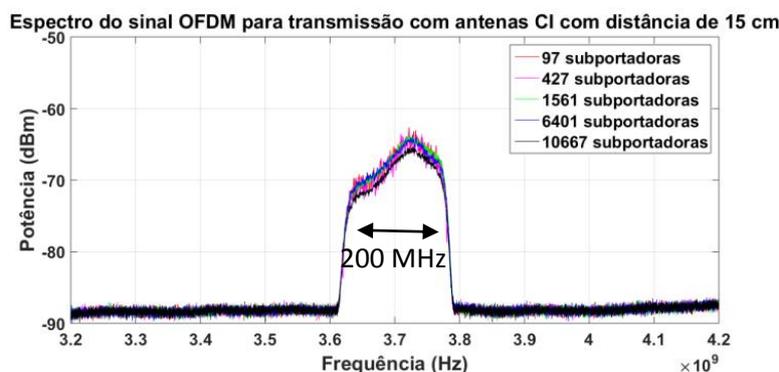
Ao realizar a análise da densidade espectral de potência com a inserção das antenas, com variação do número de subportadoras de 97 a 10667, é observada uma atenuação do sinal com o aumento da distância entre as antenas, sem alteração da banda do sinal, o que é um comportamento esperado para o sistema, obtendo largura de banda por canal, de aproximadamente, 200 MHz, que é maior que a canalização real utilizada no 4,5G no Brasil, testes para valores maiores que 200 MHz serão considerados no LAPROP nesta configuração como continuação deste trabalho.



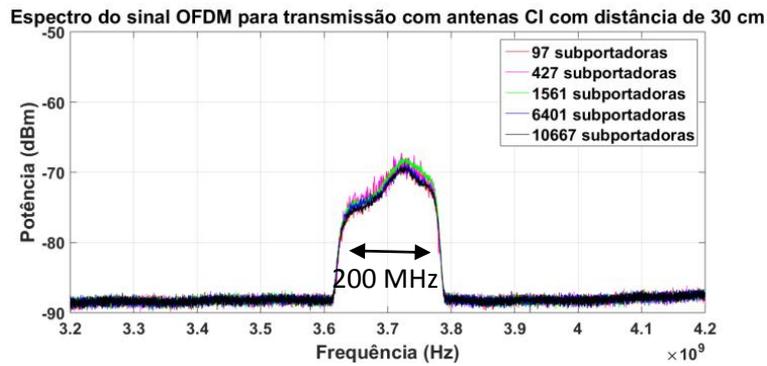
**Imagem 8:** Montagem em bancada para medição com antenas de CI.



**Imagem 9:** Transmissão OFDM com antena impressa com distância de 2 cm.



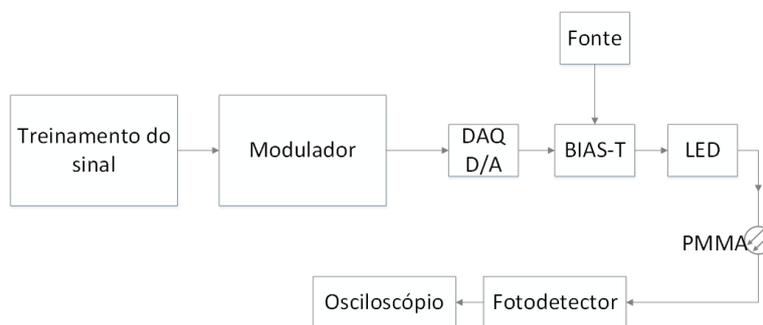
**Imagem 10:** Transmissão OFDM com antena impressa com distância de 15 cm.



**Imagem 11:** Transmissão OFDM com antena impressa com distância de 30 cm.

As medições em POF são realizadas para validar um OFDM que é proposto para interligação óptica dos SADs, como apresentado na imagem 12. As medições são realizadas em dois trechos de POFs de poli-metil-metacrilato (PMMA) Eska-Mitsubishi com atenuação de 190 dB/km, de 20 m e de 60 cm. Apesar de possuírem alta atenuação, as POFs são escolhidas pois possuem baixo custo, flexibilidade, facilidade de instalação e conectorização [13].

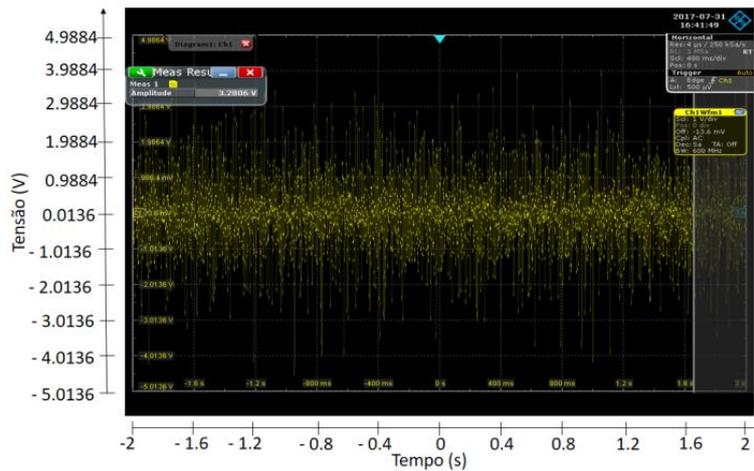
A medição realizada nos dois trechos de fibra consiste em transmitir um sinal OFDM e analisar a forma de onda recebida, no domínio do tempo, em um osciloscópio. O esquema proposto para esta medição pode ser visto na imagem 12.



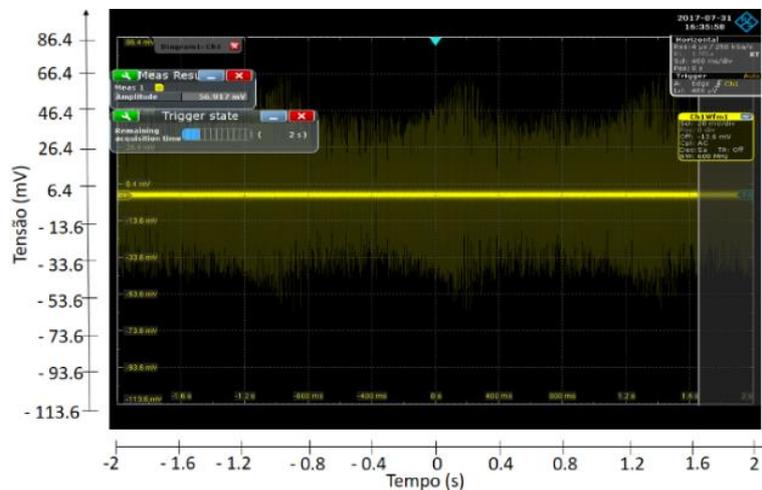
**Imagem 12:** Esquemático para medições em POF.

Para esta medição, é utilizado um *Light Emitting Diode* (LED) vermelho da Diemount. Esse LED acopla a luz com alta eficiência em uma POF padrão com diâmetro de 1 mm e abertura numérica de 0,5, e possui pico de potência espectral em 650 nm. O LED utilizado possui uma corrente operacional máxima recomendada de 30 mA, porém, o LED passa a operar na região não-linear a partir de 20 mA. Assim, para garantir que a linearidade seja mantida, é utilizada a faixa de corrente de 20 mA a 25 mA. Apesar do LED vermelho não ser o que possui a menor atenuação na fibra de PMMA, esse LED é o de maior potência óptica dentre os disponíveis. A recepção do sinal é realizada pelo fotodetector Thorlabs PDA10A SI *Amplified Detector*, utilizado para detecção na faixa de 200 a 1100 nm.

A imagem 13 apresenta o sinal gerado pelo DAQ D/A antes da conversão eletro a portadora /óptica (E/O), e a imagem 14 apresenta o sinal recebido no osciloscópio após a conversão O/E, ou seja, os sinais elétricos transmitido e recebido no domínio do tempo são comparados e apresentam comportamento semelhante. A análise da *bit error rate* (BER) para esta caracterização está em andamento, de forma a solucionar problemas de sincronismo entre conversores A/D e D/A do transmissor e receptor no Labview de forma a tornar o sistema rápido em tempo real.



**Imagem 13:** Sinal OFDM óptico de transmissão no domínio do tempo.



**Imagem 14:** Sinal OFDM óptico de recepção no domínio do tempo.

## 7. Conclusões

O objetivo deste trabalho é mostrar a evolução dos serviços de telefonia móvel desde a primeira geração (1G) até a geração que está sendo estudada para futura implementação (5G). Para tal, foi resumido o funcionamento de cada geração e as suas principais características.

A cada evolução de geração, verifica-se o aprimoramento da geração anterior como, por exemplo, a questão da segurança, que era crucial na primeira geração e que foi aprimorada a partir da segunda. Além disso, é possível verificar que um dos principais aspectos motivadores é sempre alcançar maiores taxas do *uplink* e do *downlink*, assim permitindo uma navegação mais rápida de acordo com altos valores de largura de banda por canal.

Verifica-se, também, que o aparelho celular deixa de ser usado apenas para tráfego de voz e passa a ser utilizado para uma infinidade de serviços, como por exemplo: acesso a redes sociais, *streaming* de vídeos, acesso a aplicativos e tantos outros que tornaram esse sistema tão popular ao longo dos anos e das gerações.

Para os testes de funcionamento da quinta geração, foi implementado o sistema de multiplexação e demultiplexação OFDM. Ele foi escolhido pela robustez à seletividade em frequência, pela alta eficiência espectral e pela simplicidade de implementação quando comparada a outras técnicas.

Na implementação em MATLAB, foi utilizada a taxa de erro para validação do sistema, sendo satisfatório valor menor que  $10^{-4}$  para sistemas RF, com uma SNR de 33 dB. O valor proposto para a taxa de erro ( $10^{-4}$ ) é utilizado como referência em medições de sistemas OFDM, em enlaces de RF. Para o meio óptico são considerados satisfatórios valores menores que  $10^{-6}$ , que são obtidos para uma SNR maior que 40 dB [13][14][15].

Com a validação do sistema no *Labview*, foi possível iniciar as medições por meio da comparação do canal. A medição consistiu em duas etapas: a primeira foi a transmissão entre antenas iguais de circuito impresso (CI) em 3,7 GHz. Para esta antena, foi variado o número de suportadoras e a distância entre as antenas. Os resultados obtidos também foram satisfatórios. Os resultados obtidos nesta implementação permitem a utilização do sistema nos SADs e nas comunicações entre estações para uma banda de 200 MHz, o que possivelmente permitirá atingir taxas de 200 Mbps por canal.

A segunda etapa consistiu em uma transmissão óptica utilizando fibra plástica e os conversores D/A e A/D. Os sinais transmitido e recebido no domínio do tempo são muito similares. A medição da BER ainda está em fase de realização de forma a solucionar problemas de sincronismo para implantação em tempo real.

## 8. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao professor Marbey M. Mosso da PUC-Rio e a Capes pelo suporte à pesquisa.

## 9. Referências Bibliográficas

- [1] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Pearson, Prentice Hall.
- [2] A. Sahin, I. Güvenç e H. Arslan. “A Survey on Multicarrier Communications: Prototype Filters, Lattice Structures, and Implementation Aspects”, in *IEEE Communication Surveys & Tutorials*.
- [3] E.L. Pinto e C.P. de Albuquerque. “A técnica de transmissão OFDM”, *Revista Científica Periódica Telecomunicações*, vol. 5, n. 1, Junho 2002.
- [4] VORA J LOPA. *Evolution of Mobile Generation Technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology*. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER)*, volume 02, 2015.
- [5] MAGRI, Vanessa. Notas de aula e apostila do curso de Sistema Móveis. Universidade Federal Fluminense.
- [6] J. Wang, G. Li, B. Huang, Q. Miao, J. Fang, P. Li, H. Tan, W. Li, J. Ding, J. Li and Y. Wang. *Spectrum Analysis and Regulations for 5G*. 5G Mobile Communications.
- [7] Qualcomm, Making 5G NR a reality, white paper, dezembro de 2016. Link: <https://www.qualcomm.com/documents/whitepaper-making-5g-nr-reality> Acessado em: 17/06/2017.
- [8] Choudouri, D. "Challenges for 5G, The Future of Wireless Communications". *IEEE Microwave Magazine*. Number 5 July/August 2017.
- [9] M. Bertrand. Novel receiver and decoding schemes for wireless OFDM systems with cyclic prefix or zero padding, PhD Thesis, Telecom Paris, Paris, France, 2001.
- [10] J. Armstrong. “OFDM for Optical Communications”, in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 189-204, February 2009.
- [11] W. Zhou, G. Villemaud e T. Risset. “Full Duplex Prototype of OFDM on GNYRadio and USRPs”, in *Proc 2014 IEEE Radio and Wireless Symposium (RSW)*, Newport Beach, CA, 2014, pp. 217-219.
- [12] BALANIS, A.C. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley Interscience. Third Edition.
- [13] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow e W. Daum. *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*, 2<sup>nd</sup> edition, Berlin, Germany, 2008.
- [14] M. Majó, Design and implementation of an OFDM-based communication system for the GNURadio platform, Master Thesis. Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2009.
- [15] N.A. Papagorgiou. Development of RF Front End Prototype Compliant with the 802.11a Standard for Wireless Applications, Master Thesis. Georgia Institute of Technology, Atlanta, United States, 2003.