

Propostas de Técnicas de Coexistência entre LTE-U e Wi-Fi em 5 GHz considerando diferentes modulações candidatas 5G

Pedro Manoel Ribeiro Rosa¹, Maykon Renan Pereira da Silva²,
Flávio Geraldo Coelho Rocha², Vinicius da Cunha Martins Borges¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal de Goiás (UFG)
Alameda Palmeiras, Quadra D, Câmpus Samambaia – Goiânia-GO

²Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Universidade Federal de Goiás (UFG)
Av. Universitária, n.º 1488, Qd. 86, Setor Leste Universitário – Goiânia-GO

{vinicius,flaviogcr}@ufg.br, {pedromanoel,maykonrenan}@discente.ufg.br

Abstract. *The growing demand for mobile LTE connections has resulted in the saturation of the available spectrum, motivating operators to search new frequency spectral such as the 5 GHz band as it is not licensed and little used and having the IEEE 802.11a/n/ac standards of Wi-Fi operating on that same frequency. This article proposes the LAS and RABS coexistence techniques applied in 5G candidate modulations (F-OFDM/UFMC) allowing LTE-U and Wi-Fi to operate simultaneously, achieving better performance for Wi-Fi traffic when compared to the technique ABS.*

Resumo. *A crescente demanda de conexões móveis do LTE tem como consequência a saturação do espectro disponível, motivando as operadoras a buscarem novos espectros de frequência como a faixa de 5 GHz por não ser licenciada e pouco utilizada e tendo os padrões IEEE 802.11a/n/ac do Wi-Fi operando nessa mesma frequência. Esse artigo propõe as técnicas de coexistência LAS e RABS aplicadas nas modulações candidatas à 5G (F-OFDM/UFMC) permitindo o LTE-U e Wi-Fi operarem de modo simultâneo, conseguindo melhor desempenho ao tráfego Wi-Fi quando comparadas com a técnica ABS.*

1. Introdução

O aumento em número e diversidade de equipamentos conectados nas redes de dados sem fio de 3ª e 4ª Geração, 3G e 4G, é uma realidade conforme o documento *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2018–2023*, publicado em março de 2020 por [CISCO 2020], dois terços da população mundial terão acesso à Internet até 2023. Isso significa um total de 5 bilhões e 300 milhões de usuários conectados à Internet, sendo um crescimento de 51% comparado com o ano de 2018, representando um aumento de 3 bilhões e 900 milhões de novos usuários conectados à Internet.

Nesse cenário de crescimento de tráfego, existe uma série de fatores que limita a expansão dessas conexões de acesso sem fio, dentre elas a escassez do espectro rádio disponível e os efeitos de propagação de sinal são desafiadores, pois limitam a eficiência da rede. A tendência de topologia entre as operadoras é a troca de tráfego de macro células para micro células, permitindo-lhes redução de custo e aumento da capacidade.

Vale mencionar os dados sobre o uso das redes móveis por meio da tecnologia *Wireless Fidelity* – Wi-Fi e da rede celular, padrão *Long Term Evolution* – LTE, por um mesmo dispositivo. Muitas dessas conexões móveis ocorrem nas residências dos usuários com banda larga fixa ou pontos de acesso Wi-Fi ou, ainda, são atendidos por *femtocell* ou *picocell* das operadoras de celular. Uma considerável proporção de tráfego gerado por esses dispositivos é descarregada da rede móvel para a rede fixa, caracterizando essa operação por *dual-mode*.

Essa escassez de espectro pode ser evidenciada pelo modo de operação de 5G das operadoras VIVO, TIM e CLARO, que operam no BRASIL. Conforme [Bonatelli 2020], essas operadoras irão compartilhar o espectro licenciado da 4G com a 5G, por meio do mecanismo *Dynamic Spectrum Sharing* – DSS, até ocorrer o leilão das frequências destinadas a 5G, previsto para o ano de 2021 com data a ser definida.

Apesar de existirem trabalhos que propõem o uso das ondas milimétricas pelo LTE na faixa de 30 ou 60 Giga Hertz – GHz, em espectro não licenciado, há desvantagens em sua utilização como atenuações pelo desvanecimento de percurso, aumento da absorção atmosférica pela umidade, neblina ou chuva, perdas de penetração e reflexão. Além disso, as transmissões utilizando ondas milimétricas não são adequadas para transmissões setoriais, pois o comprimento de onda mais curto proporciona o aumento significativo da suscetibilidade ao bloqueio pelos obstáculos, conforme [Ichkov et al. 2017].

Por outro lado, trabalhos como [Gerzaguet et al. 2017], [Liu et al. 2016], [Lizeaga et al. 2017] apresentam um estudo comparativo das modulações *Filtered - Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – F-OFDM e *Universal Frequency Multi-carrier* – UFMC candidatas à 5G para a telefonia móvel, trazendo em seu corpo definições e parâmetros utilizados a fim de obter melhor qualidade de comunicação e eficiência no uso do espectro em relação à modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM. Nesse aspecto de eficiência, as modulações candidatas apresentaram consumo menor de energia na formação do sinal, proporcionando menor emissão fora da banda facilitando a coexistência.

As modulações candidatas lidam com a interferência na coexistência entre Wi-Fi e LTE-U de forma diferente das técnicas de coexistência, explorando outros aspectos. Logo, as modulações e técnicas poderiam trabalhar de forma complementar para melhorar a eficiência do tráfego Wi-Fi. Desta forma, uma combinação das modulações candidatas com as técnicas de coexistência existentes faz-se útil para investigar o impacto dessa combinação na coexistência dessas duas tecnologias de transmissão da camada física, em ambas perspectivas, tanto do Wi-Fi quanto LTE-U.

Sendo assim, como solução eventual da escassez de espectro licenciado, as técnicas de coexistência permitem ao LTE operar juntamente com o Wi-Fi no espectro não licenciado de 5 GHz. Vale mencionar que o uso do espectro não licenciado pelo LTE em caráter eventual/secundário é chamado de *Long Term Evolution-Unlicensed* – LTE-U.

Portanto, o objetivo principal desse trabalho é propor duas técnicas de coexistência *Low Amplitude Signal* — LAS e *Reduce Amplitude with Blank Subframes* – RABS decorrentes das técnicas de coexistência *Almost Blank Subframes* – ABS e *Low Amplitude Stream Injection* – LASI, permitindo o LTE-U e Wi-Fi operarem de modo simultâneo e sem degradação da potência de transmissão do Wi-Fi.

Nesse artigo a seção 2 mostra os trabalhos relacionados sobre as técnicas de coexistência, enquanto que a seção 3 expõe as considerações sobre as técnicas de coexistência. A seção 4 apresenta as propostas das técnicas de coexistência LAS e RABS. A seção 5 mostra o cenário das simulações e avaliação enquanto que a seção 6 a conclusão e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O estudo sobre técnicas de coexistência em espectro não licenciado tem sido alvo de pesquisa desde 2014, como se observa nas *Releases* 13 e 14 do *3rd Generation Partnership Project* – 3GPP e, atualmente, pelos trabalhos da Qualcomm [FCC 2016b], Nokia [FCC 2018] e *MulteFire Alliance* [MULTEFIRE 2018]. Importante mencionar que as técnicas de coexistência ABS e *Listen Before Talking* – LBT foram propostas nas *Releases* 10 [3GPP 2009] e 13 [3GPP 2016] do 3GPP, respectivamente, enquanto que a *Carrier-Sensing Adaptive Transmission* – CSAT foi introduzida pela Qualcomm [QUALCOMM 2014].

Cui et al. [Cui et al. 2017] e Huang et al. [Huang et al. 2018] descrevem as técnicas de coexistência LBT, ABS e CSAT, considerando a coexistência entre LTE-U e Wi-Fi. Ambos explicam que a técnica ABS permite o Wi-Fi acessar o canal livre de interferência durante uma pequena “janela” de tempo proporcionada pelos *subframes* em branco. Com relação ao CSAT empregado no LTE-U, o autor descreve como sendo uma técnica de coexistência que analisa a duração média que o Wi-Fi ocupa o canal. Com base nesse período o LTE-U poderá ocupar o canal, pois consegue identificar o período em que o Wi-Fi não estará utilizando-o.

Sun et al. [Sun et al. 2017] apresentam a técnica LASI que consiste em diminuir a amplitude do sinal do Wi-Fi, consideravelmente. Ainda, propõe o uso do algoritmo *Conflict-Tolerant Channel Allocation* – CTCA em conjunto com a LASI, para auxiliar na recuperação da informação perdida pelo Wi-Fi. É necessário em sua aplicação a coordenação entre o LTE-U e Wi-Fi.

Abinader et al. [Abinader et al. 2018] explicam a coexistência das tecnologias LTE-U e Wi-Fi, operando em 5 GHz, ou seja, na banda de uso da indústria, ciência e saúde. Propõe a técnica de coexistência LTE *Blank Subframes*, bastante similar à técnica ABS diferindo-se pela alocação dinâmica da quantidade de *subframes* em branco, podendo alocar quantidades diferentes em uma transmissão LTE-U com base na performance do tráfego Wi-Fi.

Bocanegra et al. [Bocanegra et al. 2019] implementaram o LTE-U coexistindo com o Wi-Fi 802.11ac utilizando a técnica de coexistência ABS. Ainda, o autor propõe um algoritmo em que o nó mais distante possa realizar uma transmissão direta ao nó mais próximo, tornando-o um retransmissor do sinal. Vale mencionar que o autor configurou em 20 MHz a largura de banda para o IEEE 802.11ac do Wi-Fi.

3. Considerações Sobre as Técnicas de Coexistência

As técnicas LBT, *Fair-LBT*, *ALOHA-Like* e CSAT trabalham similarmente ao mecanismo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* – CSMA-CA do padrão Wi-Fi, não considerando o uso simultâneo do canal pelo LTE-U e Wi-Fi. Essas técnicas

podem prejudicar o tráfego Wi-Fi em cenário densos, uma vez que o LTE-U tendo ocupado o canal livre e com muito tráfego o Wi-Fi poderá não conseguir ocupá-lo por meio do CSMA-CA e, por conseguinte, reiniciar todo o processo de acesso ao meio.

A técnica LASI consiste na diminuição de potência do sinal Wi-Fi quando ocorrer a disputa do canal, sendo empregada em conjunto com o algoritmo CTCA para recuperação de pacotes em conflito com o LTE-U. A diminuição da potência do sinal Wi-Fi torna-se um risco ao seu tráfego, uma vez que sua potência de 50 mW (17 dBm) é muito inferior à do LTE-U sendo mais suscetível à interferência. Outra desvantagem encontra-se na necessidade de coordenação entre a estação base e o ponto de acesso para que a diminuição de potência do sinal Wi-Fi possa ocorrer. Tal procedimento na prática torna-se inviável, devido os pontos de acesso não possuírem mecanismos embarcados para tal coordenação.

A técnica ABS permite a utilização do canal de forma simultânea para o LTE-U e Wi-Fi, não exigindo nenhuma “escuta” do canal e tampouco coordenação entre a estação base e o ponto de acesso. Ela se destaca entre as demais pela possibilidade de coexistência simultânea do canal independente de *idles* de transmissão do Wi-Fi devido os *subframes* em branco, como também por não precisar de coordenação com o Wi-Fi. Porém não se torna escalável à medida que o cenário torna-se denso por não oferecer maior número de *subframes* em branco.

Diante o exposto e considerando as vantagens e desvantagens de cada técnica de coexistência, tendo como pressuposto a operação simultânea entre o LTE-U e Wi-Fi, este trabalho propõe as técnicas de coexistência LAS e RABS combinadas com as modulações empregadas no LTE-U. Importante ressaltar que combinar essas técnicas de coexistência com as modulações candidatas à 5G (F-OFDM/UFMC) poderão favorecer tanto o tráfego LTE-U quanto Wi-Fi, uma vez que tais modulações emitem menor vazão fora da banda promovendo menor interferência entre os sinais adjacentes.

4. Técnicas de Coexistência Propostas

Nesta sessão serão apresentadas as técnicas propostas de coexistência LAS e RABS, descrevendo o funcionamento e os princípios adotados das técnicas de coexistências ABS e LBT utilizadas nos *Releases* 10 [3GPP 2009] e 13 [3GPP 2016] do 3GPP, respectivamente.

4.1. Técnica de coexistência LAS (Low Amplitude Signal)

A motivação da proposta da técnica LAS parte de duas desvantagens que a técnica LASI de Sun et al. [Sun et al. 2017] apresenta, quais sejam, coordenação entre a *Base Station* – BS (LTE-U) e o *Access Point* – AP (Wi-Fi) que está na região de coexistência e diminuição da potência do AP. A coordenação entre a BS e o AP atualmente torna-se impraticável devido os APs residenciais não possuírem uma interface própria ou sinalização em sua transmissão para que ocorra essa troca de informações com a BS, além de não garantir a escalabilidade com uma grande quantidade de APs existentes nas *small cells*.

Nesse contexto, a Tabela 1 apresenta as principais diferenças entre a técnica proposta LAS e a LASI. A técnica proposta LAS, assim como a LASI, é aplicada no LTE-U e possui a vantagem de não exigir qualquer tipo de coordenação entre a BS e AP. A Fi-

Figura 1 apresenta o funcionamento básico da técnica proposta LAS, onde o sinal da BS é atenuado quando há a presença do sinal Wi-Fi.

Tabela 1. Comparação entre as Técnicas LASI e LAS, do autor.

Característica	LASI	LAS
Aplicação/Implementação	LTE-U e Wi-Fi	LTE-U
Coordenação	Com o Wi-Fi	Não Precisa
Atenuação de Potência	No AP	Na BS
Esquema de Modulação	256-QAM	Adaptável

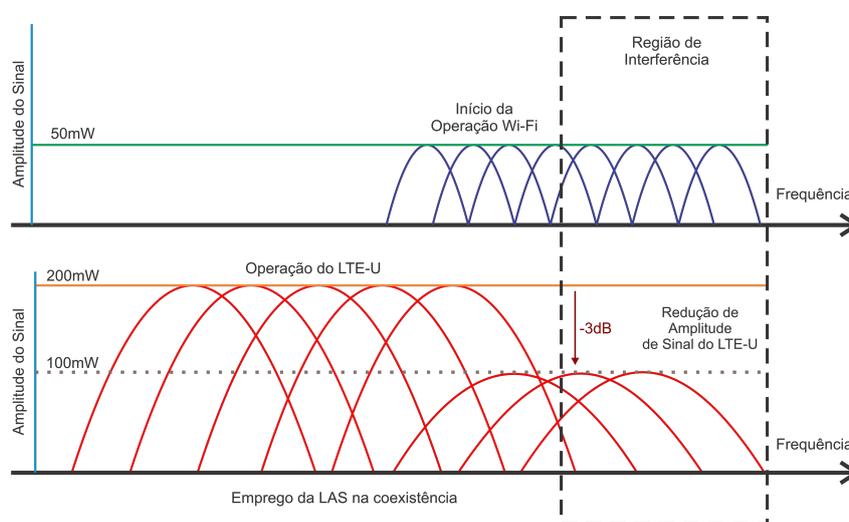


Figura 1. Operação do LTE-U e Wi-Fi c/ LAS, do autor.

A Figura 2 apresenta um estudo empírico sobre o impacto da redução de potência no sinal do LTE-U de forma a entender melhor qual poderia ser um valor de potência reduzido para um cenário real de coexistência.

A Tabela 2 apresenta os dados estratificados da Figura 2(a) com as vazões alcançadas à média que se atenua a potência do LTE-U. Nesse contexto, verifica-se uma queda da vazão de 35% com a potência de 50 mW (17 dBm) em relação à potência de 200 mW (23 dBm). Por outro lado, há uma queda de 8% com a potência de 100 mW (20 dBm) em relação à potência de 200 mW (23 dBm), dessa forma, torna-se possível atenuar em 3dB, pois a vazão com 23 dBm se assemelha bastante com a vazão em 20 dBm quando variando a *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* – SINR.

Tabela 2. Vazões Médias da Figura 2(a).

Potência LTE-U	Vazão Média (Mbps)	Relação Percentual
200 mW	3,16	100%
100 mW	2,88	92%
50 mW	2,05	65%

Vale mencionar que a potência máxima de transmissão em espectro não licenciado não poderá ultrapassar os 200 mW (23 dBm), preconizada pela *Federal Communications Commission* – FCC [FCC 2016a]. Embora até o presente momento não tenha sido empregada a atenuação de amplitude do sinal LTE-U por meio da redução de potência no emprego das técnicas de coexistência, tanto quanto sabemos torna-se a primeira abordagem que leva em consideração esse aspecto. Importante ressaltar que a potência de transmissão do LTE-U inicia com valor máximo permitido pela FCC, enquanto que a potência de transmissão do Wi-Fi se mantém constante em 50 mW (17 dBm). Ainda, a área de cobertura da *small cell*, tanto do LTE-U quanto Wi-Fi, é um fator que possibilita o uso de potência com os valores menores que o especificado pela FCC.

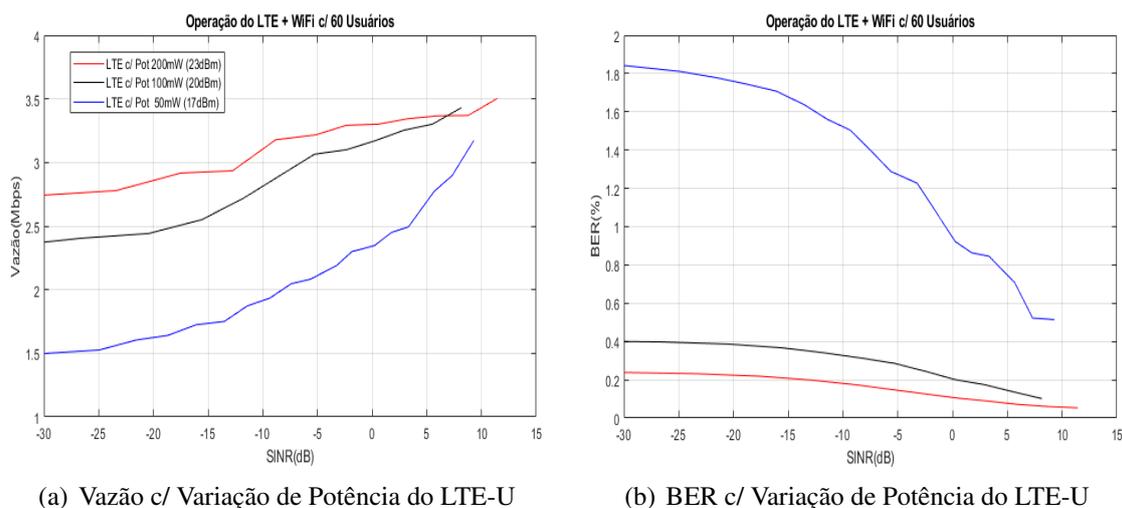


Figura 2. Desempenho do LTE-U c/ Variação da Potência, do autor.

Em complemento, a Figura 2(b) mostra o comportamento do BER em relação à variação de potência do LTE-U. Nesse contexto, verifica-se a maior perda de *bits* quando aplicada a potência de 50 mW nas transmissões do LTE-U, em relação à aplicação de potência de 100 mW ou 200 mW. Vale considerar que essa simulação foi realizada no cenário mais denso, ou seja, com 60 usuários com um raio de 30 m de comprimento, onde é possível concluir que a redução de potência em 3dB torna-se viável para os tráfegos do LTE-U e Wi-Fi.

Diante disso e levando em consideração o cenário de uma *small cell*, foi possível uma análise para adequar uma determinada potência ao LTE-U sem prejuízo significativo ao seu tráfego. Portanto, dependendo do número de usuários, da distância entre eles e suas respectivas fontes de transmissão, tanto do LTE-U quanto do Wi-Fi, a redução da potência proposta gerou um bom *trade-off* entre LTE-U e Wi-fi quando avaliando *Bit Error Rate* – BER, *Block Error Rate* – BLER e Vazão dessas duas tecnologias.

4.2. Técnica de coexistência RABS (Reduce Amplitude with Blank Subframes)

Nas pesquisas dos trabalhos apresentados sobre coexistência do LTE-U e Wi-Fi, as técnicas mais utilizadas como ABS e LBT são implementadas no LTE-U por considerar devido o uso do espectro licenciado de modo secundário/eventual como também pela robustez da formação do sinal e do seu mecanismo de recuperação da informação. Em

decorrência, as técnicas de coexistência atenuam a eficiência de seu tráfego para favorecer o tráfego Wi-Fi.

Assim sendo, a aplicação da técnica LAS irá proporcionar menor interferência ao tráfego Wi-Fi devido a consequente atenuação da *Out of Band Emission* – OoBE das modulações que operam no LTE-U, levando em consideração que a potência de transmissão da BS está no limite permitido pela FCC [FCC 2016a] e sendo suficiente para abranger os usuários móveis situados nas *small cells*. Entretanto, a diminuição da potência de transmissão do LTE-U não irá oportunizar os *slots* de tempo necessários para que o mecanismo CSMA-CA do Wi-Fi possa estabelecer o melhor momento da transmissão do Wi-Fi e, ainda, contribuir para evitar as colisões.

Nesse sentido, para que o Wi-Fi possa executar o CSMA-CA com sucesso e, como consequência, otimizar suas transmissões em coexistência com o LTE-U, a proposta da técnica de coexistência RABS irá consistir na junção das técnicas de coexistência: LAS e ABS. Dessa forma, a técnica proposta RABS irá oportunizar *slots* de tempo para o Wi-Fi por meio da inserção dos cinco *subframes* em branco no *frame* do LTE-U conforme a Figura 3. Logo em seguida, a técnica RABS irá atenuar a potência de transmissão do LTE-U de 200 mW (23 dBm) para 100 mW (20 dBm) a fim de diminuir a emissão fora da banda das modulações que operam no LTE-U. Isso possibilitaria melhor escalabilidade, portanto, sendo mais voltado para cenários densos.

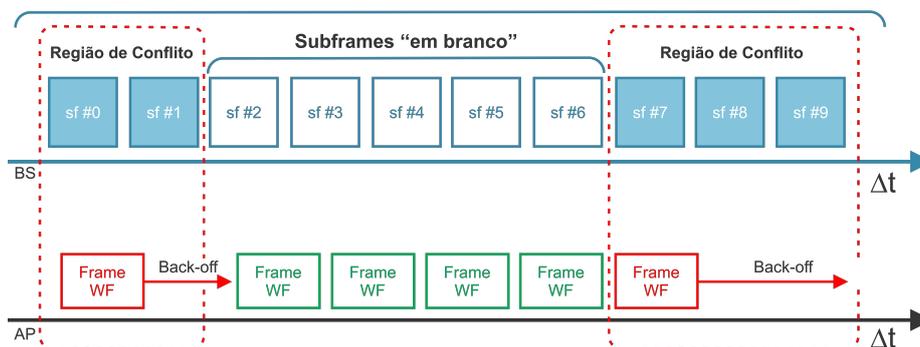


Figura 3. CSMA-CA e Téc. RABS, do autor.

Portanto, com a técnica proposta RABS o Wi-Fi transmite no canal como se estivesse “ocioso” através dos *subframes* em branco do *frame* do LTE-U e, ao mesmo tempo, sofre menor interferência resultante pela atenuação da emissão fora da banda da modulação empregada no LTE-U.

Nesse contexto, a técnica RABS atua no processo de *Primary Downlink Shared Channel* – PDSCH, onde os *subframes* em branco são definidos, logo após, diminui o valor da potência de transmissão do sinal pela metade (3dB). Com isso, torna-se possível diminuir os efeitos da interferência decorrentes do uso simultâneo do canal pelo LTE-U e Wi-Fi, proporcionando desempenho favorável para o tráfego do Wi-Fi.

5. Cenário e Avaliação

Nesta seção serão apresentadas as informações a respeito do cenário, configuração e implementação das simulações realizadas e parâmetros do LTE-U e Wi-Fi, bem como a análise dos resultados apresentados pelas modulações, combinadas ou não, com as técnicas de coexistências.

5.1. Descrições do Cenário e Simulações

Nas simulações foram empregados os padrões LTE e o IEEE 802.11ac do Wi-Fi operando simultaneamente, sendo implementada toda estrutura da camada física do *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* – E-UTRAN, de acordo com os *Relases* 10 e 13 do 3GPP.

O cenário é retratado na Figura 4, em que temos a BS e o *User Equipament* – UE do lado do LTE, e o AP e o Nó do lado Wi-Fi. O deslocamento dos usuários acontece da extremidade para o centro ao passo de 1 metro, efetuando um deslocamento total de 30 metros. Da mesma forma, o UE também realiza esse deslocamento, iniciando-se da BS até o centro. Vale mencionar que a distância entre a BS e o AP é de 60 metros com 20, 40 e 60 usuários, sendo uma metade UE e a outra nós do Wi-Fi.

Para elaboração do cenário, as distâncias de 60 m e de deslocamento dos usuários foram baseadas conforme [Bocanegra et al. 2019] e [Sun et al. 2017]. A área *indoor* e os parâmetros de canalização e desvanecimento do canal estão de acordo com [ITU 2012], tendo sido empregados também nos experimentos de [Bocanegra et al. 2019], [Sun et al. 2017] e [Tariq et al. 2018]. A quantidade de usuários foi dimensionada tomando-se como referência o número de usuários de uma *small cell*, previsto em [Beard and Stallings 2016]. Vale mencionar que Abinader et al. [Abinader et al. 2018] e Bocanegra et al. [Bocanegra et al. 2019] utilizaram quantidades de usuários similares ao cenário proposto neste trabalho.

O cenário da simulação foi construído sob os parâmetros da *International Telecommunication Union* – ITU [ITU 2012] para transmissões do tipo *indoor*. O código foi implementado na plataforma MATLAB®, versão 2018b, utilizando a *LTE Toolbox* e a *WLAN System Toolbox*.

A Tabela 3 traz as configurações do LTE-U utilizadas em todas as modulações candidatas (F-OFDM, UFMC e FBMC), incluindo a OFDM. Importante notar que foi adotado o esquema de modulação *Quadrature Phase Shift Keying* – QPSK, tendo o *Transport Block Size* – TBS um valor de 10.296 bits ($I_{TBS} = 6$)¹ para 100 blocos de recursos, uma vez que se considera o pior cenário nas simulações devido a presença da interferência de sinal.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de configuração do Wi-Fi utilizados nas simulações deste trabalho. Ressalta-se o mesmo esquema de codificação empregado no padrão LTE-U, por considerar o pior cenário na coexistência. A Tabela 5 retrata as potências de transmissão da BS e do AP utilizadas inicialmente nas simulações, respeitando a recomendação de [FCC 2016a].

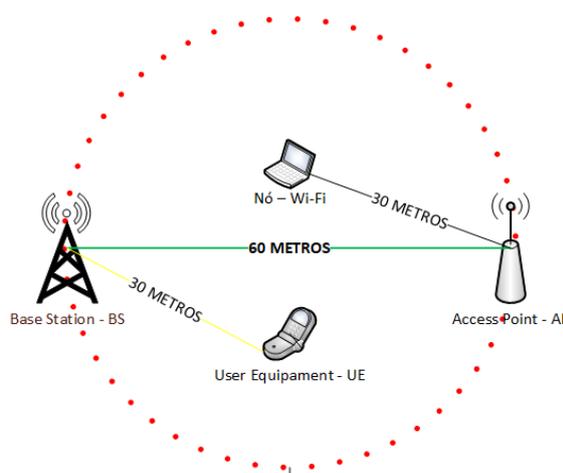


Figura 4. Cenário da Simulação, do autor.

¹Conforme a Tabela 7.1.7.2.1-1, da TS 36.213 da 3GPP, versão 15.2.0 *Release* 15, de abril de 2018.

Tabela 3. Parâmetros do LTE-U

Parâmetros do LTE-U	
Largura de Banda	20 MHz
Modo Duplex	FDD
Frequência de Operação	5 GHz
Indicador de Qualidade do Canal	8 ms
Esquema de Modulação	QPSK
Ruído de Fundo	-95 dBm
Nº de Blocos de Recursos	100
Nº de Elementos de Recursos	12
Prefixo Cíclico	Normal
Nº de Antenas	1
MIMO	Não
Capacidade do Canal	~25 Mbps
Taxa de Dados	~10 Mbps

Tabela 4. Parâmetros do Wi-Fi

Parâmetros Gerais do Wi-Fi	
Frequência de Operação	5 GHz
Largura de Banda	20 MHz
Modulação	OFDM
Esquema de Modulação	QPSK
Padrão IEEE	802.11ac
Nº Subportadoras	52
Nº de Antenas do AP	1
Intervalo de Guarda	800 ns
MIMO	Não
Capacidade do Canal	14 Mbps
Taxa de Dados	~7 Mbps

Tabela 5. Potência de Transmissão

Potência de Transmissão		
BS (LTE-U)	23 dBmW	~200 mW
AP (Wi-Fi)	17 dBmW	~50 mW

Tabela 6. Parâmetros da F-OFDM

Parâmetros da F-OFDM	
Tone Offset	2.5
Comprimento do Filtro	1025

Tabela 7. Parâmetros da UFMC

Parâmetros da UFMC	
Atenuação Slobe	20 dB
Nº IFFT - N_{FTT}	2048
Tamanho da Subbanda	12
Número de Subbandas	100

Tabela 8. Parâmetros da FBMC

Parâmetros da FBMC	
Nº IFFT - N_{FTT}	2048
Tamanho do Filtro K	4
Número de Subportadoras	1200

A Tabelas 6, 7 e 8 mostram as configurações para as modulações F-OFDM, UFMC e FBMC, respectivamente. Alguns valores foram baseados nos diferentes trabalhos comparativos sobre as modulações candidatas citadas na introdução. Conforme a ITU-R [ITU 2012], os parâmetros de desvanecimento do canal do modelo *Rayleigh Fading* foram aplicados ao canal em que LTE-U e Wi-Fi estão coexistindo, como também adicionado o *Add White Gaussian Noise* – AWGN, que irão compor o cálculo do SINR.

5.2. Avaliação Geral da Coexistência do Wi-Fi com LTE-U

Os resultados do BER mostram que as modulações candidatas impactam na coexistência com o Wi-Fi no espectro não licenciado, haja vista os diferentes desempenhos dessas modulações sem a aplicação de técnica de coexistência, conforme as Figuras 5(a), 5(b) e 5(c). Por outro lado, percebe-se uma melhor vantagem ao tráfego Wi-Fi quando o LTE-U modula em F-OFDM e UFMC, mesmo modificando a quantidade de usuários, tornando-se perceptível portanto, que tais modulações candidatas proporcionam diferentes desem-

penhos, impactando no tráfego do Wi-Fi.

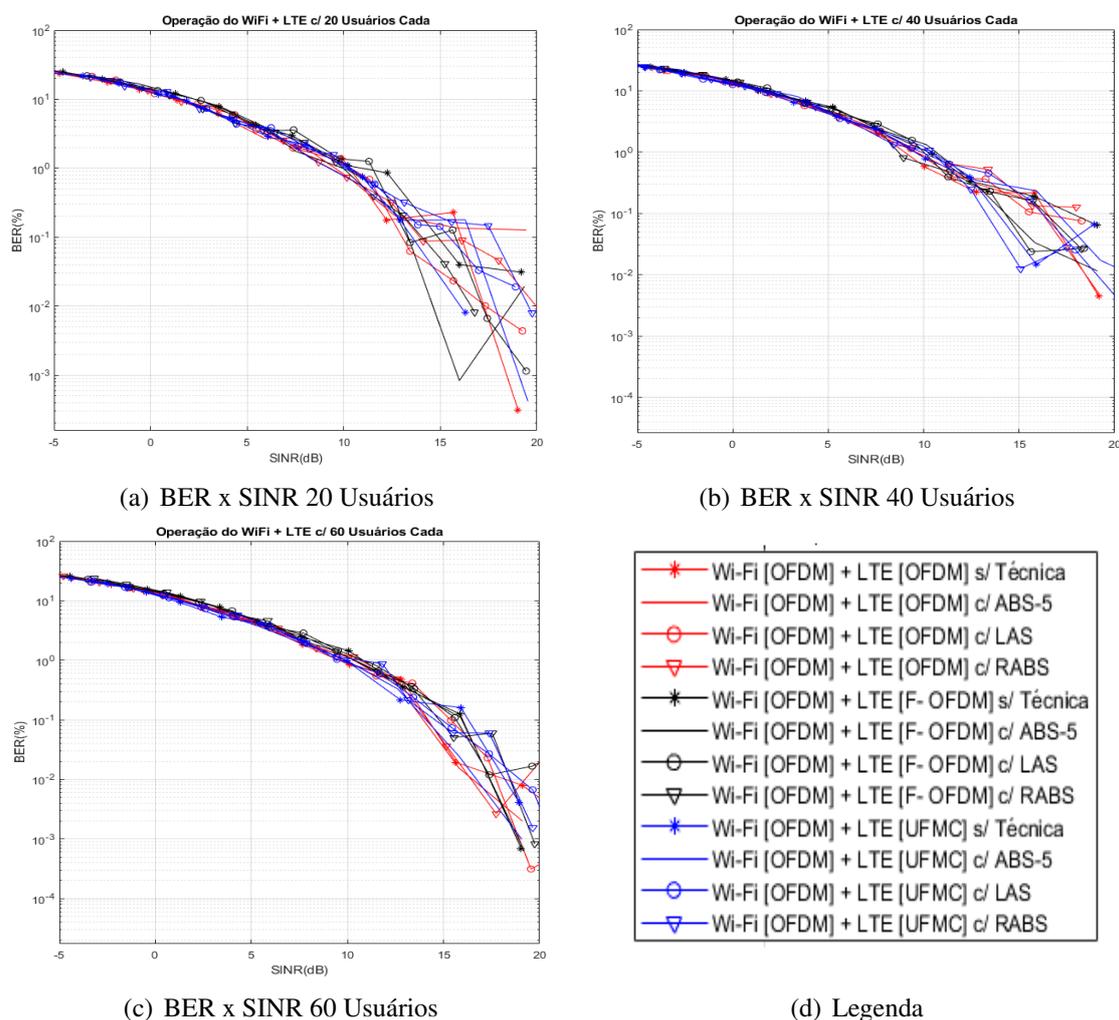


Figura 5. BER x SINR Nó Wi-Fi, do autor.

As Figuras 6(a), 6(b) e 6(c) mostram que, à medida que o cenário torna-se denso, as técnicas de coexistência começam a proporcionar melhor desempenho ao tráfego Wi-Fi, proporcionado pela combinação das técnicas propostas de coexistência LAS e RABS em comparação com a técnica ABS, quando combinadas com as modulações OFDM, F-OFDM e UFMC empregadas pelo LTE-U.

As Figuras 7(a), 7(b) e 7(c) mostram as vazões alcançadas por cada modulação, com e sem a combinação das técnicas de coexistência, que compatibilizam-se com o PER das Figuras 6(a), 6(b) e 6(c), respectivamente, confirmando que as técnicas propostas de coexistência LAS e RABS conseguem otimizar o tráfego Wi-Fi em comparação com a ABS.

Logo, é possível perceber que o tráfego Wi-Fi sofre tanto o impacto da modulação empregada no LTE-U quanto da combinação da técnica de coexistência. As modulações F-OFDM e UFMC em comparação à OFDM (emprego atual no LTE) conseguiram favorecer o tráfego Wi-Fi na maioria das variações de número de nós e nos parâmetros PER e Vazão, isso porque a F-OFDM utiliza filtro nas sub-bandas e a UFMC uma filtragem com

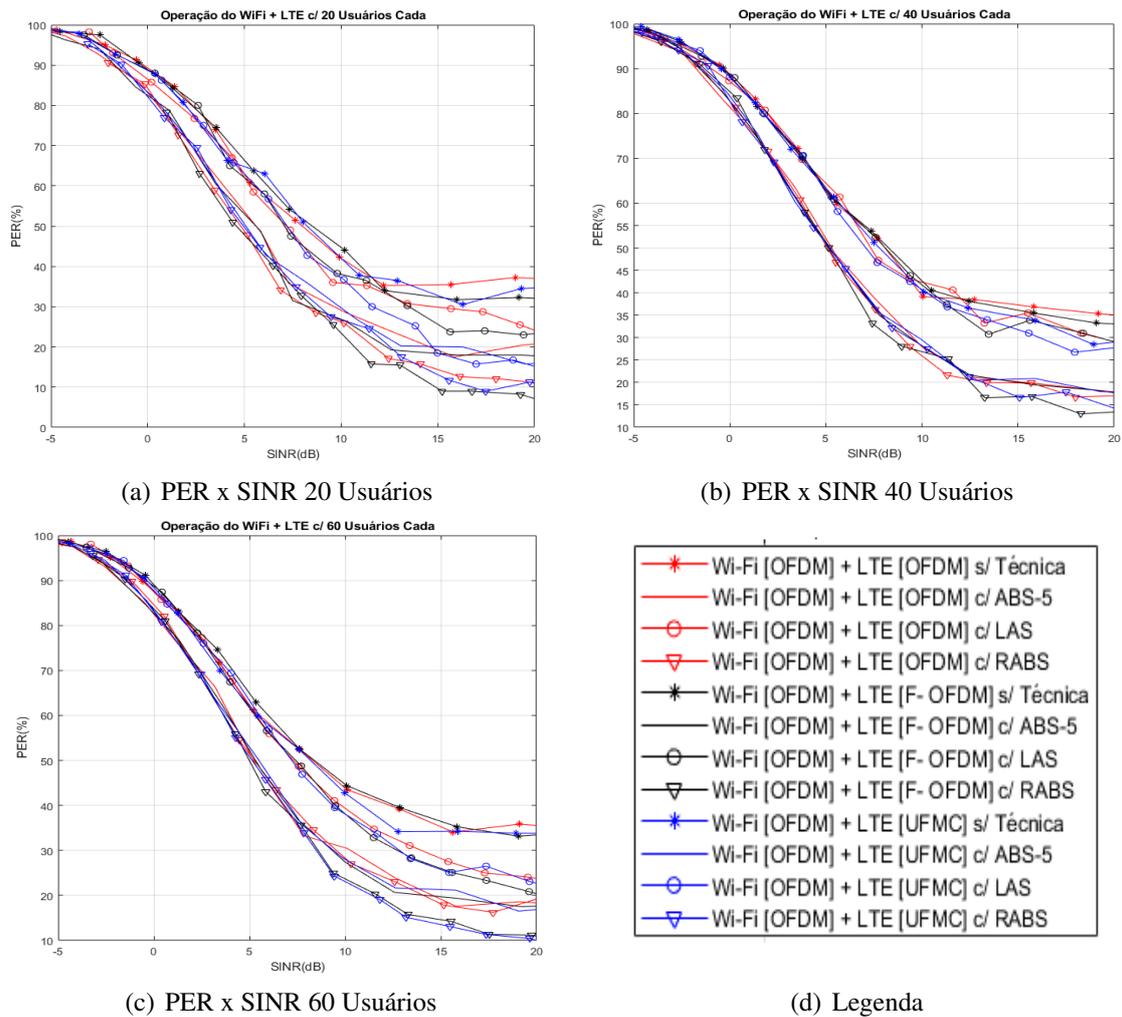


Figura 6. PER x SINR Nó Wi-Fi, do autor.

granularidade mais fina (sub-banda e subportadora) que resulta em baixa OoBE, menor ISI e boa eficiência espectral. Por outro lado, a técnica proposta RABS obteve os melhores índices de PER e Vazão quando empregadas com as modulações candidatas F-OFDM e UFMC.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Esse trabalho propôs duas técnicas de coexistência para combinar às modulações do LTE-U, no espectro não licenciado de 5 GHz, na operação simultânea entre o LTE-U e Wi-Fi, em um cenário denso, similar a *small cell*, onde utilizam aplicações para troca de mensagens em rede social online e/ou acesso a vídeos nas mais diversas plataformas de *streaming*, alterando-se o padrão de modulação do LTE-U de OFDM para F-OFDM e UFMC a cada simulação, bem como combinando-as com as técnicas de coexistência ABS, LAS e RABS.

Desse modo, é possível identificar a melhora do tráfego Wi-Fi ao combinar a técnica de coexistência RABS com as modulações F-OFDM e UFMC, empregadas no LTE-U. Com a operação da F-OFDM pelo LTE-U o tráfego Wi-Fi obteve as médias de

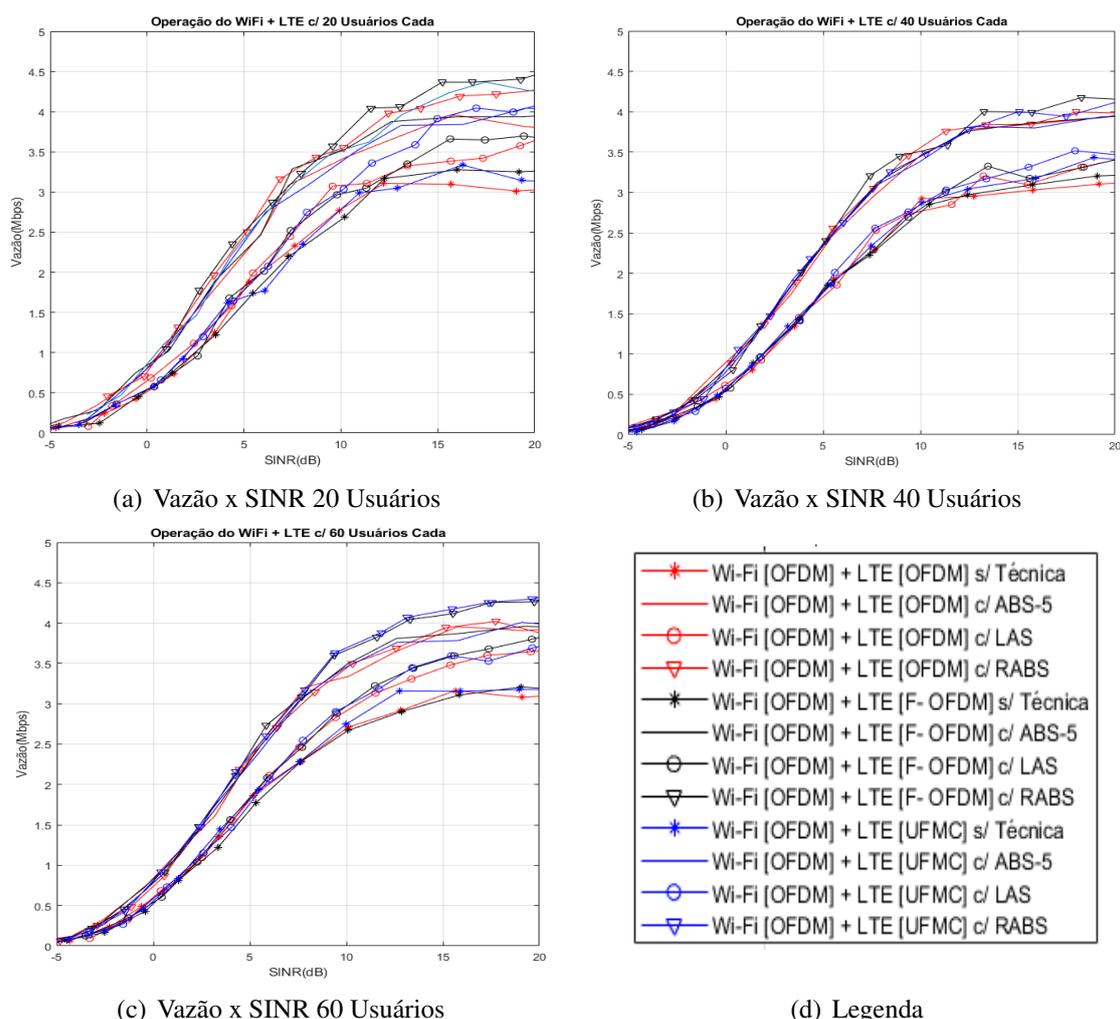


Figura 7. Vazão x SINR Nó Wi-Fi, do autor.

12% de PER com 4,3Mbps de Vazão, com a UFMC as médias foram de 11,6% de PER com 4,2Mbps de Vazão. Essas foram as melhores taxas de desempenho para o tráfego Wi-Fi na coexistência com o LTE-U.

Como trabalho futuro, pretendemos implementar um mecanismo de “escuta” do canal, similar ao da técnica LBT, a fim do LTE-U monitorar o canal de forma mais inteligente por meio de algoritmos de aprendizagem de máquina para que se possa adaptar a técnica RABS de forma mais dinâmica e inteligente conforme a intensidade do uso do canal pelo Wi-Fi.

Referências

- 3GPP (2009). Release 10 - 3rd generation partnership project (3gpp). <http://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10.html>. Acessado: 20 out. 2018.
- 3GPP (2016). Release 13 - 3rd generation partnership project (3gpp). <http://www.3gpp.org/release-13>. Acessado: 13 jul. 2019.

- Abinader, F. M., de Sousa, V. A., Choudhury, S., Chaves, F. S., Cavalcante, A. M., Almeida, E. P. L., Vieira, R. D., Tuomaala, E., and Doppler, K. (2018). Lte/wi-fi coexistence in 5 ghz ism spectrum: Issues, solutions and perspectives. *Wireless Personal Communications*, 99(1):403–430.
- Beard, C. and Stallings, W. (2016). *Wireless Communication Networks and Systems*. Pearson.
- Bocanegra, C., Kennouche, T. E., Li, Z., Favalli, L., Felice, M. D., and Chowdhury, K. (2019). E-fi: Evasive wi-fi measures for surviving lte within 5 ghz unlicensed band. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 18(4):830–844.
- Bonatelli, C. (2020). Redes 5g começam a chegar ao brasil, mas conexão ficará aquém do potencial. <https://link.estadao.com.br/noticias/cultura-digital,redes-5g-comecam-a-chegar-ao-brasil-mas-conexao-ficara-aquem-do-potencial,70003365488>. Acessado: 20 jul. 2020.
- CISCO (2020). Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2018–2023 white paper. Acessado: 13 abr. 2020.
- Cui, H., Leung, V. C. M., Li, S., and Wang, X. (2017). Lte in the unlicensed band: Overview, challenges, and opportunities. *IEEE Wireless Communications*, 24(4):99–105.
- FCC (2016a). Part 15 - radio frequency devices. <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=c79f7d57696072cbela68ca0870b1375&mc=true&node=pt47.1.15&rgn=div5>. Acessado: 20 abr. 2020.
- FCC (2016b). Special temporary authorization. <https://apps.fcc.gov/els/GetAtt.html?id=172096&x>. Acessado: 18 jul. 2019.
- FCC (2018). Fcc test report. <https://apps.fcc.gov/els/GetAtt.html?id=172096&x>. Acessado: 18 jul. 2019.
- Gerzaguët, R., Bartzoudis, N., Baltar, L. G., Berg, V., Doré, J.-B., Ktéνας, D., Font-Bach, O., Mestre, X., Payaró, M., Färber, M., and Roth, K. (2017). The 5g candidate waveform race: a comparison of complexity and performance. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1):13.
- Huang, Y., Chen, Y., Hou, Y. T., Lou, W., and Reed, J. H. (2018). Recent advances of lte/wifi coexistence in unlicensed spectrum. *IEEE Network*, 32(2):107–113.
- Ichkov, A., Atanasovski, V., and Gavrilovska, L. (2017). Potentials for application of millimeter wave communications in cellular networks. *Wireless Personal Communications*, 92(1):279–295.
- ITU, I. T. U. (2012). Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 mhz to 100 ghz. *Recomendations ITU-R, P Series*(p.1238-7).
- Liu, Y., Chen, X., Zhong, Z., Ai, B., Miao, D., Zhao, Z., Sun, J., Teng, Y., and Guan, H. (2016). Waveform candidates for 5g networks: Analysis and comparison. *CoRR*, abs/1609.02427.

- Lizeaga, A., Rodriguez, P., Val, I., and Mendicute, M. (2017). Evaluation of wcp-coqam, gfdm-oqam and fbmc-oqam for industrial wireless communications with cognitive radio. *Journal of Computer Networks and Communications*.
- MULTEFIRE (2018). Multefire specification 1.0.1. <https://www.multefire.org/mfa-v1-0-january-2018/>. Acessado: 18 jul. 2019.
- QUALCOMM (2014). Qualcomm research lte in unlicensed spectrum: Harmonious coexistence with wi-fi. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unlicensed-coexistence-whitepaper.pdf>. Acessado: 18 jul. 2018.
- Sun, H., Fang, Z., Liu, Q., Lu, Z., and Zhu, T. (2017). Enabling lte and wifi coexisting in 5 ghz for efficient spectrum utilization. 2017:1–17.
- Tariq, M., Anjum, M. R., and Amjad, M. (2018). Design of simulation system for lte-u using 5 ghz band in matlab. *Wireless Personal Communications*, 100(4):1661–1676.