



O Impacto de Escalonadores de Recursos e Modulações no Desempenho do *Downlink* de Redes 5G Baseadas em LTE

D. F. Souza, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (UFG), Goiânia - GO
D. C. Abrahão, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (UFG), Goiânia - GO
F. H. T. Vieira, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (UFG), Goiânia - GO
V. C. M. Borges, Instituto de Informática (UFG), Goiânia - GO

Resumo—Com o desenvolvimento da próxima geração dos sistemas de comunicação móvel sem fio (5G), diversas tecnologias estão em estudo com o objetivo de se atender aos novos requisitos de desempenho em diferentes cenários de aplicação. Dentre elas, está a utilização de modulações com maior eficiência espectral em substituição à OFDM, como F-OFDM e UFMC, e também os algoritmos de escalonamento que são responsáveis pelo compartilhamento dos recursos aos usuários. Neste artigo, avaliamos a aplicação no *downlink* LTE das modulações F-OFDM e UFMC, candidatas ao 5G, comparadas à OFDM e avaliamos os escalonadores *Round Robin*, QoS Garantido e PSO ao lidar com recursos adicionais disponíveis proporcionados pelas modulações estudadas. Para isso, realizamos a análise de parâmetros de desempenho de tráfego, tais como vazão, índice de justiça, perdas e retardo médio. Em todos os escalonadores avaliados, os resultados mostraram que o enlace de *download* do LTE apresentou melhor desempenho para todos os parâmetros analisados com a modulação UFMC. O escalonador baseado em PSO, por exemplo, apresentou melhorias no retardo e vazão, enquanto o escalonador QoS Garantido obteve menor taxa de perdas, enquanto que índices de justiça mais elevados foram obtidos para os escalonadores QoS Garantido e *Round Robin*.

Palavras-chave—5G, *Long Term Evolution*, LTE, F-OFDM, UFMC.

The Impact of Resource Blocks Schedulers and Modulations on Downlink Performance of LTE-Based 5G Networks

Abstract—With the development of the next generation of mobile communications systems for 5G, several technologies are being studied in order to reach the new requirements in new application scenarios. Among them, is the use of new modulations with higher spectral efficiency in substitution of OFDM, such as F-OFDM and UFMC, and also the scheduling algorithms which are in charge of sharing resources between users. In this article, we evaluated the application of F-OFDM and UFMC, 5G modulations candidates, on LTE downlink as compared to OFDM and evaluated the

Round Robin, QoS Guaranteed and PSO schedulers dealing with additional resources provided by the tested modulations. To reach this, we compared performance considering parameters like fairness, latency, throughput and spectral efficiency. The results showed that the downlink LTE improved performance in all evaluated parameters with UFMC modulation. In fact, there was a performance improvement in all the schedulers evaluated. For example, PSO based scheduler improved latency and throughput while QoS Guaranteed reached the lowest loss, and the highest fairness were reached by QoS Guaranteed and Round Robin.

Index Terms—5G, Long Term Evolution, LTE, F-OFDM, UFMC.

I. INTRODUÇÃO

A demanda por tráfego de dados móveis tem crescido anualmente. De acordo com o relatório publicado por Cisco [1], o volume de tráfego de dados móveis mensal cresceu de 4.4 exabytes ao final de 2015 para 7.2 exabytes em 2016, ou seja, um aumento de 63% no período de 1 ano. Comparando-se os últimos 5 anos, o aumento foi de 18 vezes. Paralelamente, quase meio bilhão (429 milhões) de dispositivos móveis foram adicionados à rede, totalizando 8 bilhões de conexões. Os maiores responsáveis por esse crescimento foram os smartphones, seguidos pelos dispositivos M2M (*Machine to Machine*)[1].

Estima-se que, em 2021, o tráfego de dados móveis mensal alcançará 49 exabytes e haverá 1,5 dispositivos móveis conectados para cada habitante do planeta, totalizando 11,6 bilhões de dispositivos móveis [1].

Diante desse cenário, o sistema de comunicação móvel sem fio deverá ser capaz de prover conexão a uma quantidade massiva de usuários, atender a requisitos de altas taxas de transferência de dados e baixíssimos tempos de latência, o que é um grande desafio para qualquer tecnologia.

Apesar das constantes evoluções, há algumas limitações presentes no LTE (*Long Term Evolution*) que é o atual padrão de redes de comunicação móveis. Dentre elas, podemos citar a falta de suporte para um grande número

de conexões simultâneas e tempo de latência relativamente alto. Essas limitações podem impactar negativamente em aplicações de tempo real e suporte incompleto para conexão de diversos tipos de dispositivos (*smart meters*, veículos etc) [2].

Em 2015, o ITU (*International Telecommunication Union*) definiu alguns requisitos a serem preenchidos pela nova geração de comunicação móvel (5G), referenciada como *International Mobile Communications (IMT-2020)*, tais como: taxa de dados de até 10 Gbps, taxa de dados experimentada pelo usuário de 100 Mbps a 1 Gbps e tempo de latência da ordem de 1 ms.

De acordo com o IMT-2020, algumas tendências que irão guiar a evolução tecnológica rumo ao 5G são as seguintes: baixo tempo de latência, tanto para comunicação entre humanos quanto para comunicações entre máquinas; alta densidade de usuários; alta mobilidade; aplicações multi-mídia de alta qualidade; Internet das Coisas, tecnologias de SDN (*Software Defined Network*), dentre outras.

Atualmente, a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é amplamente adotada nos padrões de comunicação sem fio. Os mais conhecidos são o LTE e Wi-Fi IEEE 802.11. A OFDM, não obstante suas vantagens, tais como robustez ao desvanecimento por multipercurso e a facilidade de implementação, sofre com inúmeras desvantagens. Dentre elas, está o alto vazamento de potência no domínio da frequência para as bandas vizinhas ou *out-of-band emissions* (OOBE) e a alta relação entre a potência de pico e média, do inglês *Power Peak to Average Power Ratio* (PAPR).

A OOBE é uma emissão de frequência fora da largura de banda para as faixas de frequências vizinhas e que produz uma quantidade substancial de interferência, que pode interromper as comunicações nos canais sem fio adjacentes. A PAPR é a relação entre a potência máxima de uma amostra em um determinado símbolo de transmissão OFDM dividido pela potência média desse símbolo OFDM. Quando as subportadoras estão defasadas uma da outra e todos os pontos alcançam o valor máximo simultaneamente, o valor de pico do sistema pode ser muito alto em comparação com o média de todo o sistema. A PAPR impacta na eficiência energética e pode colocar restrições severas na potência de saída. Uma das principais consequências desse fato é a necessidade de uma rigorosa sincronização entre o dispositivo transmissor e receptor com o objetivo de se manter a ortogonalidade entre as subportadoras.

Assim, para se atender às expectativas geradas por diferentes tipos de serviços em um cenário 5G faz-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, tanto na arquitetura de rede atual quanto na interface aérea que faz parte da camada física do modelo OSI [2]. Neste sentido, várias modulações são consideradas candidatas a serem adotadas como padrão para a nova geração de comunicação móvel sem fio, dentre elas a F-OFDM (Filtered – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [3] e a UFMC (Universal Filtered Multicarrier) [4].

O sinal F-OFDM dispensa a banda de guarda enquanto

a UFMC dispensa tanto o uso as bandas de guarda quanto o uso do prefixo cíclico [5][6]. Conforme ilustrado na Fig. 1, as bandas de guarda são inseridas desativando as subportadoras localizadas nas bordas do espectro com o intuito de minimizar a interferência causada pelas emissões OOBE, mas inevitavelmente vem com um custo em eficiência espectral. Sem a banda de guarda é possível a utilização de uma maior quantidade de blocos de recurso para transmissão dos dados. O prefixo cíclico é a repetição do final do símbolo com o objetivo principal de mitigar a interferência gerada pelo símbolo anterior. Conforme ilustrado na Fig.2, a ausência do prefixo cíclico proporciona um aumento na duração do símbolo (T_s). Assim, mais blocos de recursos e maior duração do símbolo implicam em maior eficiência espectral, que podem ser utilizados pelos usuários das redes 5G para atender seus requisitos de desempenho.

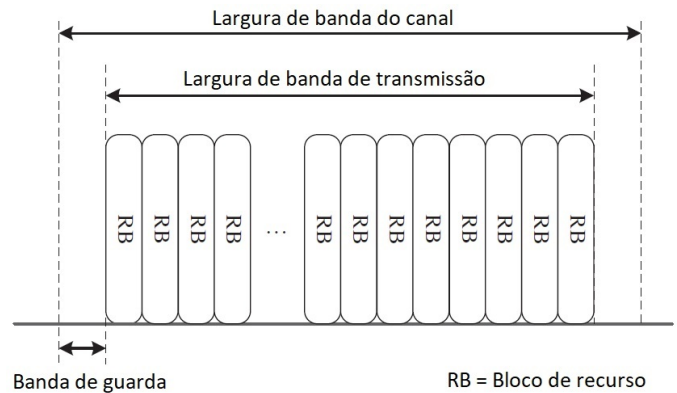


Fig. 1. Exemplo de uso de banda de guarda. Largura de banda do canal é a quantidade de recurso alocado para o sistema. Largura de banda de transmissão é a largura do espectro que é realmente utilizado para transmissão dos dados. Bloco de recurso (RB) é o conjunto de 12 subportadoras OFDM, totalizando uma largura de 180 kHz [7].

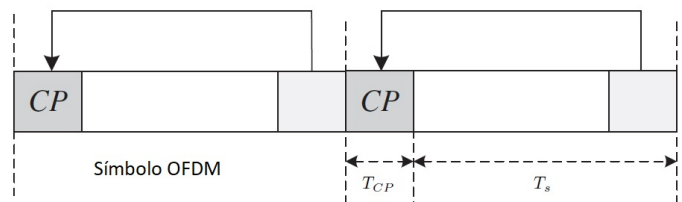


Fig. 2. Exemplo de prefixo cíclico [7].

Por outro lado, a estação base deve distribuir os blocos de recursos disponíveis aos usuários ativos na rede com o intuito de se obter um melhor desempenho e atender a diferentes necessidades de vazão, retardo, eficiência energética, taxa de perdas de bytes e outras métricas de desempenho de tráfego. Para isso, diversos algoritmos de escalonamento de blocos de recursos foram propostos na literatura, tais como *Round Robin* [8], *QoS Garantido*[9] e *Particle Swarm Optimization (PSO)*[10]. Os escalonadores são responsáveis por gerenciar a alocação dos blocos de recursos dentro do espectro definido para cada modulação.

É importante notar que há uma relação significativa en-

tre o desempenho obtido pela rede, os recursos adicionais proporcionados por modulações 5G e a alocação desses recursos aos usuários realizada pelos escalonadores. No entanto, percebe-se uma carência na avaliação comparativa das modulações OFDM, F-OFDM e UFMC aplicadas a redes 5G baseadas em sistemas LTE com os escalonadores mais empregados na literatura. Isso pode ser justificado pelo fato que na primeira, segunda e terceira gerações das redes de comunicação sem fio, uma única modulação geralmente era adotada, enquanto a quarta geração já introduziu a ideia de modulação adaptativa. Alguns pesquisadores acreditam que, devido à enorme variedade de cenários de aplicação, mais de uma modulação deverá coexistir em redes 5G e que também poderão ser usadas de forma adaptativa [2][11][12]. Assim, faz-se necessário avaliar o impacto de diferentes escalonadores aplicados a diferentes modulações e analisar os efeitos de cada um sobre os parâmetros de desempenho de tráfego.

Por este motivo, nosso principal objetivo neste trabalho é aplicar os algoritmos de escalonamento *Round Robin*, QoS Garantido e PSO, bastante conhecidos na literatura, às modulações OFDM, F-OFDM e UFMC como elemento integrante no *downlink* de uma rede 5G baseada em LTE para avaliar o ganho de desempenho nos requisitos de desempenho de tráfego obtido por cada escalonador ao lidar com recursos adicionais proporcionados por modulações mais eficientes. As métricas avaliadas são vazão total média, índice de justiça, retardo e perdas.

Este artigo divide-se conforme descrito a seguir. A Seção II mostra trabalhos relacionados ao tema tratado neste artigo. A Seção III apresenta modulações candidatas ao 5G, trazendo um resumo sobre os princípios, vantagens e desvantagens das modulações OFDM, F-OFDM e UFMC e os resultados com avaliação das tecnologias estudadas. A Seção IV descreve os escalonadores *Round Robin*, QoS Garantido e PSO. A Seção V apresenta resultados combinando diferentes escalonadores a diferentes modulações com avaliação do impacto dos escalonadores em cada uma das modulações. Por fim, na Seção VI, concluímos o artigo.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

NOS estudos apresentados por Wunder em [13], a UFMC é admitida como uma generalização da F-OFDM. Segundo o autor, a UFMC é uma técnica que possui alta granularidade, capacidade de suprimir emissões OOBE, dispensa necessidade do prefixo cíclico e possui um comprimento de filtro menor que a F-OFDM, o que a torna interessante para aplicações de Internet das Coisas (IoT). Não é apresentado, entretanto, uma avaliação do comportamento da taxa de erro de bit (BER) com a variação da relação sinal ruído (SNR), eficiência espectral e da vazão total alcançada em comparação à OFDM.

Abdoli et al [3] realizaram uma comparação entre F-OFDM e OFDM e mostraram que a F-OFDM possui uma menor emissão OOBE, BLER (Taxa de Erro de Bloco) similar e vazão total média superior à OFDM. Ficou demonstrado que a necessidade da banda de guarda para modulações de ordem mais altas e o uso do prefixo

cíclico continuam incorrendo em uma perda de eficiência espectral. Apesar dos resultados serem promissores com relação a vazão total média, o trabalho não analisou o desempenho da modulação F-OFDM e UFMC em uma rede baseada em LTE.

Nos estudos apresentados por Ijaz et al [14] compararam-se as modulações FBMC, F-OFDM, W-OFDM (*Wideband Orthogonal Frequency Division multiplexing*), UFMC e GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*) sob a ótica do espectro de potência, BER, eficiência espectral, taxa de pico de potência a média (PAPR), impactos do atraso no tempo e frequência e complexidade computacional. Não foram analisados, entretanto, aspectos referentes à eficiência energética, integração com MIMO massivo, estimativa do canal, equalização e vazão. Por fim, em [14] não foram feitas simulações aplicando-se as modulações ao enlace LTE.

Uma comparação realizada por Gerzaguet [15] entre as modulações OFDM, UFMC, FBMC e GFDM avaliou-se a eficiência espectral, densidade espectral de potência, taxa de pico de potência a média (PAPR), robustez ao sincronismo na transmissão de *uplink* e complexidade computacional. A UFMC mostrou-se como uma opção interessante no que se refere a eficiência espectral. A FBMC e GFDM destacaram-se pela baixa emissão fora da banda com relevância para aplicações com necessidade de proteção a interferências entre transmissões simultâneas. Os autores, entretanto, não realizaram implementação prática ou simulação do enlace LTE, e, também, não consideraram parâmetros de vazão total e comportamento da BER com a variação da SNR.

Nos testes realizados por Doré et al [16] as modulações OFDM, UFMC, e FBMC foram analisadas sob os aspectos de densidade espectral de potência, eficiência espectral, potência de pico a média e robustez a sincronismo na transmissão de multiusuários. A UFMC apresentou uma eficiência espectral semelhante à OFDM com uma maior robustez a um relaxamento das exigências de sincronismo, preservou a compatibilidade com algoritmos de MIMO e estimativa de canal. Já a FBMC apresentou dificuldades de adaptação a pacotes de tamanho pequeno, entretanto a ausência de banda de guarda proporciona um ganho de eficiência para aplicações de transmissão *broadcast*. Além disso, a FBMC apresentou a menor taxa de potência de pico a média (PAPR) dentre as tecnologias analisadas, porém a adaptação ao MIMO não se mostrou tão trivial quanto na OFDM. Restou, portanto, a comparação com a modulação F-OFDM e a análise das métricas de vazão total, comportamento da BER com a variação da SNR.

Nos estudos propostos por Kawser et al [17] os autores realizaram uma comparação entre os escalonadores *Round Robin* e *Proportional Fair* aplicados ao *downlink* do LTE e mostraram que o escalonador *Round Robin* confere um maior índice de justiça ao usuário enquanto o *Proportional Fair* consegue manter um maior equilíbrio entre índice de justiça e vazão. O *Round Robin*, todavia, não foi comparado com outros escalonadores da literatura, tais como QoS Garantido e PSO. Além disso, não se avaliaram

os parâmetros de desempenho de tráfego relacionados a perdas, retardo médio e não houve aplicação dos escalonadores às modulações F-OFDM e UFMC para análise de desempenho.

O escalonador apresentado por Talevski e Gavrilovska [18] é comparado com o escalonador *Maximum Carrier-to-Interference* (Max C/I) sob os aspectos de vazão e BER aplicados à OFDM. Em que pese a boa vazão agregada, foi verificado que o algoritmo Max C/I pode proporcionar uma condição ruim de canal a determinados usuários, pois realiza uma distribuição injusta de recursos. Ademais, os parâmetros retardo médio, perdas e os efeitos dos escalonadores aplicados a outras modulações não foram estudados.

Ferdosian et al [19] aplica Teoria dos Jogos com melhoria na distribuição de recurso de *downlink* LTE para prover um ganho do índice de justiça por classes de usuários e, secundariamente, atender a outros critérios de desempenho de tráfego e melhorar a vazão, entretanto não se avaliou o desempenho para as modulações F-OFDM e UFMC.

Em recentes estudos realizados por Asadollahi e Heydari [20], foi proposto o escalonador *Hybrid Weighted Exponential Logarithm-Maximum Throughput* (HWEL-MT) com o objetivo de melhorar a taxa de perdas de pacotes, latência e vazão no *downlink* da rede LTE. Seu desempenho foi comparado com os algoritmos EXP-RULE e E2M e mostrou melhorias nos parâmetros mencionados. A avaliação foi realizada considerando somente a modulação OFDM e, também, não contemplou o impacto dos algoritmos nas modulações F-OFDM e UFMC.

A pesquisa bibliográfica realizada para este trabalho não apontou existência de estudos comparativos sobre desempenho de tráfego relacionando diferentes modulações candidatas de redes 5G e escalonadores de blocos de recursos conhecidos da literatura. Nosso objetivo, portanto, será avaliar o impacto de escalonadores *Round Robin*, QoS garantido e PSO e modulações OFDM, F-OFDM e UFMC sobre o tráfego de dados. Nas próximas seções serão descritos detalhes desses mecanismos para possibilitar um melhor entendimento da avaliação.

III. MODULAÇÕES CANDIDATAS AO 5G

Nesta seção é feito um breve resumo da modulação OFDM e algumas das modulações que mais fortemente estão sendo consideradas pela literatura como candidatas a serem adotadas na padronização do conjunto de tecnologias empregadas no 5G

A. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

O sistema LTE, introduzido pelo 3GPP Release 8, em 2008, utiliza a modulação OFDM na transmissão de *downlink*, o que permite maior liberdade no escalonamento de canal e na alocação de largura de banda flexível por meio da variação do número de subportadoras utilizadas na transmissão [21].

A OFDM é uma técnica de transmissão sobre múltiplas frequências, baseada na ideia de divisão do canal em

várias subportadoras ortogonais entre si e com larguras de banda iguais. A ortogonalidade entre elas torna possível arranjá-las de tal maneira que suas larguras de banda se sobreponham e ainda se consiga recuperar a informação sem interferência entre subportadoras adjacentes.

Entre as principais vantagens do esquema de transmissão OFDM podemos citar as seguintes [21]:

- Robustez aos efeitos de desvanecimento multipercurso na transmissão do sinal.
- Simplicidade de implementação com mapeamento de bits feitos por uso de IFFT/FFT.
- Flexibilidade de adaptação a diferentes disponibilidades de espectro ajustando o número de subportadoras à largura de banda.
- Modulação adaptativa na qual é possível escolher a melhor modulação de acordo com o SINR de cada subcanal.
- Fácil integração com sistemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

O recurso físico básico do enlace de descida LTE pode ser visto como uma grade de recursos tempo-frequência, em que cada elemento de recurso corresponde a uma subportadora durante o intervalo de um símbolo OFDM, conforme ilustrado na Fig. 3.

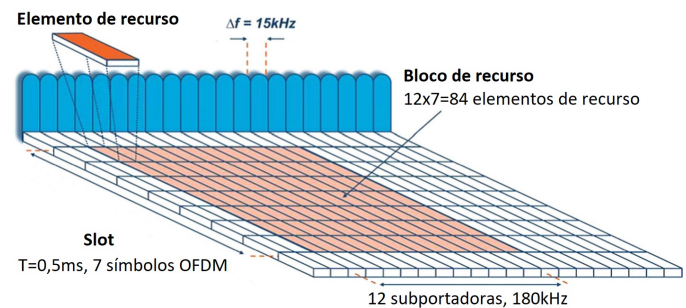


Fig. 3. Estrutura de um bloco de recurso com prefixo cíclico normal [22].

No enlace de descida LTE, são utilizados dois comprimentos de prefixo cíclico, normal e estendido, correspondendo a sete e seis símbolos OFDM por janela de tempo, respectivamente [22]. A inserção do prefixo cíclico tem a função de tornar o sinal OFDM insensível à dispersão temporal do canal de rádio, causado pelo desvanecimento de multipercurso. A dispersão temporal causa perda da ortogonalidade do sinal, e produz interferência entre as subportadoras.

No domínio da frequência, as subportadoras do enlace de *download* são agrupadas em blocos de recurso, no qual cada bloco é composto por 12 subportadoras consecutivas de 15kHz durante uma janela de 0,5ms, que totaliza uma largura de banda de 180 kHz. No caso do prefixo cíclico normal, portanto, cada bloco de recurso é composto por 84 elementos de recurso, como podemos ver na área em laranja na Fig. 3.

No LTE, o canal compartilhado de *downlink* DL-SCH (*Downlink Shared Channel*) é um canal de transporte

usado para a transmissão de dados de usuário, para o controle dedicado e para informações do sistema do *downlink* e de camadas superiores específicas do usuário. No DLSCCH está prevista a adição de bits de verificação de redundância cíclica CRC (*Cyclic Redundancy Check*) e a codificação de canal, baseada em códigos turbo.

Por outro lado, o canal físico compartilhado de *downlink* PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) é o canal físico que transporta os dados codificados. No canal PDSCH do LTE *Release* 8, está previsto o embaralhamento (*scrambling*) e as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM [21].

Para se obter informações a respeito das condições do canal de comunicação do usuário, o LTE faz uso de sinais de referência que realizam o *feedback* da qualidade do canal *Channel Quality Indicator* (CQI). Baseado na estimativa da qualidade de canal dos usuários e tendo em vista os requisitos de parâmetros de QoS, os algoritmos de alocação de blocos de recurso tomam decisões de escalonamento para o atendimento das demandas dos usuários e operam com um esquema de modulação e codificação *Modulation and Coding Scheme* (MCS) definido.

Considere que a transmissão de *downlink* do sistema LTE com N blocos de escalonamento (SB – *Scheduling Block*), em que cada SB é alocado com a mesma potência, assumindo que k usuários são servidos por uma estação base (BS – *Base Station*) e que a taxa de dados mínima exigida pelo k -ésimo usuário seja R_k bits/s. Considere, ainda, que um bloco de escalonamento (SB) é composto por N_s símbolos OFDM consecutivos no domínio do tempo e N_{SC} subportadoras consecutivas no domínio da frequência e que existem sinais pilotos e de controle nos blocos de escalonamento, apenas $N_{SC}^{(d)}(s)$ das N_{SC} subportadoras podem ser utilizadas para transferência de dados no s -ésimo símbolo OFDM, sendo $s \in \{1, 2, \dots, N_s\}$ e $N_{SC}^{(d)}(s) \leq N_{SC}$. Seja $R_j^{(c)}$ a taxa de código associada com o MCS $j \in \{1, 2, \dots, J\}$, sendo J é o número total de MCS suportados na transmissão, M_j é o tamanho da constelação do MCS j e T_S é a duração do símbolo OFDM. Então, a taxa de bits $r^{(j)}$ alcançada por um único SB com o MCS j é dada por [9]:

$$r^{(j)} = \frac{R_j^{(c)} \log_2(M_j)}{T_S N_s} \sum_{s=1}^{N_s} N_{SC}^{(d)}(s) \quad (1)$$

Apesar de ter se consolidado como a técnica dominante utilizada nos atuais sistemas de comunicação sem fio, tais como LTE e Wi-Fi IEEE 802.11, a OFDM possui algumas características indesejadas que impedem sua aplicação ao 5G. Dentre elas podemos citar o fato de que, durante a transmissão, desvanecimentos e distorções no sinal, por exemplo pela seletividade em frequência do canal de rádio, podem desfazer a estrutura em frequência dos recursos físicos e levar à interferência entre subportadoras.

Para lidar com esse problema, a OFDM faz a inserção de uma redundância, chamada prefixo cíclico, que consiste em copiar a última parte do símbolo OFDM e inserir no seu início, incrementando assim o tamanho do símbolo, com o objetivo de garantir que as réplicas atrasadas de um

sinal OFDM sempre formarão um símbolo completo dentro da janela FFT. A aplicação, entretanto, dessa técnica de inserção de prefixo cíclico causa uma perda de fração da potência do sinal utilizada na transmissão, pois parte da potência total é utilizada na transmissão do prefixo, e à perda na largura de banda, pois reduz a taxa total de transmissão sem redução da largura de banda.

Outra característica indesejada da OFDM é que seu sinal básico decai muito vagarosamente. Essa emissão fora de banda é causada pelo formato do sinal como um pulso retangular. Na prática, um filtro pode ser usado para suprimir essa emissão fora de banda, consumindo em torno de 10% da largura de banda total em forma de banda de guarda.

Além disso, a OFDM possui uma alta relação de potência de pico a média (PAPR), o que acaba por reduzir a eficiência e aumenta o consumo de energia nos dispositivos.

Por fim, para se obter um bom desempenho e fazer uso de seus benefícios, a OFDM possui a necessidade de se manter um rigoroso sincronismo entre o transmissor e o receptor. Para garantir esse sincronismo, o LTE faz uso de sinais de referência inseridos no sinal transmitido. O uso dessa sinalização pode causar uma sobrecarga que cresce à medida que o número de usuários na rede aumenta, o que pode se tornar uma séria restrição ao 5G, na qual se prevê cenários com conexões massivas e aplicações de comunicação orientadas à máquinas [5][12].

B. Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing (F-OFDM)

Uma das modulações candidatas ao 5G é a *Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (F-OFDM). Como a operação de convolução no domínio do tempo é igual a uma operação de multiplicação no domínio da frequência, esse sistema pode ser visto como uma modulação multiportadora com janelas no domínio da frequência, em que a largura da janela é de fato a largura da banda do filtro, intencionalmente concebida para cobrir uma determinada sub-banda.

Nessa abordagem, a densidade espectral de potência de toda a sub-banda torna-se bem localizada sem alterar o impulso retangular do símbolo OFDM. Para esse fim, o sinal da OFDM é passado através de um filtro bem localizado em frequência, cuja largura de banda está próxima da largura de banda da sub-banda. Como resultado, apenas algumas subportadoras próximas as bordas são afetadas pelo filtro, uma vez que o filtro suprime os seus lóbulos laterais.

O sinal F-OFDM é composto de blocos de k sub-símbolos OFDM com comprimento $M + L_{cp}$, sendo L_{cp} o tamanho do prefixo cíclico e M a quantidade de subportadoras. Esses blocos são aplicados a um filtro f_i no domínio do tempo de comprimento L para cada sub-banda i , e produz um sinal F-OFDM que pode ser definido para $k \in [-L_{cp}, KM + (K - 1)L_{cp} + L - 2]$, que é dado por:

$$S_{F-OFDM}[k] = \sum_{i=1}^B \sum_{n=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} c_{m,n}^i e^{j \frac{2\pi(k-l-nL_{CP})m}{M}} f_i[l] \quad (2)$$

em que $c_{m,n}^i$ é o valor complexo do símbolo de uma subportadora m , n o sub-símbolo, i o índice da sub-banda e B a quantidade de sub-bandas do sinal F-OFDM [7].

Nota-se que o intervalo de transição entre blocos consecutivos, resultante do filtro, desempenha o papel do intervalo de guarda e protege os símbolos transmitidos, desde que L seja maior ou igual a dispersão temporal máxima introduzida por um canal de múltiplos percursos (*delay spread*). Em [6] é mostrado que o sinal F-OFDM, utilizando um filtro *Windowed Sinc (Root Raised Cosine window)* de ordem 256 e 512, pode-se dispensar a banda de guarda, mesmo para taxa de codificação de 64-QAM, em canais com *delay spread* de 30 ns e 1000 ns. Sem a banda de guarda é possível a utilização de uma maior quantidade de blocos de recurso em uma mesma portadora.

C. Universal Filtered Multicarrier (UFMC)

Na modulação UFMC é realizada uma filtragem por grupo de subportadoras com o objetivo de reduzir o nível das emissões fora da banda (OOBE) e, conseqüentemente, minimizar interferência interportadoras entre usuários adjacentes no caso de transmissões assíncronas [4]. A UFMC, assim, é considerada como uma generalização da F-OFDM, conforme ilustrado na Fig. 4.

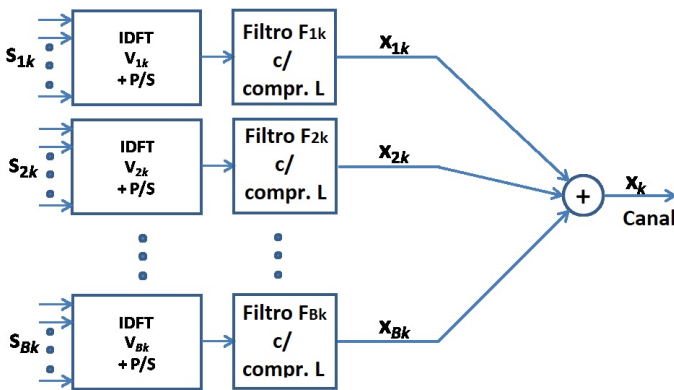


Fig. 4. Arquitetura do transmissor Universal Filtered Multicarrier [5].

No domínio do tempo, o vetor transmissão de um determinado símbolo multiportadoras de um usuário k é a superposição da largura de banda com o filtro de comprimento L e FFT de comprimento N , conforme (3).

$$\mathbf{X}_{k[(N+L-1) \times 1]} = \sum_{i=1}^B \mathbf{F}_{ik[(N+L-1) \times 1]} \mathbf{V}_{ik[N \times n_i]} \mathbf{S}_{ik[n_i \times 1]} \quad (3)$$

Para cada sub-banda B , o i ésimo símbolo QAM de índice i é convertido para o domínio do tempo por meio da matriz \mathbf{V}_i da Transformada Discreta Inversa Rápida de

Fourier (IDFT). \mathbf{V}_i inclui as colunas relevantes da matriz inversa de Fourier de acordo com a posição da respectiva sub-banda dentro do espectro de frequência disponível. \mathbf{F}_i é a matriz Toeplitz, composta pela resposta ao impulso do filtro. Pode-se notar que não há sobreposição entre símbolos adjacentes da UFMC.

A filtragem por grupo de subportadoras traz uma flexibilidade adicional que é o comprimento do filtro. Com isso, a UFMC possui uma melhor resposta a rajadas curtas de dados e uma melhor operação em fragmentos de bandas. A supressão dos lóbulos laterais é feita entre blocos de recursos e não mais entre subportadoras. É possível, assim, obter um símbolo com uma proteção suave contra a interferência intersimbólica, bem como uma maior robustez no acesso a múltiplos usuários que não estejam perfeitamente sincronizados no tempo. Dessa forma, devido à possibilidade de se reduzir as bandas de guarda e evitar o uso do prefixo cíclico, a UFMC proporciona uma eficiência espectral superior a OFDM [5].

A UFMC pode ser utilizada com subportadoras de larguras de banda e comprimentos de filtros diferentes a cada sub-banda para cada usuário, que possibilita uma duração de símbolo personalizada. Essa característica permite que a UFMC seja utilizada em esquemas de modulação adaptativos e pode ser melhor ajustada a diferentes aspectos da comunicação, tais como tempo de atraso, efeito Doppler e perfil do usuário [5].

A Tabela I apresenta um comparativo entre as modulações comentadas neste artigo de acordo com alguns dos principais aspectos relevantes para o 5G, tais como eficiência espectral, MIMO, compatibilidade com Rádio Cognitivo, cenários de aplicação 5G, eficiência energética, emissões OOBE.

TABELA I
COMPARATIVO DAS MODULAÇÕES OFDM, F-OFDM E UFMC.

	OFDM	F-OFDM	UFMC
Eficiência Espectral	Baixa	Baixa	Alta
MIMO	Sim	Sim	Sim
Fácil Compatibilidade com Rádio Cognitivo	Não	Sim	Não
Cenários de Aplicação	eMBB	eMBB uRLLC	eMBB mMTC
Eficiência Energética	Muito Baixa	Alta	Alta
OOBE	Muito Alta	Média	Baixa

Dentre as 3 modulações ilustradas na Tabela I, a UFMC é modulação com maior flexibilidade e maior eficiência energética devido à possibilidade de utilização de uma sub-banda bastante estreita, posto que realiza uma filtragem por grupo de subportadoras. A compatibilidade com MIMO é outra vantagem. Por esses motivos, a UFMC torna-se uma candidata para a aplicação nos cenários de ambientes ultradensos e de evolução de redes móveis.

Por outro lado, a F-OFDM consegue manter uma emissão fora de banda (OOBE) melhor que a OFDM, com boa flexibilidade na alocação de recursos, possibilidade

de aplicação a Rádio Cognitivo e fácil compatibilidade com MIMO. Apesar da redução da banda de guarda, a F-OFDM ainda não dispensa totalmente o uso do prefixo cíclico para esquemas de modulação de ordem mais alta, o que acaba por incorrer em uma perda da eficiência espectral. No caso da F-OFDM, os cenários mais promissores para aplicação são os seguintes: Evolução de Redes Móveis (eMBB), centralizada no tráfego de dados gerado pelo acesso a conteúdos multimídia, serviços, dados e Comunicações com Latência Ultrabaixa (uRLLC), com requisitos de qualidade de serviço bastante rigorosos, tais como vazão, latência e disponibilidade [23].

D. Avaliação das Tecnologias

A fim de realizar uma análise comparativa entre as modulações estudadas, foram feitas simulações computacionais no Matlab® com as modulações F-OFDM e UFMC aplicadas ao *downlink* do sistema LTE considerando-se os canais PDSCH e DLSCCH. Os resultados foram comparados com a modulação OFDM. Devido a redução da banda de guarda a níveis mínimos, foi considerado um aumento de 10% na quantidade de blocos de recursos disponíveis para a modulação F-OFDM e um acréscimo de 16,67% para a modulação UFMC por dispensar também o prefixo cíclico.

As características do cenário da simulação são apresentadas na Tabela II. Esses parâmetros equivalem às condições reais das operadoras em que o usuário está em movimento.

TABELA II
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO ADOTADOS NA AVALIAÇÃO DAS MODULAÇÕES OFDM, F-OFDM E UFMC.

	OFDM	F-OFDM	UFMC
Número de SBs	50	55	55
Prefixo cíclico	Normal	Normal	Não
Banda de guarda	Sim	Não	Não
Tempo de simulação	10 <i>subframes</i>		
Largura da subportadora	15 kHz		
Duração de um <i>slot</i>	0,5 ms		
Largura de banda	10 MHz		
Tamanho do <i>subframe</i>	1 ms		
Frequência da portadora	2 GHz		
Modo de transmissão	Antena única		
Modelo de propagação multipercurso	EVA (<i>Extended Vehicular A model</i>)		

Com os resultados obtidos na simulação observa-se que as modulações OFDM e F-OFDM apresentaram comportamentos de taxa de erro de bloco (BLER) bastante parecidos em relação à variação da relação sinal ruído (SNR), corroborando com os resultados obtidos por Abdoli et al [3]. Como exemplo, a Fig. 5 ilustra esse comportamento para o *Channel Quality Indicator* (CQI) 10 em que a modulação utilizada é 64-QAM. A UFMC apresentou a maior taxa de BLER, sendo ligeiramente superior às

anteriores. Percebe-se, portanto, que quanto maior a SNR essa característica fica mais acentuada.

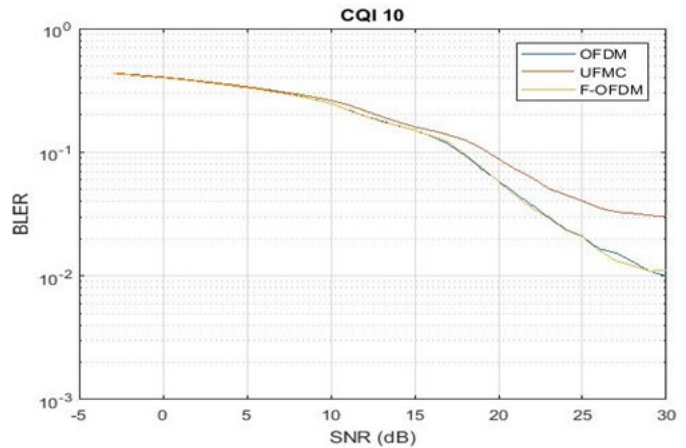


Fig. 5. Comportamento da BLER com a variação do SNR para o CQI 10.

Pelo fato da UFMC ter a possibilidade de utilizar mais blocos de recursos para a transmissão de dados, é possível obter uma maior vazão ao custo de uma taxa de perda de blocos ligeiramente maior que as modulações OFDM e F-OFDM. A Tabela III mostra que a UFMC apresentou a maior taxa de vazão média dentre as modulações comparadas com ganho de 16% em relação a OFDM enquanto a F-OFDM, que havia apresentado uma curva de BLER similar a OFDM, apresentou uma vazão 10% maior.

TABELA III
VAZÃO TOTAL MÉDIA AGREGADA E EFICIÊNCIA ESPECTRAL.

	OFDM	F-OFDM	UFMC
Vazão média agregada (Mbps)	117,3	129,0	136,1
Eficiência Espectral (bps/Hz)	11,7	12,9	13,6

Comparando-se a eficiência espectral das modulações analisadas, a UFMC apresentou a maior eficiência espectral dentre as modulações comparadas com 13,6 bps/Hz, o que convalida os resultados obtidos por [14]. A F-OFDM apresentou uma eficiência espectral de 12,9 bps/Hz, com desempenho superior a OFDM e inferior ao UFMC. O pior desempenho, mais uma vez, ficou por conta da modulação OFDM, ressaltando uma de suas maiores deficiências apontadas na literatura, ou seja, baixa eficiência espectral.

Outra métrica comparada é a vazão alcançada por um único bloco de recurso dada por (1). A Tabela IV mostra a taxa de bits alcançada por cada CQI das modulações comparadas considerando a SNR na qual a BLER atinge o valor esperado de 10⁻¹. É possível perceber que, devido à maior quantidade de recursos disponíveis, as modulações F-OFDM e UFMC apresentaram melhor desempenho que a OFDM para todas as condições de canais. Isso significa que o mesmo usuário com determinada condição de canal poderia obter um melhor desempenho de vazão ao fazer uso de uma modulação mais eficiente.

TABELA IV
VAZÃO TOTAL PARA CADA MCS.

Índice CQI	Modulação	Taxa de Código (x1024)	OFDM (Mbps)	F-OFDM (Mbps)	UFMC (Mbps)
1	QPSK	78	7,8	8,5	9,0
2	QPSK	120	12,0	13,2	13,9
3	QPSK	193	19,3	21,2	21,4
4	QPSK	308	30,8	33,8	35,7
5	QPSK	449	44,9	49,4	52,1
6	QPSK	602	60,2	66,2	69,8
7	16-QAM	378	75,6	83,2	87,7
8	16-QAM	490	98,0	107,8	113,7
9	16-QAM	616	123,2	135,5	142,9
10	64-QAM	466	139,8	153,1	162,2
11	64-QAM	567	170,1	187,1	197,3
12	64-QAM	666	199,8	219,8	231,8
13	64-QAM	772	231,6	254,8	268,7
14	64-QAM	873	261,9	288,1	303,8
15	64-QAM	948	284,4	312,8	329,9

IV. DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS ESCALONADORES

Nesta seção são apresentados 3 dos algoritmos de escalonamento de blocos de recurso em redes LTE que estão entre os mais empregados na literatura e que foram avaliados neste estudo. O mapeamento da variação da BLER x SNR está descrito na subseção IV-D e os resultados com a análise comparativa dos algoritmos combinadas com as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC são mostrados na subseção V.

A. Round Robin

O algoritmo de escalonamento *Round Robin* é um dos algoritmos mais simples conhecidos na literatura. Ele não considera a qualidade do canal do usuário nem busca atender a requisitos mínimos de desempenho.

O *Round Robin* consiste em atribuir uma fração de tempo para cada processo em partes iguais e de forma circular, manipulando todos os processos sem prioridades. Por isso, esse escalonador tende a realizar uma distribuição homogênea dos recursos disponíveis e caracteriza-se por apresentar um bom índice de justiça entre os usuários, baixo desempenho de vazão agregada e retardo médio [24][25].

A Fig. 6 ilustra o compartilhamento de recurso entre dois usuários. No TTI1 são alocados 100% dos recursos disponíveis a um usuário e no TTI2 100% dos recursos são alocados ao outro usuário. Assim, ao longo de todo o período de simulação, cada usuário terá 50% dos recursos totais disponíveis.

No algoritmo *Round Robin* considerado neste artigo, o primeiro usuário da fila é servido com todo o espectro de frequência durante um intervalo de transmissão (TTI) específico, independentemente da condição do canal. No TTI seguinte, todos os recursos estarão disponíveis ao próximo usuário e aquele servido no TTI anterior é colocado no final da fila. O algoritmo continua em uma repetição cíclica.

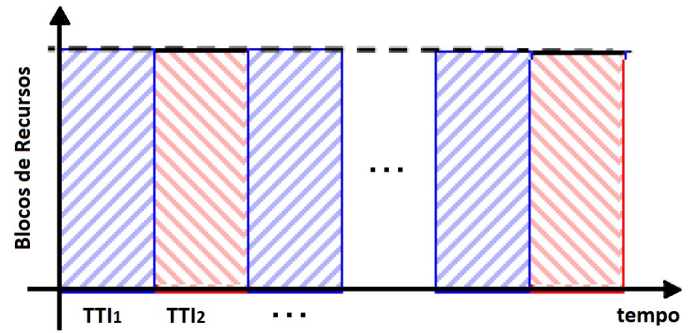


Fig. 6. Compartilhamento de recursos com o Round Robin. [25]

B. Algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO)

O *Particle Swarm Optimization* (PSO) [10] é um algoritmo de otimização estocástica, sub-ótima, baseada em população, que é chamada de enxame, e cada solução do problema é chamada de partícula. O PSO padrão caracteriza-se por priorizar a vazão total do sistema obtendo um baixo valor de retardo médio, entretanto, por priorizar os usuários com melhor condição de canal, o PSO pode resultar em um índice de justiça menos elevado com um número maior de usuários na rede.

No algoritmo PSO padrão, cada partícula possui sua própria posição, velocidade e a melhor posição encontrada até o momento. A posição de cada partícula representa uma possível solução do problema de otimização que se deseja resolver.

Na inicialização, cada partícula possui posição e velocidade aleatórias. A posição e velocidade de cada partícula é atualizada conforme uma função de otimização chamada de Função Objetivo, responsável pela obtenção da melhor solução. As posições e velocidades das partículas são atualizadas até que um critério de parada, pré-estabelecido, seja atingido. As posições e velocidades das partículas são atualizadas segundo as seguintes equações:

$$v_{t+1} = wv_t + r_1c_1(P_t - X_t) + r_2c_2(G_t - X_t) \quad (4)$$

$$X_{t+1} = X_t + v_{t+1} \quad (5)$$

em que w é o peso de inércia, c_1 e c_2 são taxas de aprendizagem, r_1 e r_2 são dois números aleatórios gerados segundo uma distribuição uniforme [0,1], v_t , X_t , P_t e G_t são, respectivamente, velocidade, posição, melhor posição da partícula e a melhor posição da população no instante de tempo t .

A descrição detalhada do funcionamento do algoritmo de escalonamento PSO é apresentada a seguir [10]:

Algoritmo 1: Algoritmo de escalonamento PSO

- 1) Inicializa a posição X_0 e velocidade v_0 de cada partícula;
- 2) Define o número máximo de iterações a serem realizadas pelo algoritmo PSO;
- 3) Para cada partícula, faça o seguinte:
Calcule a Função Objetivo. Se o valor encontrado para partícula for melhor que seu próprio histórico ($pBest$), defina a partícula atual como $pBest$;

- 4) Encontre a partícula com a melhor Função Objetivo e defina-a como $gBest$;
- 5) Para cada partícula, faça:
Calcule sua velocidade, conforme Eq. (4) e atualize sua posição, conforme Eq. (5);
- 6) Se o número máximo de iterações foi atingido, Fim.
Se não, retorne ao passo 2;

Com o objetivo de aplicar o algoritmo PSO para solucionar o problema de escalonamento de recursos em redes LTE utiliza-se a versão modificada da PSO que discretiza a posição e a velocidade das partículas segundo a Eq. 6 [10]:

$$INT(r) = \begin{cases} \text{floor}(r), & \text{se } \text{rand} > r - \text{floor}(r) \\ \text{ceil}(r), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

em que $\text{floor}(r)$ e $\text{ceil}(r)$ são funções de arredondamento para o maior inteiro menor que r e menor inteiro maior que r , respectivamente, e rand é um número aleatório gerado segundo uma distribuição uniforme $[0,1]$.

A PSO padrão não possui restrições, assim, a restrição de taxa de dados mínima dos usuários para garantir QoS é convertida em uma função de penalidade que transforma um problema de otimização com restrição em uma otimização sem restrição. A função de Penalidade é dada por:

$$Penalidade = \sum_{k=1}^K [\min(0, r_k - R_k)]^2 \quad (7)$$

em que K é quantidade de usuários na rede, R_k é a taxa mínima exigida pelo usuário e r_k é a taxa de dados alcançada pelo usuário k .

Com base na função Penalidade, a função Objetivo é definida como:

$$Objetivo = \sum_{k=1}^K r_k(t) - Penalidade \quad (8)$$

O algoritmo PSO realiza a otimização avaliando os custos de cada solução (partícula) por meio da Função Objetivo. Os menores custos são memorizados por partícula da população e utilizados no algoritmo.

O PSO, assim, caracteriza-se por priorizar a vazão total do sistema, obtendo um baixo valor de retardo médio sem se preocupar com o índice de justiça. Outra característica do PSO é que, dada a sua natureza iterativa este algoritmo tende a ser lento, o que dificulta sua aplicação ao escalonamento de recursos em tempo real.

C. Algoritmo de Alocação QoS Garantido

O Algoritmo de alocação de recurso QoS Garantido proposto por [9] surgiu com o objetivo de reduzir a complexidade computacional do problema de otimização da alocação de recursos a multiusuários para maximizar a vazão agregada e atender à restrições de taxas mínimas para cada usuário considerando-se os respectivos ganhos médios de canal.

O QoS Garantido compreende principalmente dois passos:

- Estima-se o número de SBs requeridos para cada usuário baseados nas taxas mínimas exigidas, considerando-se os respectivos ganhos médios de canal.
- Aloca-se os SBs de acordo com a prioridade e atendendo-se às exigências de taxas mínimas de cada usuário.

Os processos detalhados para cada passo estão descritos a seguir:

- 1) *Estimativa do número de SBs para cada usuário*
 - a) *Cálculo do ganho de canal para cada usuário*
Como o mesmo MCS é adotado para todos os SBs alocados a determinado usuário, considera-se a condição média do canal ao invés do ganho individual de cada SB. Para reduzir a sobrecarga de respostas da qualidade do canal, pode ser adotado um método baseado no CQI *threshold* λ_k para cada usuário k . A cada intervalo de escalonamento, o usuário retorna apenas os valores de CQI maiores que λ_k . Para os SBs que não reportaram a qualidade de canal para o usuário k , assume-se que seu CQI seja zero. Diferentes usuários podem ter diferentes valores de λ_k . Seja g_k e α_k o ganho de canal e a quantidade de SBs que reportaram a qualidade canal para o usuário k , respectivamente, o ganho médio de canal para o k -ésimo usuário é dado por:

$$\bar{g}_k = \frac{1}{\alpha_k} \sum_{n=1}^{\alpha_k} g_{k,n}, \quad g_{k,n} \geq \lambda_k, \quad \alpha_k \leq N \quad (9)$$

- b) *Estimativa do número de SBs requeridos por cada usuário.*

Após obter o ganho médio de canal, o número de SBs para cada usuário pode ser calculado pela razão entre taxa mínima requerida e \bar{g}_k . Sendo N_k o número de SBs alocados ao usuário k , deve-se satisfazer as seguintes condições:

$$\frac{R_1}{\bar{g}_1} : \frac{R_2}{\bar{g}_2} : \dots : \frac{R_k}{\bar{g}_k} = \phi_1 : \phi_2 : \dots : \phi_k, \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K \phi_k = 1, \quad (11)$$

$$N_1 : N_2 : \dots : N_k = \phi_1 : \phi_2 : \dots : \phi_k \quad (12)$$

O número de SBs alocados ao usuário k é proporcional a taxa mínima requerida e inversamente proporcional ao seu ganho médio de canal. Essas condições são razoáveis já que quanto melhor condição de canal mais dados podem ser transmitidos por unidade de recurso e menos SBs precisam ser alocados para uma determinada taxa requerida. Assim, a quantidade de SBs alocadas a cada usuário pode ser estimada por:

$$N_k = \lceil N\phi_k \rceil \quad (13)$$

2) *Alocação dos SBs aos usuários*

Nos sistemas LTE, todos os SBs alocados a um determinado usuário devem adotar o mesmo esquema de modulação MCS. Quando os SBs alocados possuem diferentes qualidades de canais em termos de CQI, o MCS deve ser escolhido de acordo com o menor CQI para garantir que os dados transmitidos em cada SB sejam recebidos corretamente. Obviamente, isso resulta em um decréscimo da taxa de dados do usuário. No algoritmo QoS Garantido, o usuário com a melhor condição média de canal e a menor taxa requerida possui prioridade na alocação do recurso, o que faz que um maior MCS possa ser escolhido para ele enquanto os restantes dos SBs são alocados aos demais usuários com maior probabilidade de alcançarem suas respectivas taxas requeridas.

A ideia principal do algoritmo de escalonamento QoS Garantido é dada pelo seguinte contexto:

- a) *Calcula-se a prioridade de cada usuário e os ordena em ordem descendente* A prioridade do usuário pode ser calculada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \text{Se } \bar{g}_k > \bar{g}_i, \text{ então } p_k > p_i \\ & \text{Se } \bar{g}_k = \bar{g}_i \text{ e } R_k < R_i, \text{ então } p_k > p_i \end{aligned}$$

Sem perda da generalidade, podemos assumir que:

$$p_1 > p_2 > \dots > p_k$$

- b) *Aloca os SBs a cada usuário*

De acordo com a prioridade definida no passo 2a, ocorre a alocação dos SBs para cada usuário. Se um determinado usuário teve alocada a quantidade de SBs estimada no passo 1, mas não atingiu a taxa mínima, então mais SBs serão alocados ao usuário até que se satisfaça a taxa requerida. Por outro lado, se a taxa mínima requerida de todos os usuários foi satisfeita, os blocos de recursos remanescentes, caso haja, são alocados ao usuário de maior prioridade.

A descrição detalhada do algoritmo de escalonamento de recurso de *downlink* para sistemas LTE com QoS Garantido é apresentada a seguir [9]:

Algoritmo 2: Algoritmo de escalonamento QoS Garantido

- 1) Entrada:
 - K : número de usuários;
 - N : número de SBs;
 - R_k : taxa requerida pelo usuário k ;
 - N_k : número de SBs estimados para o usuário k ;
 - G : matriz $N \times K$ com o CQI dos usuários;
- 2) Inicialização:
 - $W = \{1, 2, \dots, N\}$;
 - $S_k = \{\}, k \in \{1, 2, \dots, N\}$;
 - $p_{k,n} = 0, k \in \{1, 2, \dots, K\}, n \in \{1, 2, \dots, N\}$;
 - $r_k = 0, k \in \{1, 2, \dots, K\}$;
- 3) Para $k = 1$ até K :
 - Se $W \neq \{\}$, vai para o passo 4. Se não, fim.
- 4) Se $k > K$

aloca SBs remanescentes ao usuário 1.

Se não, vai para o passo 5.

- 5) Escolhe N_k SBs para o usuário k , de acordo com a prioridade e condição $W \neq \{\}$. Coloca o SB alocado no conjunto S_k .
- 6) Encontre o SB de menor CQI no conjunto S_k , então determine o maior MCS que pode ser utilizado nos SBs alocados ao usuário k .
- 7) Calcule o r_k do usuário k com o MCS definido no passo 6.
- 8) Se $r_k > R_k$, então $k = k + 1$ e vai para o passo 3. Se não, vai para o passo 9.
- 9) Se $W \neq \{\}$ continue alocando um SB ao usuário k . Coloca o SB alocado no conjunto S_k . Vai para o passo 6.

Uma das limitações do QoS Garantido é que, na medida em que o número de usuários na rede aumenta e o recurso se torna escasso, o algoritmo pode apresentar dificuldades em garantir a taxa mínima e altos níveis de índice de justiça.

D. Mapeamento da BLER X SNR para o downlink LTE

Conforme descrito nas especificações do [26], são escolhidos diferentes tipos de modulações e codificação, conhecida como *Adaptive Modulation and Coding* (AMC), para que a BER não seja maior do que 10^{-1} para determinados níveis de SNR. Este mapeamento para o OFDM aparece em diversos artigos tais como [17] e [27]. Como pretendemos fazer uma comparação justa entre as modulações F-OFDM e UFMC e a tradicional OFDM, é necessário fazer um mapeamento similar para as modulações F-OFDM e UFMC.

Neste trabalho foi feito um mapeamento do comportamento BLER com a variação da SNR para o modo de propagação multipercorso *Extended Vehicular A Model* (EVA) para as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC [28] com os parâmetros mostrados na Tabela II.

Foram realizadas simulações da rede LTE para um sistema com uma antena no transmissor. Para o sinal F-OFDM, foi utilizado um filtro sinc de ordem 512, com offset de 2,5 subportadoras [6], enquanto para o sinal UFMC foi utilizado um filtro de atenuação 75 dB.

Os resultados do mapeamento para as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC estão apresentados na Tabela V.

Analisando a Tabela V, nota-se que as 3 modulações apresentam valores de SNR similares. Isso significa que é possível utilizar a F-OFDM e UFMC com índices de CQI praticamente iguais aos da modulação OFDM e, com isso, tirar proveito dos recursos adicionais proporcionados por elas para melhorar o desempenho do sistema. Vale ressaltar que os resultados para as modulações F-OFDM e UFMC foram alcançados com a utilização dos recursos adicionais disponíveis decorrente da ausência de banda de guarda e, no caso da UFMC, considerando também o aumento na duração do símbolo devido à ausência

de prefixo cíclico. Tais resultados demonstram a maior eficiência das modulações F-OFDM e UFMC frente ao OFDM e reforçam o status de candidatas ao 5G.

TABELA V
MAPEAMENTO DA BLER X SNR PARA AS MODULAÇÕES OFDM, F-OFDM E UFMC.

CQI	Modulação	Taxa x1024	SNR (dB)			Eficiência (bps/Hz)
			OFDM	F-OFDM	UFMC	
1	QPSK	78	-1,7	-1,6	-1,3	0,1523
2	QPSK	120	0	-0,1	0,3	0,2344
3	QPSK	193	1,6	1,9	1,8	0,3770
4	QPSK	308	4,1	4,3	4,3	0,6016
5	QPSK	449	6,5	6,1	6,8	0,8770
6	QPSK	602	7,1	7,4	7,4	1,1758
7	16-QAM	378	10,8	10,8	11,2	1,4766
8	16-QAM	490	12,9	12,8	13,2	1,9141
9	16-QAM	616	13,5	13,5	13,9	2,4063
10	64-QAM	466	17,8	18	18,2	2,7305
11	64-QAM	567	19,5	19,4	19,9	3,3223
12	64-QAM	666	19,9	20	20,1	3,9023
13	64-QAM	772	20	20,1	20,3	4,5234
14	64-QAM	873	20,2	20,5	20,7	5,1152
15	64-QAM	948	26,4	26,7	26,9	5,5547

V. RESULTADOS

O Matlab® foi utilizado para avaliar o desempenho do tráfego por meio de simulação, em que os escalonadores *Round Robin*, QoS Garantido e PSO foram testados nas modulações OFDM, F-OFDM e UFMC. Em outras palavras, cada escalonador foi combinado com cada modulação variando o número de usuários. O principal objetivo foi avaliar como cada escalonador consegue aproveitar os recursos adicionais que as modulações candidatas 5G oferecem. Os índices de desempenho de tráfego analisados foram vazão total, índice de justiça, retardo médio, taxa de perdas.

Neste trabalho, considerou-se a vazão como sendo a taxa de transmissão efetivamente obtida pelos usuários em bits/s. Para um sistema em que K usuários competem por recursos, tal que o usuário i recebe o recurso x_i , um índice que reflete o nível de justiça com o qual o sistema aloca recursos aos K usuários é o índice de justiça dado por [29]:

$$\text{Índice de Justiça} = \frac{[\sum_{i=1}^K x_i(t)]^2}{K \sum_{i=1}^K x_i(t)^2} \quad (14)$$

A taxa mínima R_k requerida pelo usuário k e utilizada pelo algoritmo de escalonamento QoS Garantido, considerada neste trabalho, é igual a 5Mbps (655 bytes por TTI) para todos os usuários e foi calculada como a média do tráfego de dados por TTI gerados por cada usuário durante a simulação.

Para cada quantidade de usuários na rede, foram feitas simulações variando-se tanto os escalonadores quanto as modulações avaliadas. Consideramos que duração das simulações para cada número de usuários na rede é de 1000

TTI, pois nos testes realizados com durações maiores os resultados não se alteraram. Assim, o resultado para cada ponto no gráfico é a média desses 1000 TTI para cada quantidade de usuários. A razão de usar a mesma taxa mínima para todos os usuários é criar um cenário com condições igualitárias para a avaliação dos 3 escalonadores de forma que se identifique como cada um consegue tirar proveito dos recursos adicionais oferecidos pela F-OFDM e UFMC.

Foram adotados os parâmetros de simulação para os sistemas LTE mostrados na VI, que refletem uma condição real das operadoras em que os usuários estão em movimento.

TABELA VI
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DOS ESCALONADORES DE BLOCOS DE RECURSOS.

	OFDM	F-OFDM	UFMC
Largura de banda	20 MHz	20 MHz	20 MHz
Prefixo cíclico	Normal	Normal	Não
Banda de guarda	Sim	Não	Não
Tempo de simulação	1000 TTI		
Nº máximo de usuários	30		
Largura da subportadora	15 kHz		
Duração de um <i>slot</i>	0,5 ms		
Tamanho do <i>buffer</i> por usuário	60 kB		
Frequência da portadora	2 GHz		
Modelo de propagação multipercurso	<i>(Extended Vehicular A model)</i> EVA		
Tráfego	Série Waikato 20111029-110001-1 [30]		

Observando-se a Fig. 7 é possível perceber que, ainda que em diferentes níveis, todos os escalonadores obtiveram um ganho de vazão com as modulações F-OFDM e UFMC. Utilizando-se a modulação OFDM, a vazão do PSO e QoS Garantido com modulação OFDM possuem curvas semelhantes. Ao aplicá-los à modulação F-OFDM e UFMC, verificamos que a curva do PSO apresentou melhor desempenho dentre os escalonadores comparados. Isso mostra que o PSO conseguiu tirar mais proveito dos recursos adicionais proporcionados pela F-OFDM e UFMC. Vale destacar que, com a UFMC o ganho de desempenho do PSO fica mais pronunciado. É possível, assim, constatar que quanto maior a eficiência espectral da modulação utilizada, maior foi o ganho de vazão obtido pelo PSO em relação aos demais escalonadores comparados.

Esse resultado pode ser justificado pelo fato do PSO priorizar os usuários com melhor qualidade de canal e não restrito ao atendimento da taxa mínima como no QoS Garantido. Com isso, pode-se transmitir uma quantidade maior de bits por símbolo aproveitando-se de um esquema de modulação de ordem mais alta. Outro fator que justifica os resultados obtidos é a ausência de banda de guarda na F-OFDM e UFMC e dispensa do uso do prefixo cíclico na modulação UFMC, o que garante uma quantidade maior de subportadoras por bloco de recurso e uma maior duração do símbolo, respectivamente.

Em um cenário 5G de Redes Móveis para Banda Larga

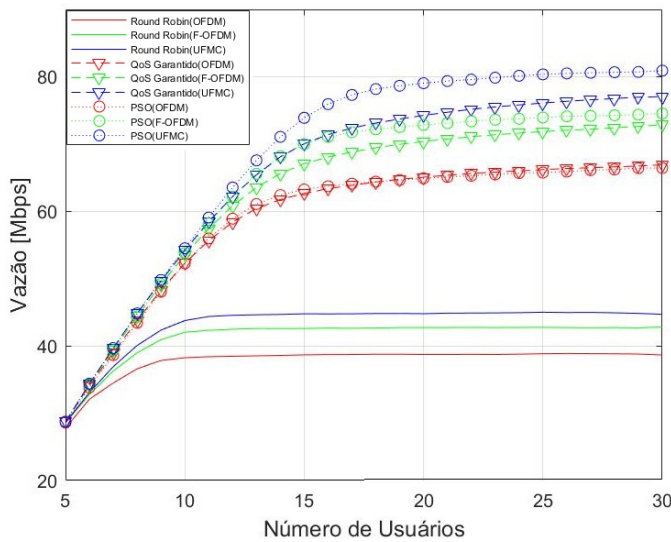


Fig. 7. Vazão dos escalonadores Round Robin, QoS Garantido e PSO com as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC.

Melhorada (eMBB) com aplicações de vídeo 3D, telas *Ultra High Definition* (UHD), que exigem altas taxas transferência de dados, mostram que os resultados de vazão obtidos pelo PSO podem ser bastante promissores nesse cenário.

Vale ressaltar que, à medida que cresce o número de usuários e as unidades de recurso se tornam escassas, o ganho de desempenho proporcionado por uma modulação mais eficiente é mais evidente.

Outra característica observada é que o algoritmo *Round Robin*, que apresentou as curvas de vazão mais baixas, atinge sua vazão máxima com aproximadamente 10 usuários, enquanto o QoS Garantido e PSO conseguem manter uma curva ascendente mesmo com o dobro de usuários na rede. Isso pode ser explicado pelo fato de o *Round Robin* realizar uma distribuição homogênea dos recursos sem considerar a condição de canal dos usuários ou atender a requisitos mínimos de taxa mínima.

Na Fig. 8 são apresentados os valores de retardo médio obtidos pelos algoritmos *Round Robin*, QoS Garantido e PSO com as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC. Nota-se que o melhor desempenho nesse critério ficou novamente por conta do algoritmo PSO com modulação UFMC. Esse comportamento é explicado, basicamente, pela maior capacidade de escoamento do tráfego obtida pelo PSO, já que uma maior vazão reflete na quantidade de dados enviados e isso diminui o tempo de retardo.

É possível notar que, com relação ao retardo médio, todos os escalonadores também conseguiram tirar proveito das modulações F-OFDM e UFMC para melhorar o desempenho. Com a modulação OFDM, as curvas de retardo médio do PSO e QoS Garantido estão praticamente sobrepostas. Com a modulação F-OFDM e UFMC, verificamos que, tanto o PSO quanto o QoS Garantido, apresentaram melhora no desempenho com ligeira vantagem para o PSO. Isso mostra que o PSO conseguiu tirar um pouco mais de proveito dos recursos adicionais proporcionados pela F-OFDM e UFMC para minimizar o retardo médio do que

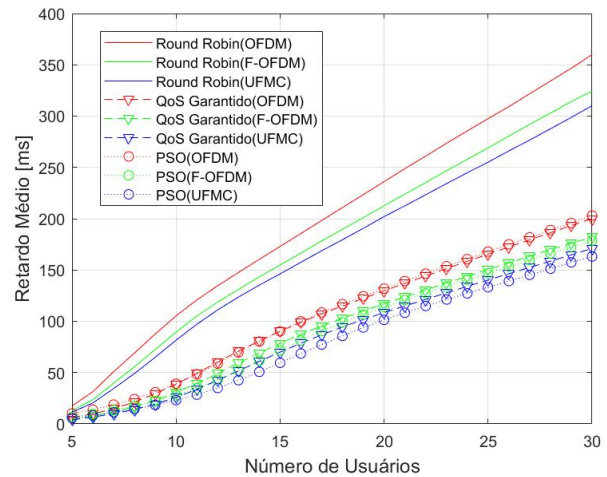


Fig. 8. Retardo Médio dos escalonadores Round Robin, QoS Garantido e PSO com as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC.

o QoS Garantido.

Vale ressaltar que, diferentemente com o que ocorreu na vazão, o ganho de desempenho obtido pelos escalonadores ao fazer uso das modulações F-OFDM e UFMC não se pronuncia com maior intensidade a medida que o número de usuários aumenta e os recursos se tornam escassos. Entretanto isso não limita sua aplicação, pois o ganho de desempenho fica evidenciado mesmo com uma quantidade menor de usuários na rede.

Com relação à aplicação, podemos dizer que em um cenário 5G de Comunicação de Baixa Latência e Ultra Confiabilidade (uRLL) com aplicações de veículos autônomos e aplicações de missão crítica, que exigem baixa latência para a imediata tomada de decisões, os resultados de retardo médio obtidos pelos escalonadores PSO e QoS Garantido os tornam bastante promissores nesse cenário.

As taxas de perdas incorridas por cada um dos algoritmos com as respectivas modulações utilizadas são mostradas na Fig. 9.

Depreende-se do gráfico mostrado na Fig. 9 que a menor taxa de perdas ficou por conta do algoritmo QoS Garantido com modulação UFMC. Esse fato pode ser explicado, principalmente, por dois fatores. O primeiro é a característica do algoritmo que considera a taxa mínima requerida pelo usuário na alocação de recurso, alocando recursos aos usuários com melhor qualidade de canal e menor tráfego, aumentando a probabilidade de atendimento dos dados a serem enviados por cada usuário. Outro importante fator que contribui para o resultado obtido é a maior vazão proporcionada pela modulação UFMC, que impacta diretamente na quantidade de dados enviados pelo usuário e na diminuição da probabilidade de transbordo do buffer e a perda de bytes.

A maior taxa de perda obtida pelo algoritmo *Round Robin* com modulação OFDM em relação aos outros escalonadores justifica-se pela pequena vazão do algoritmo combinada com a baixa eficiência espectral da OFDM, conforme discutidos anteriormente.

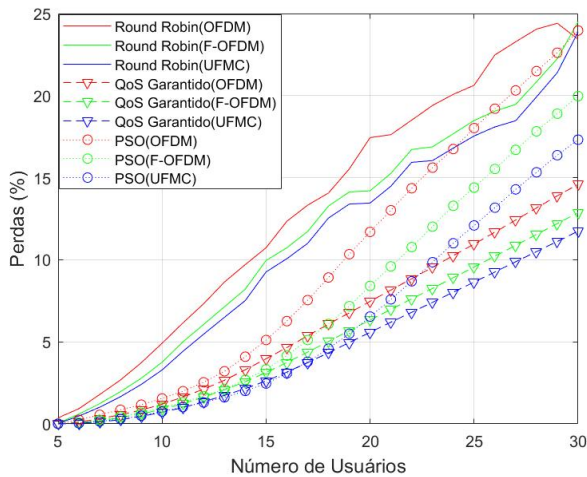


Fig. 9. Taxa de perdas dos escalonadores Round Robin, QoS Garantido e PSO com as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC.

Com relação às modulações é importante destacar que tanto a F-OFDM quanto a UFMC conseguiram diminuir consideravelmente as perdas ocasionadas pelo transbordo do *buffer* em todos os algoritmos comparados. Observando o gráfico mostrado na Fig. 9, pode-se notar que, com uma quantidade inferior a 22 usuários na rede, o PSO com modulação UFMC consegue uma taxa de perda menor que o QoS Garantido com OFDM justificado pela maior eficiência espectral da UFMC.

O índice de justiça alcançado pelos algoritmos *Round Robin*, QoS Garantido e PSO são apresentados na Fig. 10.

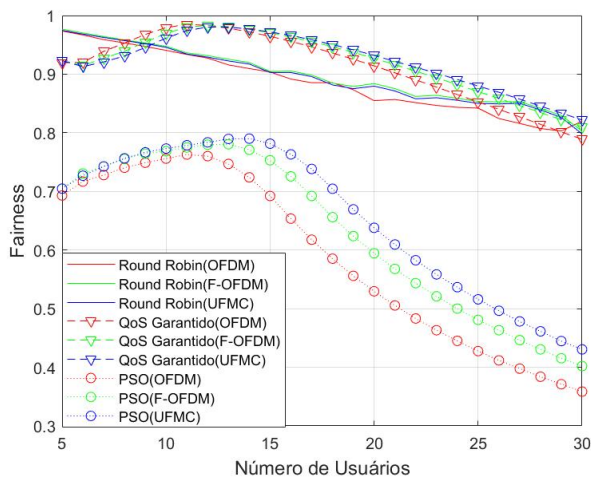


Fig. 10. Índice de justiça dos escalonadores Round Robin, QoS Garantido e PSO com as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC.

O *Round Robin* possui um elevado índice de justiça praticamente com pouca variação de nível. Isso pode ser explicado por sua característica de distribuir os recursos igualmente entre os usuários. O escalonador QoS Garantido também apresentou um elevado nível de justiça, pois com uma mesma taxa mínima a ser atendida para todos os usuários, o algoritmo faz com que a quantidade de bits

enviada por usuário tenda a ficar similar. Por outro lado, à medida que cresce a quantidade de usuários na rede, fica mais difícil atender a taxa mínima requerida devido à escassez de recursos e seu índice de justiça diminui.

O algoritmo PSO apresentou o menor índice de justiça devido a sua característica de priorizar os usuários com maior qualidade de canal. Pode-se observar, entretanto, que todos os escalonadores comparados conseguiram tirar proveito das modulações F-OFDM e UFMC para obter uma melhora no índice de justiça.

VI. CONCLUSÕES

OS desafios impostos pelos requisitos definidos para a futura geração de comunicação móvel sem fio trazem um cenário com uma rede bastante heterogênea, quantidade massiva de conexões, altas taxas de transferência, latência ultrabaixa, dentre outras. Por esse motivo, uma modulação flexível e com alta eficiência espectral é tida como tecnologia chave para atender às novas demandas.

Neste artigo, avaliamos a aplicação no *downlink* LTE das modulações F-OFDM e UFMC, candidatas ao 5G, comparadas a OFDM e avaliamos os escalonadores *Round Robin*, QoS Garantido e PSO ao lidar com recursos adicionais disponíveis proporcionados pelas modulações estudadas. Os resultados mostraram que todos os escalonadores comparados foram capazes de tirar proveito das modulações F-OFDM e UFMC para melhorar o desempenho em parâmetros de desempenho de tráfego, tais como vazão, índice de justiça, perdas e retardo médio. O PSO e QoS Garantido apresentaram melhor desempenho em termos de perdas, vazão e retardo, conseguindo tirar melhor vantagem das modulações candidatas ao 5G, F-OFDM e UFMC.

As modulações estudadas apresentaram um comportamento de BLER com a variação do SNR similares, mostrando uma maior eficiência espectral das modulações F-OFDM e UFMC perante a OFDM.

Ademais, mostrou-se que as modulações F-OFDM e UFMC podem prover desempenhos superiores à OFDM com relação aos índices de desempenho de tráfego de vazão, índice de justiça, retardo médio e taxa de perdas, com destaque para o UFMC que obteve o melhor desempenho entre as modulações. Verificou-se também neste trabalho, a capacidade dos escalonadores *Round Robin*, QoS Garantido e PSO em tirar proveitos dos recursos adicionais proporcionados pelas modulações F-OFDM e UFMC para melhorar os índices de desempenho de tráfego, comprovando a existência de uma sinergia relevante entre as modulações e os escalonadores. Como exemplo, o escalonador baseado em PSO alcançou melhores resultados em retardo e vazão, enquanto o escalonador QoS Garantido obteve a menor taxa de perdas, sendo que índices de justiça mais elevados foram obtidos para os escalonadores QoS Garantido e *Round Robin*.

Fica evidenciada a importância da modulação, bem como do escalonador escolhido para um bom resultado de vazão de um sistema LTE, o que reforça o status das modulações F-OFDM e UFMC como candidatas a serem

adotas pela quinta geração de sistemas de comunicação sem fio (5G) e seus potenciais diferentes cenários de aplicação com diferentes escalonadores.

Neste trabalho, assumiu-se que os usuários possuem os mesmos requisitos de taxa mínima e tráfego gerado. Como trabalho futuro, propomos considerar a aplicação de diferentes fluxos de tráfego e requisitos de desempenho, bem como a utilização de outras modulações candidatas ao 5G, tais como FBMC GFDM e W-OFDM, explorando-se as características de cada uma para atendimento aos requisitos de desempenho de diferentes cenários de aplicação [15][10][26].

REFERÊNCIAS

- [1] V. N. I. Cisco, “Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper”, *Document ID*, vol. 958959758, 2016.
- [2] A. N. Barreto, B. Faria, E. Almeida, I. Rodriguez, M. Lauridsen, R. Amorim e R. Vieira, “5G–Wireless Communications for 2020”, *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 31, n.º 1, 2016.
- [3] J. Abdoli, M. Jia e J. Ma, “Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems”, em *Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2015 IEEE 16th International Workshop on*, IEEE, 2015, pp. 66–70.
- [4] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich, S. ten Brink e J.-F. Frigon, “Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE”, em *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE*, IEEE, 2013, pp. 223–228.
- [5] F. Schaich e T. Wild, “Waveform contenders for 5G—OFDM vs. FBMC vs. UFMC”, em *Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2014 6th International Symposium on*, IEEE, 2014, pp. 457–460.
- [6] 3. G. P. P. (3GPP), “Link level evaluation results of waveform proposals - TSG RAN WG1 Meeting #85bis R1-165426”, 2016.
- [7] F.-L. Luo e C. Zhang, *Signal processing for 5G: algorithms and implementations*. John Wiley & Sons, 2016.
- [8] M. T. Kawser, M. Hasib, A. R. Hasin, A. M. Sadik e I. K. Razu, “Performance comparison between round robin and proportional fair scheduling methods for LTE”, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 2, n.º 5, p. 678, 2012.
- [9] N. Guan, Y. Zhou, L. Tian, G. Sun e J. Shi, “QoS guaranteed resource block allocation algorithm for LTE systems”, em *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2011 IEEE 7th International Conference on*, IEEE, 2011, pp. 307–312.
- [10] J. Kennedy, “Particle swarm optimization”, em *Encyclopedia of machine learning*, Springer, 2011, pp. 760–766.
- [11] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour e G. Wunder, “5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, n.º 6, pp. 1201–1221, 2017.
- [12] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke e A. M. Abu-Mahfouz, “A survey on 5G networks for the internet of things: communication technologies and challenges”, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3619–3647, 2018.
- [13] G. Wunder, P. Jung, M. Kasparick, T. Wild, F. Schaich, Y. Chen, S. Ten Brink, I. Gaspar, N. Michailow, A. Festag et al., “5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, n.º 2, pp. 97–105, 2014.
- [14] A. Ijaz, L. Zhang, P. Xiao e R. Tafazolli, “Analysis of Candidate Waveforms for 5G Cellular Systems”, em *Towards 5G Wireless Networks-A Physical Layer Perspective*, InTech, 2016.
- [15] R. Gerzaguet, N. Bartzoudis, L. G. Baltar, V. Berg, J.-B. Doré, D. Kténas, O. Font-Bach, X. Mestre, M. Payaró, M. Färber et al., “The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2017, n.º 1, p. 13, 2017.
- [16] J.-B. Doré, R. Gerzaguet, N. Cassiau e D. Ktenas, “Waveform contenders for 5G: Description, analysis and comparison”, *Physical Communication*, vol. 24, pp. 46–61, 2017.
- [17] M. T. Kawser, N. I. B. Hamid, M. N. Hasan, M. S. Alam e M. M. Rahman, “Downlink snr to cqi mapping for different multiple antenna techniques in lte”, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 2, n.º 5, p. 757, 2012.
- [18] D. Talevski e L. Gavrilovska, “Novel scheduling algorithms for LTE downlink transmission”, *Telfor Journal*, vol. 4, n.º 1, p. 9, 2012.
- [19] N. Ferdosian, M. Othman, B. M. Ali e K. Y. Lun, “Fair-QoS Broker Algorithm for Overload-State Downlink Resource Scheduling in LTE Networks”, *IEEE Systems Journal*, 2017.
- [20] F. Asadollahi e R. Dehdasht-Heydari, “Introduction of a Novel Hybrid Weighted Exponential Logarithm-Maximum Throughput (HWEL-MT) Scheduler for QoS Improvement of LTE/4G Cellular Networks”, *Wireless Personal Communications*, vol. 98, n.º 1, pp. 91–104, 2018.
- [21] C. Cox, *An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [22] M. Q. Abdulhasan, M. I. Salman, C. K. Ng, N. K. Noordin, S. J. Hashim e F. Hashim, “An adaptive threshold feedback compression scheme based on channel quality indicator (CQI) in long term evolution

- (LTE) system”, *Wireless Personal Communications*, vol. 82, n.º 4, pp. 2323–2349, 2015.
- [23] M. Series, “IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”, 2015.
- [24] O. Iosif e I. Bănică, “LTE Performance Evaluation Based on two Scheduling Models”, *International Journal on Advances in Networks and Services Volume 5, Number 1 & 2, 2012*, 2012.
- [25] M. Shreedhar e G. Varghese, “Efficient fair queuing using deficit round-robin”, *IEEE/ACM Transactions on networking*, vol. 4, n.º 3, pp. 375–385, 1996.
- [26] 3. G. P. P. .-.-. 3GPP, “3GPP TS 36.213 version 14.2.0 Release 14 - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures”, 2017.
- [27] 3. G. P. P. (3GPP), “3GPP TS 23.203 version 12.6.0 Release 12”, 2014.
- [28] ETSI, “Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); base station (bs) radio transmission and reception (3gpp ts 36.104 version 11.8.2 release 11)”, 2014.
- [29] R. Jain, D.-M. Chiu e W. R. Hawe, *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation Hudson, MA, 1984, vol. 38.
- [30] W. N. R. Group et al., “WITS: Waikato Internet Traffic Storage”, *URL: <https://wand.net.nz/wits/waikato/8/>*, 2017.