



Formas de Onda para as Redes 6G

xGMobile
Centro de Competência EMBRAPPII
Inatel em Redes 5G e 6G

Inatel

xGMobile – Centro de Competência EMBRAPII Inatel em Redes 5G e 6G

O Centro de Competência, localizado no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), é um modelo inédito no Brasil, destinado a impulsionar o desenvolvimento de tecnologias avançadas com elevado potencial para o mercado. A iniciativa posicionará o Brasil entre as principais nações inovadoras do mundo.

Formado por um grupo de pesquisa credenciado em uma área temática específica, o Centro foi desenvolvido para enfrentar desafios e questões de elevada complexidade que tenham impacto social e econômico. Além disso, conta com infraestrutura moderna e uma equipe com competência e experiência comprovadas na área de atuação.

Índice

1. Introdução.....	1
2. OFDM e a Maximização da Eficiência Espectral	1
2.1 Desafios Associados à OFDM.....	4
3. Algumas Formas de Onda.....	6
3.1 F-OFDM.....	7
3.2 GFDM.....	8
3.3 FBMC.....	9
3.4 UFMC.....	10
3.5 OTFS.....	10
3.6 OTSM.....	12
4. Comparação das Formas de Onda	12
5. Conclusão	14

1. Introdução

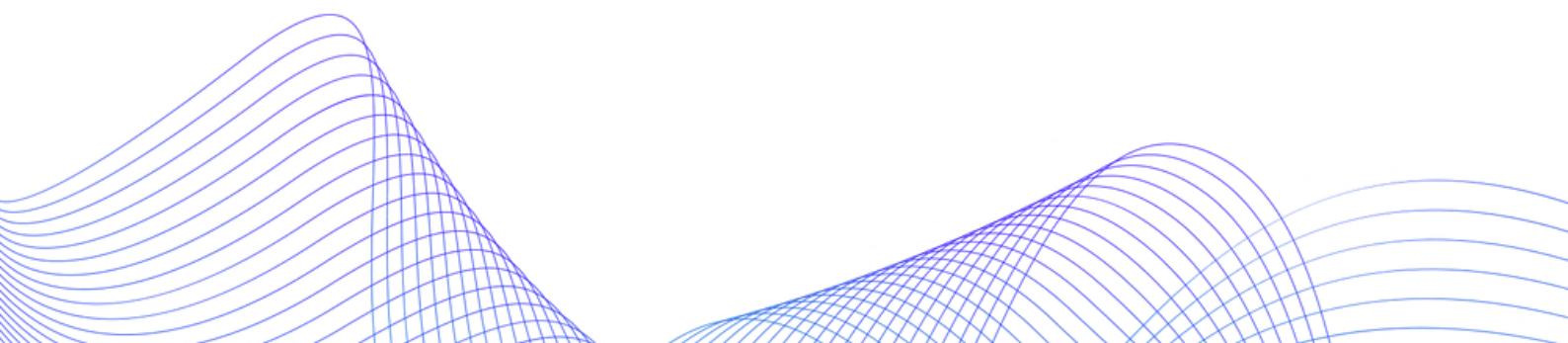
Ao longo das últimas décadas, o avanço dos dados móveis nas áreas de radiodifusão, Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*), educação, saúde, comércio e energia tem colocado uma forte pressão sobre as redes móveis de terceira geração (3G) e quarta geração (4G) para aprimorar suas ofertas de serviço. Inicialmente concebidas para atender às necessidades dessas aplicações, essas gerações de redes móveis têm enfrentado o desafio de acompanhar o ritmo das crescentes demandas.

À medida que os requisitos dessas aplicações continuam a aumentar, novas tecnologias móveis, como a quinta geração (5G) e a futura sexta geração (6G), estão sendo desenvolvidas e testadas. Essas redes representam gerações bastante heterogêneas de redes móveis, projetadas para oferecer uma elevada taxa de transferência por usuário, boa eficiência energética, maior capacidade de tráfego por área, eficiência espectral aprimorada, latência reduzida e alta mobilidade. Consequentemente, as formas de onda, que se referem aos padrões específicos que as ondas portadoras assumem após a modulação, devem ser flexíveis e capazes de otimizar os recursos de frequência disponíveis na interface de rádio das redes móveis.

Cada tipo de modulação gera uma forma de onda distinta que pode ser eficientemente transmitida pelo canal de comunicação e, em seguida, demodulada pelo receptor para recuperar o sinal de informação original. A escolha apropriada da forma de onda e do método de modulação é fundamental para atender às exigências de eficiência espectral, resistência ao ruído e interferência, além de se adaptar às limitações do canal. Essa necessidade implica na investigação de novas formas de onda que satisfaçam as demandas das futuras redes 6G, abrangendo uma variedade de aplicações.

2. OFDM e a Maximização da Eficiência Espectral

A concepção de formas de ondas é um dos principais aspectos relacionados à camada física em sistemas de comunicação sem fio.



Na rede 4G, os usuários são atendidos por um valor de espaçamento de subportadora fixo de 15KHz e pela forma de onda Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). A principal ideia da OFDM é distribuir os dados através de múltiplas portadoras de frequência estreitamente espaçadas. Essas portadoras são ortogonais entre si, o que significa que seus intervalos de sobreposição não geram interferências. Cada subportadora é modulada com uma parte dos dados, e o conjunto dessas subportadoras moduladas permite a transmissão eficiente do sinal completo, como ilustrado na Figura 1. Essa propriedade permite que a OFDM maximize a eficiência espectral, transmitindo dados em paralelo ao longo de várias frequências.

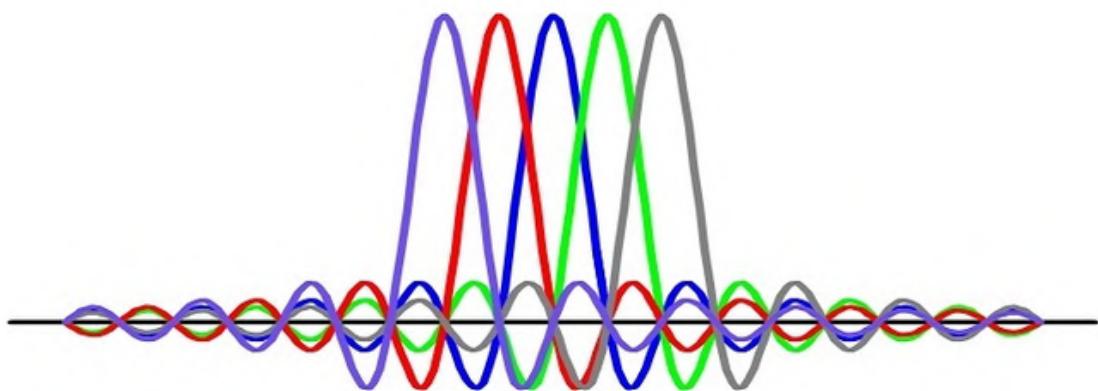


Figura 1. Representação da técnica de modulação OFDM. Nesta abordagem, o espectro de frequências disponível é dividido em diversas subportadoras ortogonais.

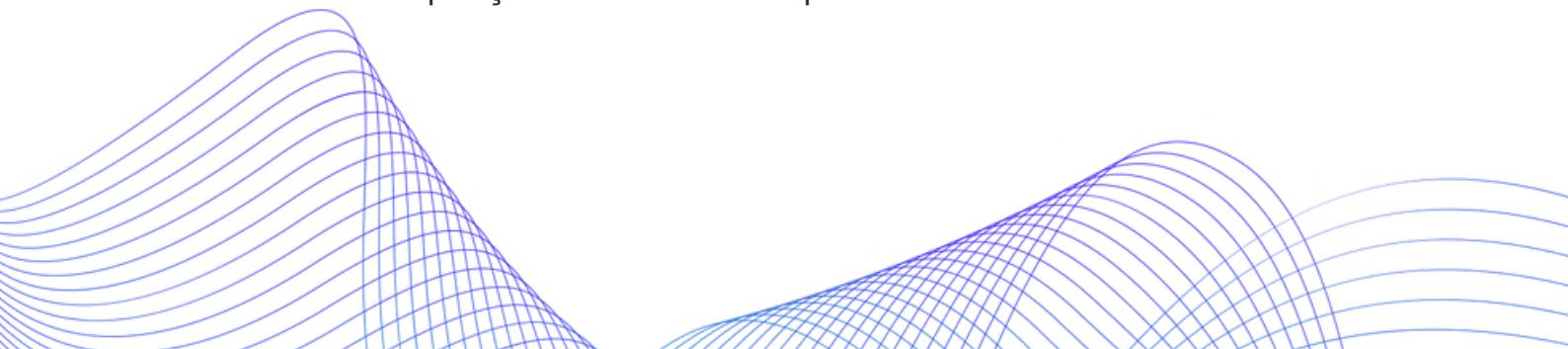
Para suportar os diversos casos de uso previstos para a rede 5G, sua camada física foi projetada para ser flexível. Assim, a rede 5G deu o primeiro passo ao introduzir uma numerologia escalável na forma de onda OFDM, tanto para transmissão no *uplink* quanto para recepção no *downlink*, a fim de atender às exigências dos usuários e aplicações. A numerologia refere-se ao uso de diferentes configurações de espaçamento entre subportadoras na modulação OFDM. Na Release 15, o 3GPP (3rd Generation Partnership Project) adotou cinco tipos de numerologia, contudo, esse número foi ampliado para sete na Release 17, podendo assumir diferentes valores de acordo com o cenário em que o usuário está localizado. A Tabela 1 apresenta as sete configurações possíveis de espaçamentos entre subportadoras (μ), os valores de espaçamento em frequência entre as subportadoras (Δf), o tipo de prefixo cíclico (normal ou estendido) associado a cada configuração, e a respectiva release a que se referem.

Tabela 1. Espaçamentos entre subportadoras.

μ	$\Delta f = 2\mu \times 15[\text{kHz}]$	Prefixo Cíclico	Comentários
0	15	Normal	Release 15
1	30	Normal	
2	60	Normal, Estendido	
3	120	Normal	
4	240	Normal	
5	480	Normal	Adicionado na Release 17
6	960	Normal	

O espaçamento entre subportadoras define a distância entre as portadoras de frequência adjacentes em um sistema OFDM. Um espaçamento menor possibilita um espectro mais denso e uma taxa de dados mais elevada, enquanto um espaçamento maior pode oferecer maior resistência a interferências.

O comprimento dos símbolos refere-se à duração de cada símbolo transmitido em um sistema OFDM. Em OFDM, cada símbolo é composto por várias subportadoras ortogonais, onde cada uma transporta parte da informação. Símbolos mais longos, ou seja, com maior duração, geralmente têm maior capacidade de transportar informações, uma vez que permitem um espaçamento maior entre as subportadoras, o que pode resultar em ampliação da eficiência espectral.



No entanto, símbolos mais longos também aumentam a susceptibilidade a efeitos de desvanecimento do canal, especialmente em ambientes onde o canal de comunicação experimenta variações rápidas. Isso se deve ao fato de que, durante o período de transmissão de um símbolo mais longo, as características do canal podem se alterar, resultando em distorções no sinal recebido. Para atenuar esses efeitos, técnicas como a utilização de prefixos cíclicos são empregadas em sistemas OFDM, criando uma margem de proteção contra o desvanecimento e assegurando a correta recepção dos dados.

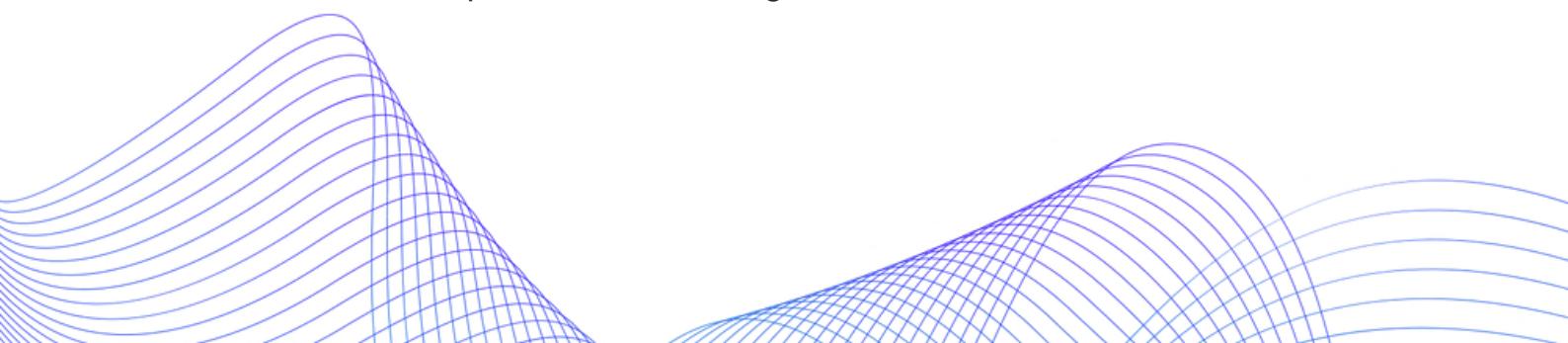
O prefixo cíclico consiste em uma cópia do final de um símbolo OFDM que é inserida no início do mesmo símbolo para combater os efeitos de desvanecimento de canal e facilitar uma recepção robusta do sinal. Sua principal função é minimizar a Interferência Inter-Simbólica (ISI, *Inter-Symbol Interference*) causada pela sobreposição de símbolos adjacentes. A quantidade de símbolos para cada tipo de prefixo difere, com 14 símbolos OFDM para o prefixo cíclico normal e 12 símbolos OFDM para o prefixo cíclico estendido. A escolha entre o prefixo cíclico normal e o estendido em sistemas OFDM é influenciada por diversos fatores, incluindo o ambiente de transmissão (*indoor* ou *outdoor*), a faixa de frequência utilizada, o tipo de serviço (*unicast* ou *broadcast*) e a implementação de *beamforming*.

2.1 Desafios Associados à OFDM

Os principais desafios associados à tecnologia OFDM, especialmente no contexto de comunicações em frequências de ondas milimétricas (mmWave) e terahertz (THz) são:

- **Sensibilidade à dispersão de frequência:**

A modulação OFDM distribui os dados através de várias subportadoras ortogonais, cada uma responsável por transportar uma parte do sinal. Isso torna a modulação sensível a variações no canal de transmissão, que podem afetar as propriedades de fase e amplitude das subportadoras, causando distorções no sinal recebido. Este problema se acentua em frequências mais altas, como nas faixas de mmWave e THz, onde o meio de transmissão, como o ar, pode causar alterações significativas nas propriedades do sinal. Nessas frequências, onde os sinais possuem comprimentos de onda mais curtos, até mesmo pequenas alterações no ambiente podem resultar em dispersão e variações no canal de transmissão, comprometendo a integridade do sinal.



- **Redução da eficiência espectral devido ao prefixo cíclico:**

O prefixo cíclico é adicionado a cada símbolo OFDM para combater a ISI causada pela dispersão temporal durante as transmissões. Embora essa prática seja eficaz para mitigar a ISI, o prefixo cíclico também introduz um *overhead* adicional ao sinal transmitido. Essa porção extra do sinal não contém informações úteis, resultando em uma redução da eficiência espectral do sistema.

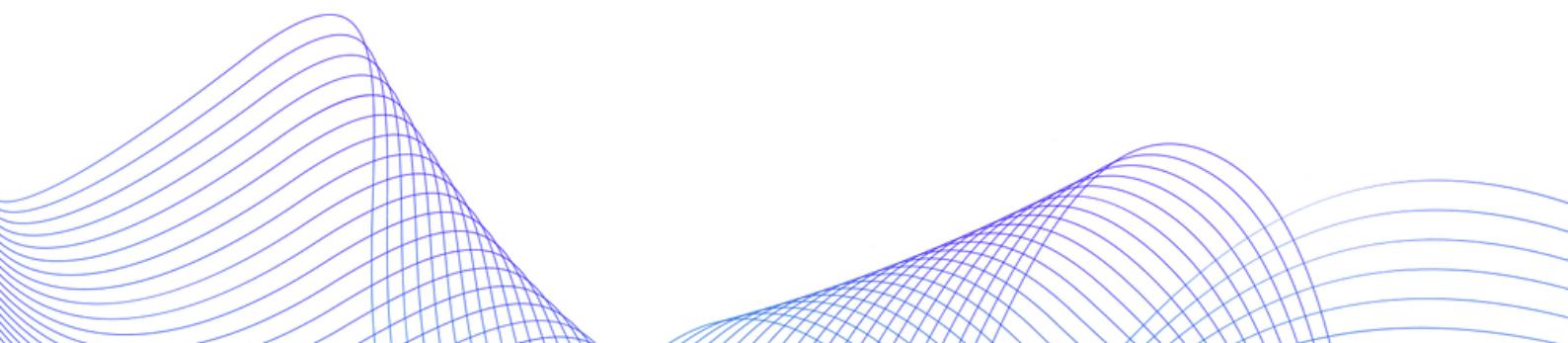
À medida que a frequência de operação aumenta, especialmente em faixas mais altas como mmWave e THz, conhecidas por sua maior sensibilidade às variações de propagação, a dispersão temporal tende a se tornar mais acentuada. Nessa situação, é necessário ajustar a duração do prefixo cíclico, ampliando-o para garantir a preservação da qualidade do sinal. O aumento do tamanho do prefixo cíclico resulta em uma redução adicional da eficiência espectral, uma vez que uma porção maior do tempo de transmissão é dedicada a um componente do sinal que não contém dados úteis.

Portanto, embora o prefixo cíclico seja crucial para preservar a qualidade da transmissão em ambientes com dispersão temporal, essa prática também implica em uma diminuição da eficiência espectral do sistema OFDM.

- **A alta relação entre a Potência de Pico e Potência Média (PAPR, Peak-to-Average Power Ratio):**

A PAPR é uma medida utilizada em sistemas de comunicação para quantificar a magnitude das variações na amplitude de um sinal transmitido. Em outras palavras, a PAPR compara a potência máxima de um sinal em um dado momento com a potência média do sinal ao longo do tempo. Em sinais com modulação OFDM, a combinação de várias subportadoras pode resultar em picos de sinal significativos. Uma alta PAPR indica que, em momentos específicos, o sinal pode ter picos de potência muito acima da média, o que apresenta desafios para o sistema de transmissão, especialmente para os amplificadores de potência.

Em frequências mais altas, como mmWave e THz, lidar com a PAPR torna-se ainda mais difícil devido a uma combinação de fatores. Estes incluem a ampla largura de banda dos sinais nessas faixas, a maior propensão à propagação e atenuação, além da influência mais pronunciada de efeitos como dispersão e reflexão.



Essa variedade de fatores contribui para uma maior variação na amplitude do sinal ao longo do tempo. Amplificadores que operam com sinais de alta PAPR devem ser capazes de acomodar as variações entre a potência média e os picos de potência, evitando a saturação ou distorção do sinal.

No entanto, alcançar a eficiência energética em condições de alta PAPR é desafiador, pois os amplificadores tendem a ser menos eficientes quando operam longe de seus pontos de saturação. Nesses pontos, a linearidade é melhor, mas a eficiência é reduzida. Essa condição exige um projeto mais sofisticado, o que muitas vezes compromete a eficiência energética.

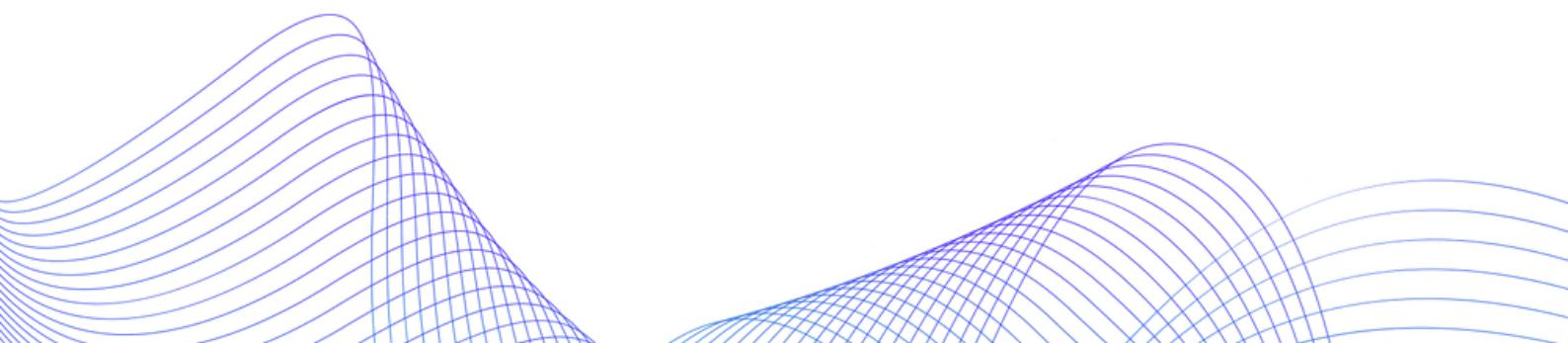
- **Emissão fora da faixa (OOBE, Out-Of-Band Emission):**

A OFDM divide a largura de banda disponível em várias subportadoras ortogonais, utilizadas para a transmissão simultânea de dados em paralelo. Cada subportadora é modulada por uma forma de onda retangular no domínio do tempo, resultando em um espectro de frequência com lóbulos laterais que se estendem para fora da faixa principal de transmissão. Esses lóbulos representam a energia que pode resultar em OOBE, causando interferência nos canais adjacentes.

As faixas de mmWave e THz possuem larguras de banda consideravelmente mais amplas do que as faixas de frequência mais baixas. Com uma maior largura de banda, torna-se mais desafiador manter o sinal dentro dos limites da faixa de frequência alocada, o que, por sua vez, aumenta a probabilidade de ocorrência de OOBE.

3. Algumas Formas de Onda

Outras formas de onda podem oferecer benefícios e maior capacidade de adaptação em comparação com a OFDM, dependendo das exigências e características do canal de comunicação. Nesse contexto, algumas formas de onda, como a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal Filtrada (F-OFDM, *Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), a Multiplexação por Divisão de Frequência Generalizada (GFDM, *Generalized Frequency Division Multiplexing*), a Multiportadora por Banco de Filtros (FBMC, *Filter Bank Multicarrier*) e a Multiportadora Filtrada Universal (UFMC, *Universal Filtered Multicarrier*), foram inicialmente consideradas para a 5G com o objetivo de propor melhorias em relação à OFDM. Espera-se que essas formas de onda também sejam aplicadas de maneira aprimorada ou adaptada nas redes 6G.



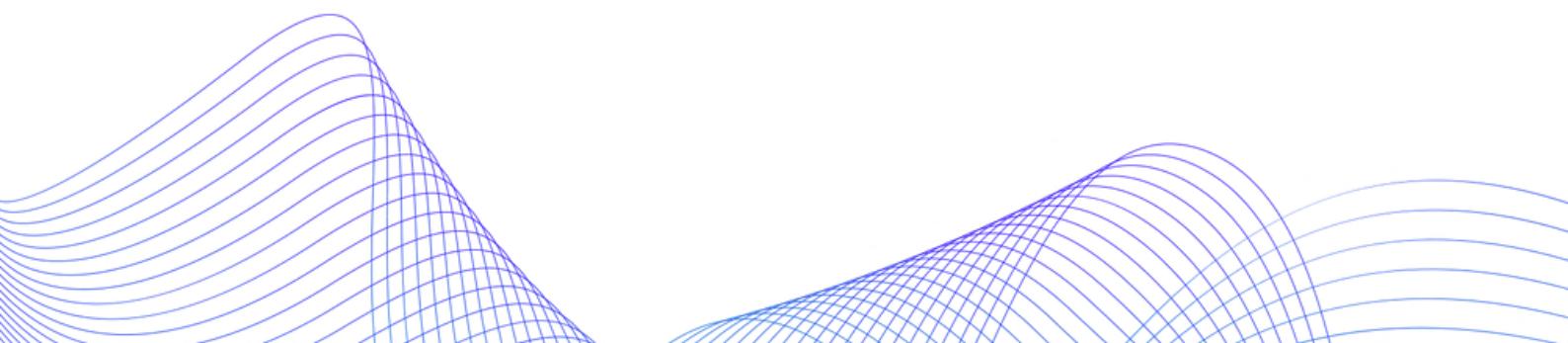
No entanto, prevê-se o desenvolvimento de novas abordagens para melhorar a eficiência espectral, reduzir a latência e suportar Comunicações Ultra Confiáveis de Baixa Latência (URLLC, *Ultra-Reliable Low-Latency Communications*), além de oferecer maior flexibilidade na alocação de recursos de espectro. Essas melhorias são essenciais para sustentar uma alta densidade de dispositivos de IoT e aplicações que exigem altas taxas de dados e conectividade em movimento. Nesse contexto, destacam-se duas formas de onda promissoras: Espaço Ortogonal Tempo-Frequência (OTFS, *Orthogonal Time-Frequency Space*) e Multiplexação Ortogonal de Sequência de Tempo (OTSM, *Orthogonal Time Sequence Multiplexing*).

3.1 F-OFDM

F-OFDM, uma versão aprimorada da OFDM, inclui uma etapa adicional de filtragem para melhorar certas características da transmissão, com foco na eficiência espectral e na redução da OOB. Utiliza o prefixo cíclico de forma semelhante à OFDM, mas com a vantagem de aplicar filtros nas subportadoras, confinando a energia de transmissão dentro da faixa de frequências alocada. Isso resulta em uma redução significativa da OOB, tornando a transmissão mais compatível com o espectro compartilhado e minimizando a interferência em relação a outros usuários e serviços.

A aplicação de filtros não só minimiza a interferência em canais adjacentes, promovendo um aproveitamento mais eficiente do espectro disponível, mas também se adapta de forma dinâmica às mudanças nas condições do canal e às necessidades específicas de cada transmissão. Esse ajuste dinâmico permite uma otimização contínua do desempenho de transmissão, garantindo qualidade e eficiência em uma variedade de cenários.

Baseada na arquitetura OFDM, amplamente reconhecida e compreendida, a F-OFDM garante integração com as tecnologias existentes, facilitando a transição para novos padrões e normas de comunicação. Essa abordagem permite que a F-OFDM aproveite a robustez e eficiência da OFDM, ao mesmo tempo em que introduz melhorias significativas em eficiência espectral e redução de interferência, garantindo compatibilidade e flexibilidade diante dos avanços tecnológicos.



3.2 GFDM

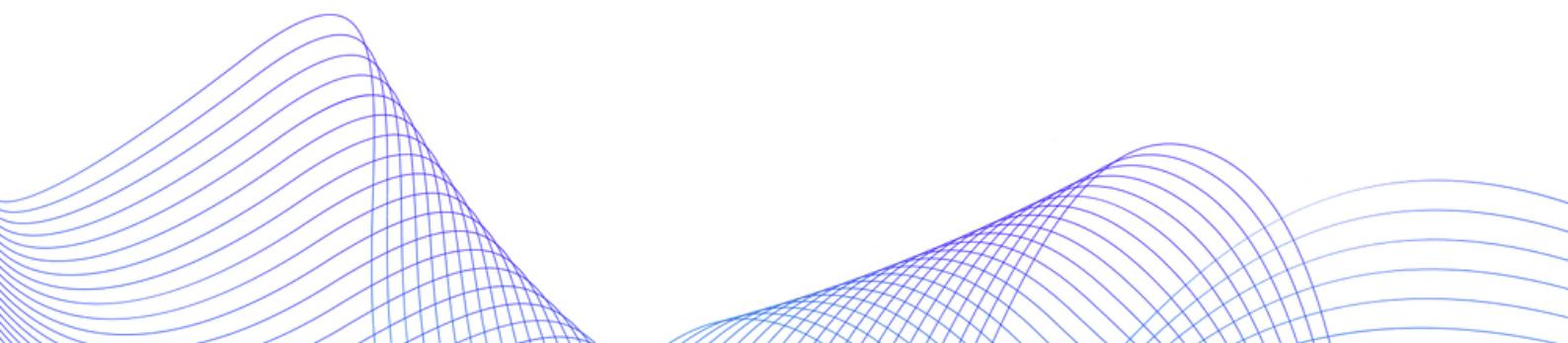
A forma de onda GFDM emprega múltiplas subportadoras para a transmissão de dados, seguindo uma abordagem semelhante à OFDM. No entanto, a GFDM abre mão da ortogonalidade característica da OFDM, o que pode resultar em interferência interportadora. Para superar esse desafio e efetuar a modulação do sinal, a GFDM utiliza filtros protótipos, os quais são aplicados para modelar individualmente cada subportadora.

Em um símbolo GFDM, um conjunto específico de subportadoras (K) na frequência transmite uma quantidade definida de subsímbolos (M) durante um determinado intervalo de tempo. Cada subsímbolo é modulado individualmente, e multiplicando o número de subportadoras (K) pelo número de subsímbolos (M), obtém-se os N símbolos de dados complexos transmitidos em cada bloco GFDM.

A geração do símbolo GFDM envolve a aplicação de filtragem a cada subsímbolo M em todas as K subportadoras, o que é fundamental para manter a energia do sinal dentro da faixa de frequência desejada e reduzir a interferência. Os filtros protótipos são deslocados circularmente, garantindo que a filtragem respeite a periodicidade do sinal tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Isso significa que a resposta ao impulso de um filtro é aplicada de forma que o fim e o começo da sequência de dados estejam conectados, como se os dados estivessem dispostos em um círculo. Essa estratégia permite que o final de um bloco de símbolos se conecte perfeitamente ao início do próximo bloco no domínio do tempo, auxiliando na prevenção da ISI.

A filtragem eficaz em cada subportadora contribui para limitar as emissões do sinal que se estendem para fora da faixa de frequência alocada, diminuindo, consequentemente, a probabilidade de interferência nos canais adjacentes. Além disso, pode auxiliar na redução da PAPR, promovendo uma distribuição mais uniforme da potência ao longo do tempo e das frequências.

Na GFDM, um único prefixo cíclico pode ser utilizado para um grupo de múltiplos subsímbolos dentro de um bloco de transmissão. Essa característica contrasta com a OFDM, onde um prefixo cíclico é adicionado a cada símbolo OFDM.



Portanto, em um bloco GFDM que contém vários subsímbolos, a quantidade total de dados transmitidos com um único prefixo cíclico é maior do que na OFDM, onde cada símbolo necessita de seu próprio prefixo cíclico. Assim, ao reduzir a frequência com que os prefixos cíclicos são necessários, a GFDM pode alcançar uma maior eficiência espectral em comparação com a OFDM.

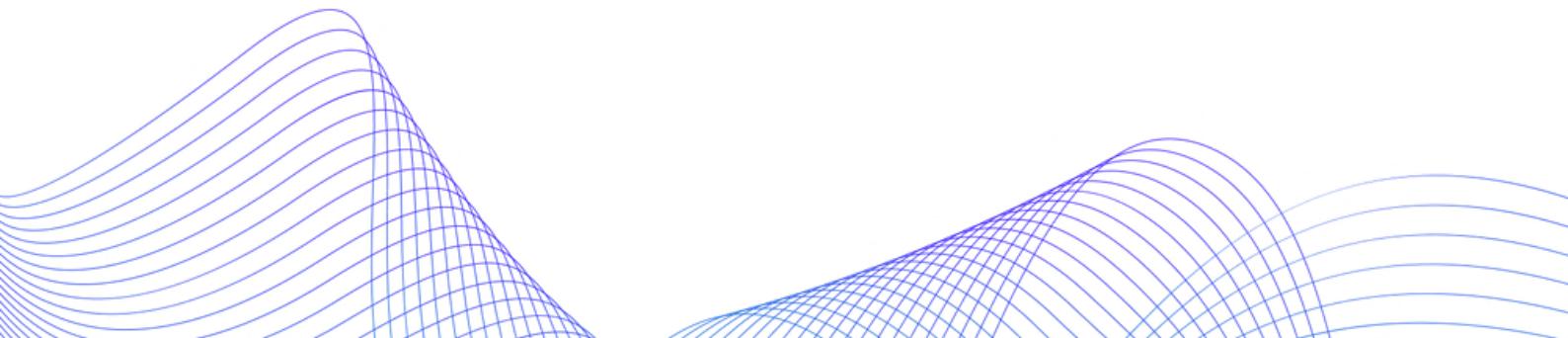
3.3 FBMC

A FBMC é uma técnica de modulação para sistemas de comunicação que, semelhante à OFDM, divide a banda de frequência em múltiplas subportadoras. No entanto, a FBMC se diferencia da OFDM por não depender da Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) para a modulação e demodulação do sinal. Em vez disso, utiliza bancos de filtros para processar as subportadoras individualmente, proporcionando maior flexibilidade e eficiência na gestão do espectro de frequência.

Cada subportadora na FBMC passa por uma filtragem individual através de um banco de filtros, que são desenvolvidos com precisão para garantir uma resposta em frequência que permita a sobreposição das subportadoras no domínio da frequência. Essa sobreposição é realizada de forma a evitar interferências entre as portadoras e, ao mesmo tempo, preservar a eficiência espectral.

Como cada subportadora é filtrada individualmente na FBMC, essa técnica é capaz de reduzir consideravelmente a energia que se propaga para fora da faixa de frequência alocada. Esse controle de dispersão espectral contribui para a diminuição da interferência nos canais adjacentes, resultando em uma melhoria na coexistência de múltiplos sinais no espectro compartilhado.

Na forma de onda FBMC, a ausência do prefixo cíclico é justificada pelo projeto avançado dos filtros empregados e pela eficácia da técnica de modulação, que, por si só, são capazes de reduzir a ISI. Essa abordagem visa otimizar a eficiência espectral, permitindo que uma porção maior do espectro seja dedicada à transmissão de dados úteis, em vez de ser utilizada por elementos de proteção. Assim, a FBMC se destaca por utilizar o espectro de maneira mais eficiente, ampliando a capacidade de transmissão de informações relevantes e melhorando a qualidade geral da comunicação.



3.4 UFMC

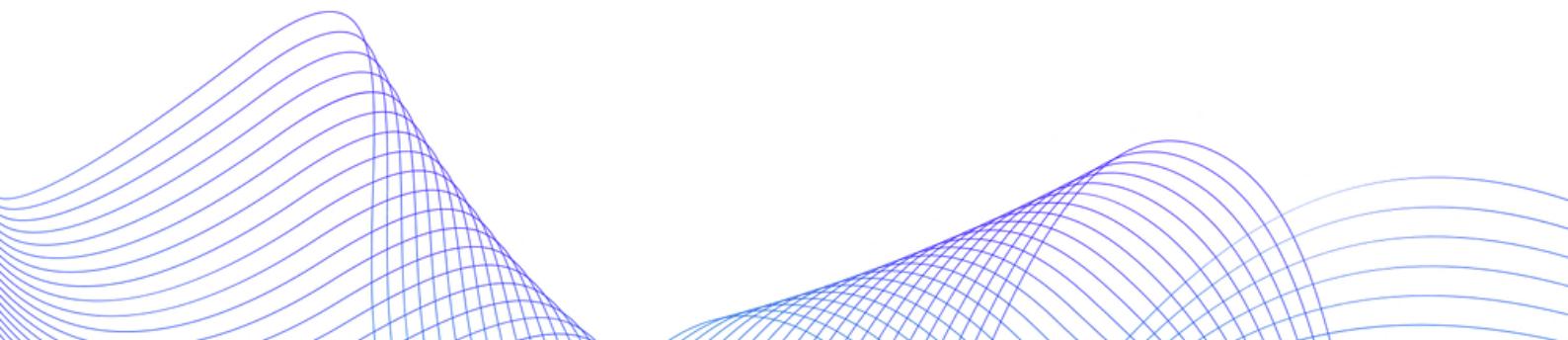
A UFMC representa uma evolução em comparação às técnicas baseadas em múltiplas portadoras, como a OFDM e a FBMC. Enquanto a OFDM se baseia em um único filtro derivado da FFT aplicado a todas as subportadoras, e a FBMC emprega uma abordagem de filtragem individualizada para cada subportadora, a UFMC adota uma estratégia intermediária. Nessa técnica, várias subportadoras são agrupadas em sub-bandas definidas, e um filtro específico é atribuído a cada grupo dessas sub-bandas. Por meio dessa solução, a UFMC elimina a necessidade do prefixo cíclico, tradicionalmente utilizado na modulação OFDM para combater a ISI.

A aplicação de filtragem em grupos de subportadoras na UFMC resulta em uma melhor contenção da largura de banda e uma redução significativa da OOB. A UFMC também contribui para a diminuição da interferência entre canais adjacentes, tornando-a uma escolha adequada para cenários de espectro compartilhado.

Um benefício adicional da UFMC em relação à FBMC é a potencial redução da latência de processamento. Essa vantagem decorre da menor complexidade associada à filtragem de sub-bandas na UFMC, em contraste com o método mais elaborado de filtragem individual de cada subportadora empregado na FBMC. Essa simplificação no processo de filtragem pode acelerar consideravelmente o processamento dos sinais, resultando em um desempenho mais ágil do sistema, o que é de extrema importância em aplicações que exigem resposta em tempo real.

3.5 OTFS

Ao contrário das técnicas convencionais, como OFDM, que operam no domínio do tempo e da frequência, o OTFS inova ao realizar a modulação de dados no domínio de atraso-Doppler. Essa abordagem permite ao OTFS superar as limitações das técnicas de modulação existentes, assegurando a ortogonalidade dos símbolos de dados em cenários de comunicação sem fio dinâmicos. Esses ambientes são caracterizados por mudanças constantes nas propriedades do canal de propagação, incluindo atenuação, dispersão temporal e variação Doppler, especialmente sob condições de alta mobilidade. Ao focar no domínio de atraso-Doppler para a transmissão de dados, a modulação OTFS adapta-se a essas variações, garantindo uma comunicação confiável mesmo nos ambientes mais desafiadores.



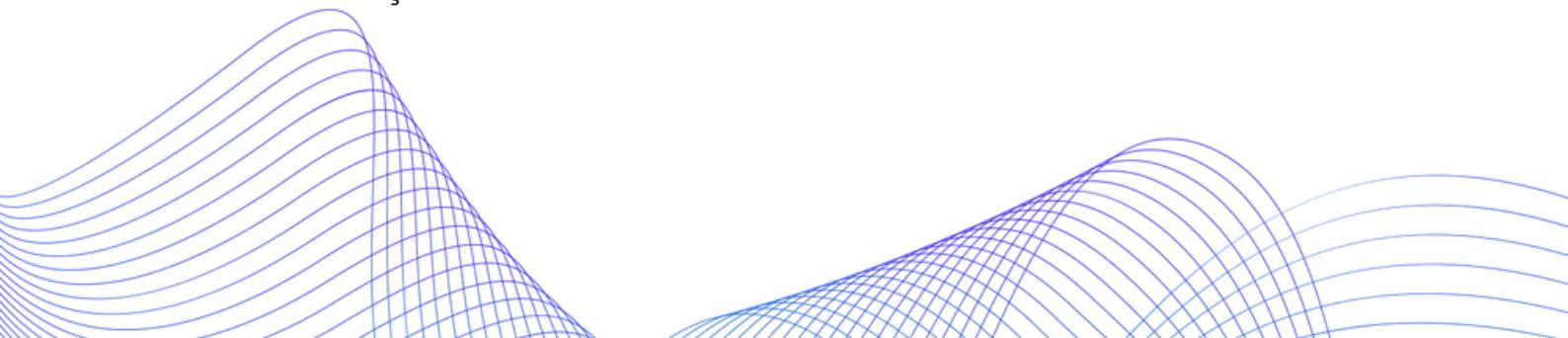
O domínio de atraso-Doppler é uma representação bidimensional empregada em processamento de sinais e comunicações sem fio para descrever as características de um canal de propagação em termos de atraso e variação na frequência.

Essa representação é particularmente útil para a análise e o projeto de sistemas de comunicação que operam em ambientes onde há movimento entre o transmissor e o receptor. Nessas condições, tanto os efeitos do Doppler, que são alterações na frequência do sinal causadas pelo movimento, quanto os múltiplos percursos, que são reflexões do sinal que geram diferentes tempos de atraso, apresentam-se como aspectos significativos.

A principal ideia do OTFS é transformar canais sujeitos a variações temporais e de frequência em canais que são invariantes tanto no tempo quanto na frequência, utilizando o domínio atraso-Doppler. Nesse método, o modulador OTFS distribui cada símbolo de dados ao longo de uma grade bidimensional composta por funções de base ortogonais selecionadas.

A Transformada Simples Finita de Fourier (SFFT, *Symplectic Finite Fourier Transform*), uma adaptação bidimensional da transformada de Fourier, é utilizada para mapear os símbolos de dados, inicialmente posicionados no domínio de atraso-Doppler, para o domínio de tempo-frequência. Esse processo de mapeamento realizado pela SFFT prepara os símbolos de dados para serem transmitidos através do canal sem fio. Ao converter os símbolos para o domínio de tempo-frequência, a SFFT melhora a representação dos dados para aproveitar as técnicas de modulação multiportadora, permitindo a transmissão simultânea de dados por meio de múltiplas subportadoras, semelhante ao que é feito na OFDM. Isso resulta em uma notável melhoria na eficiência espectral.

Antes de serem transmitidos, os símbolos de dados passam pelo processamento da Transformada Inversa Simples Finita de Fourier (ISFFT, *Inverse Symplectic Finite Fourier Transform*), que os converte do domínio de tempo-frequência para o domínio de atraso-Doppler. Essa etapa possibilita o alinhamento dos dados com as características invariantes do canal representadas nesse domínio, permitindo a exploração das vantagens da modulação OTFS para superar os desafios apresentados pelo canal. A conversão para o domínio de atraso-Doppler permite que os dados sejam adaptados para canais com múltiplos percursos e variações Doppler, fornecendo uma representação que minimiza os efeitos negativos dessas variações na transmissão.



3.6 OTSM

Na OTSM, os símbolos de informação são modulados no domínio do tempo por meio de métodos como a Transformada de Walsh-Hadamard (WHT, *Walsh-Hadamard Transform*). Essa modulação no domínio do tempo assegura a ortogonalidade entre os símbolos de informação transmitidos.

A WHT é utilizada para pré-codificar os símbolos de informação em blocos, garantindo que cada bloco seja ortogonal aos demais no domínio do tempo. Esse processo otimiza a capacidade de transmissão ao evitar interferências entre os símbolos durante a transmissão. Após a pré-codificação, as amostras resultantes passam por um processo de entrelaçamento linha-coluna, que assegura uma distribuição uniforme dos símbolos de informação ao longo do tempo. Essa técnica fortalece a robustez da transmissão contra interferências temporais, tornando a informação mais resistente a variações e perdas no canal de comunicação.

Além disso, a OTSM incorpora um processo de multiplexação, onde os símbolos de informação são multiplexados tanto no domínio do tempo quanto no domínio da sequência. Isso permite a transmissão simultânea de múltiplos símbolos de informação. Cada símbolo ocupa uma sequência de tempo distinta, diferenciando-se não apenas pelo momento de transmissão, mas também pelo número de cruzamentos por zero (sequência) que apresentam. Isso amplia a capacidade de transmissão, permitindo a transmissão simultânea de mais dados sem aumentar a interferência.

Portanto, a OTSM pode ser descrita como uma técnica que combina modulação e multiplexação, integrando elementos de ambas para realizar a transmissão eficiente de dados em sistemas de comunicação sem fio.

4. Comparação das Formas de Onda

A Tabela 2 apresenta uma comparação das diferentes formas de onda discutidas, destacando suas características técnicas e aplicabilidade. Esta análise inclui o uso do prefixo cíclico, que é um elemento essencial para evitar interferências entre símbolos.

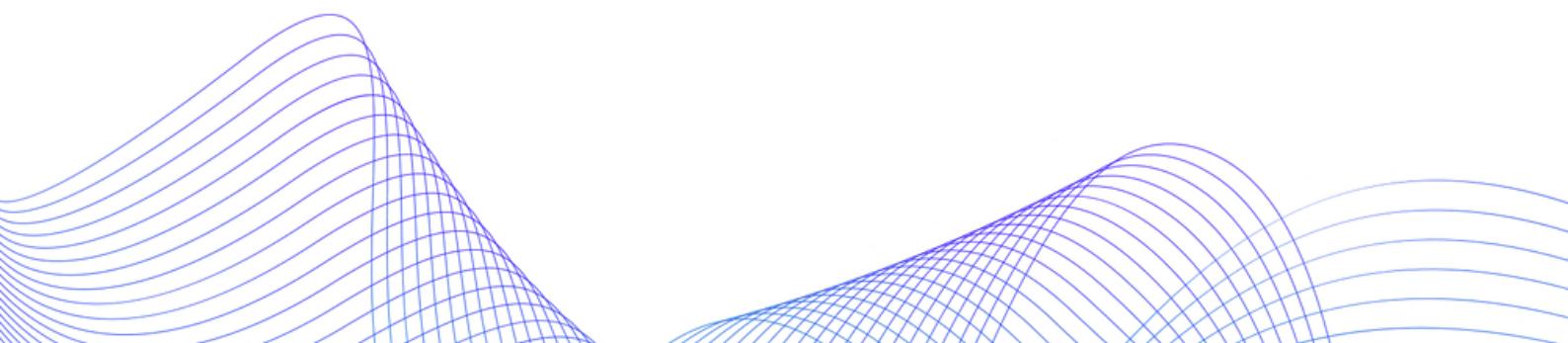
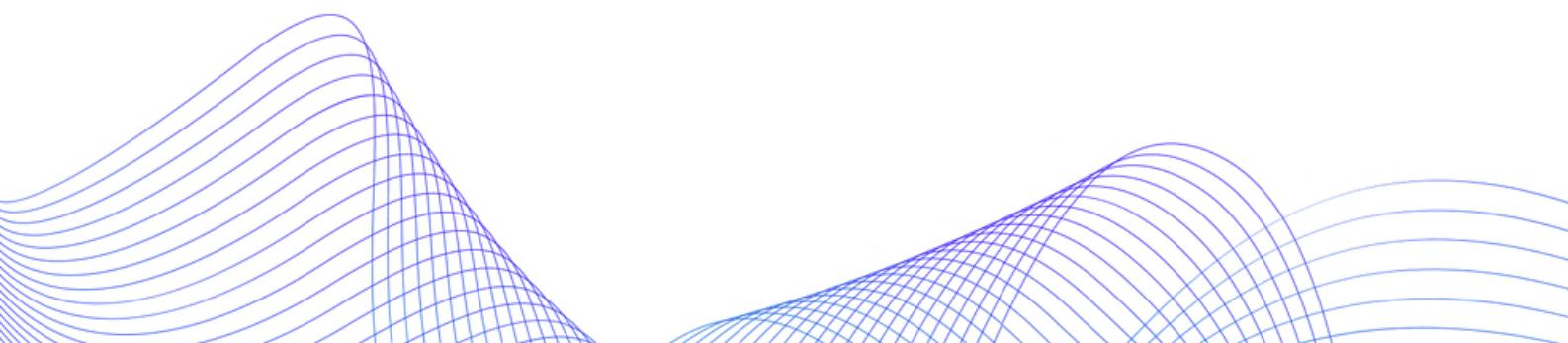


Tabela 2. Comparação entre as formas de onda.

Características	OFDM	F-OFDM	GFDM	FBMC	UFMC	OTFS	OTSM
Prefixo Cíclico	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Ortogonalidade	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim
Latência	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Baixa
OOBE	Alta	Baixa	Moderada	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
PAPR	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Moderada	Moderada
Cenários de aplicação	Comunicações sub-aquáticas Comunicações Veiculares (v2x)	Ambientes Industriais Ambientes de alta mobilidade	Comunicação entre dispositivos (M2M) Conectividade em áreas remotas	Internet das coisas (IoT) Ambientes urbanos densos	Internet das coisas (IoT) Conectividade em áreas remotas	Sistemas de Transporte Inteligente Comunicações Veiculares (v2x)	Internet das coisas (IoT) Comunicações Veiculares (v2x)

A ortogonalidade é abordada, referindo-se à capacidade das subportadoras de serem independentes e não interferirem entre si. A latência é considerada em relação ao tempo necessário para processar e transmitir o sinal através do sistema. Além disso, a tabela examina a PAPR, que afeta tanto a eficiência energética quanto o desempenho dos amplificadores de sinal, e o nível de OOBE, que indica a habilidade do sinal em manter a integridade espectral e evitar interferências em canais adjacentes.



Por fim, são explorados cenários práticos de aplicação nos quais cada tecnologia se mostra mais adequada, alinhando suas características técnicas às demandas específicas de uso.

5. Conclusão

À medida que evoluímos do 4G para o 5G e nos preparamos para o futuro 6G, formas de onda como OFDM, F-OFDM, GFDM, FBMC, UFMC, OTFS e OTSM oferecem soluções diversificadas que atendem a requisitos específicos de eficiência espectral, baixa latência, robustez contra interferências e adaptabilidade a uma variedade de ambientes de propagação.

Cada uma dessas tecnologias possui vantagens únicas que podem ser aproveitadas para otimizar o desempenho da rede em diversos cenários, desde comunicações subaquáticas até aplicações de IoT em ambientes urbanos densos. Embora a OFDM continue sendo uma escolha predominante por sua simplicidade e eficiência, alternativas como F-OFDM, GFDM, FBMC e UFMC são especialmente atraentes para aplicações que exigem menor interferência fora da banda e melhor utilização do espectro.

Tecnologias emergentes como OTFS e OTSM introduzem inovações significativas, permitindo comunicações confiáveis em condições de alta mobilidade e canais altamente dinâmicos, como os encontrados em sistemas de transporte inteligente e comunicações veiculares. Essas formas de onda são projetadas para enfrentar desafios modernos, como alta PAPR e OOBE, enquanto melhoram a qualidade da comunicação por meio de técnicas avançadas.

Portanto, a escolha da forma de onda adequada deve ser cuidadosamente considerada com base nas necessidades específicas de cada aplicação e ambiente de operação. A contínua pesquisa e desenvolvimento nessas áreas são essenciais para garantir que as redes móveis possam suportar a crescente demanda por maior capacidade, cobertura e qualidade de serviço no futuro.

