

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

Pedro Manoel Ribeiro Rosa<sup>1</sup>, Maykon Renan Pereira da Silva<sup>2</sup>,  
Flávio Geraldo Coelho Rocha<sup>2</sup>, Vinicius da Cunha Martins Borges<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Escola 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)**

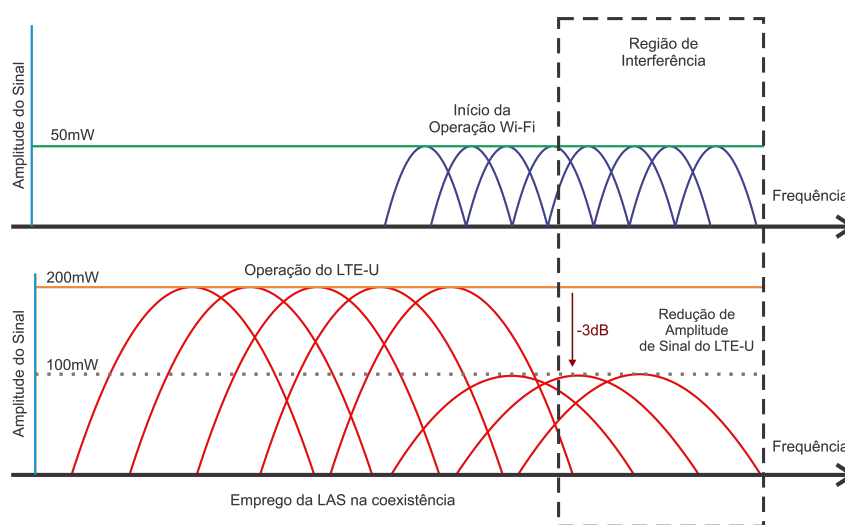
A motivação da proposta da técnica LAS parte de duas desvantagens que a técnica LASI de Sun et al. [Sun et al. 2017] apresenta, quais sejam, coordenação entre a *Base Station* – BS (LTE-U) e o *Access Point* – AP (Wi-Fi) que está na região de coexistência e diminuição da potência do AP. A coordenação 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.**

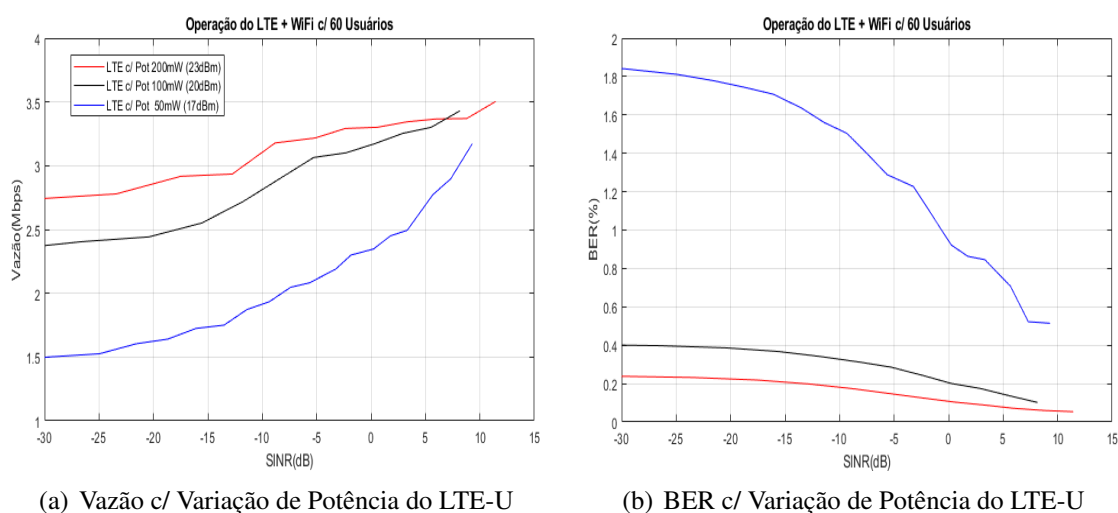
A Figura 2 apresenta um estudo empírico sobre o impacto da redução de potência no sinal do LTE-U de forma a entender melhor qual poderia ser um valor de potência reduzido para um cenário real de coexistência.

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	<b>3,16</b>	<b>100%</b>
100 mW	<b>2,88</b>	<b>92%</b>
50 mW	<b>2,05</b>	<b>65%</b>

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.

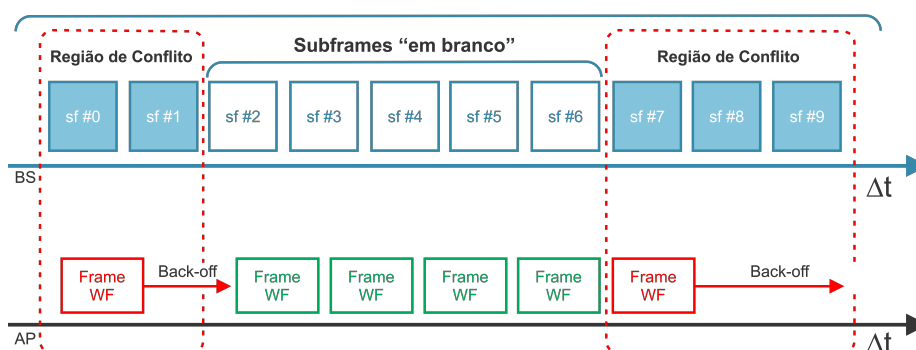


Figura 3. CSMA-CA e Téc. RABS, do autor.

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  $10.296 \text{ bits}$  ( $I_{TBS} = 6$ )<sup>1</sup> 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].

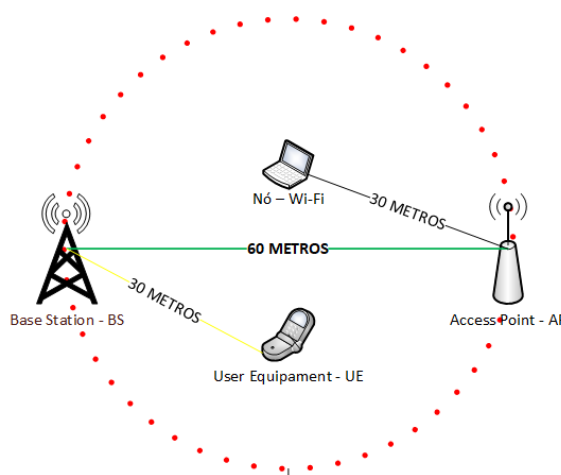


Figura 4. Cenário da Simulação, do autor.

<sup>1</sup>Conforme 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**

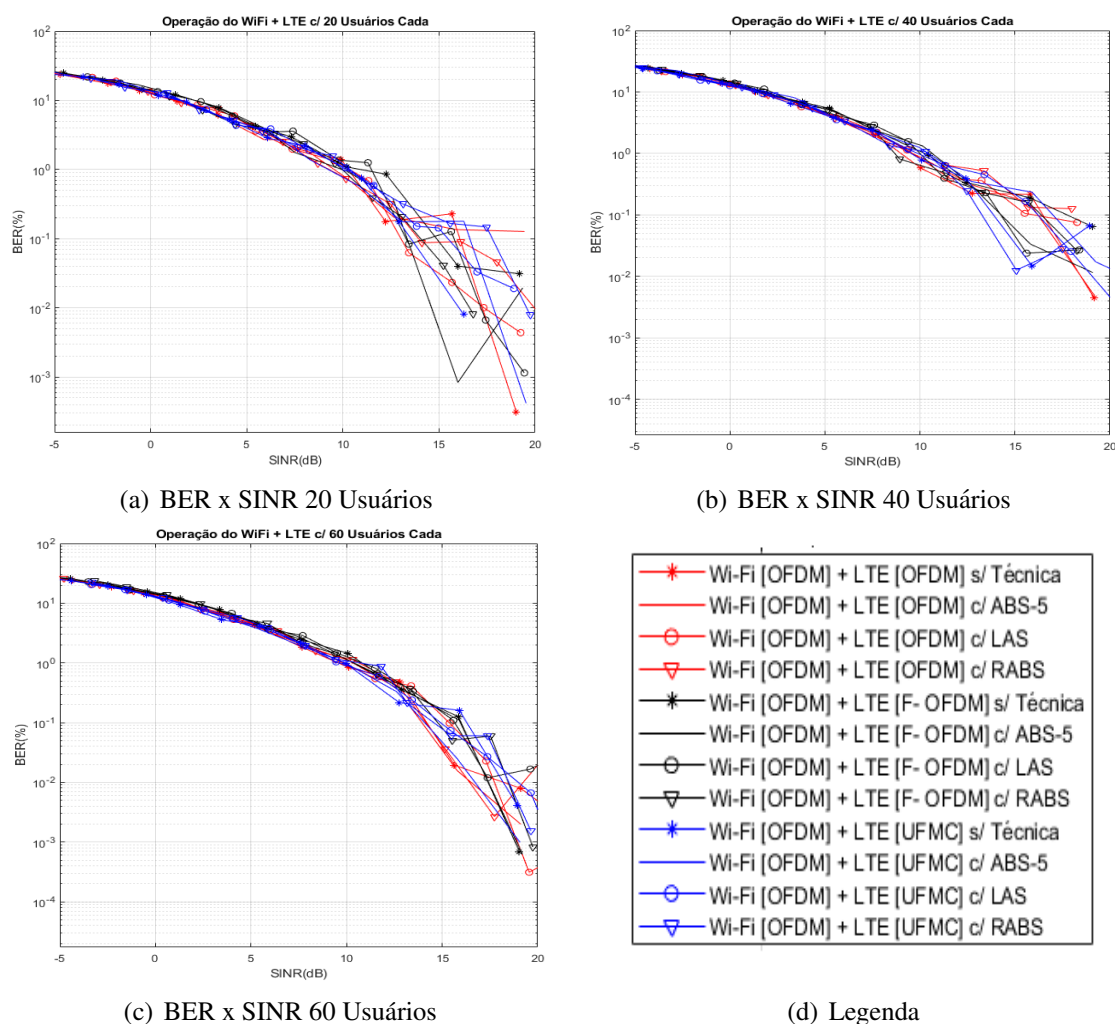
Parâmetros da FBMC	
Nº IFFT - $N_{FTT}$	2048
Tamanho do Filtro K	4
Número de Subportadoras	1200

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

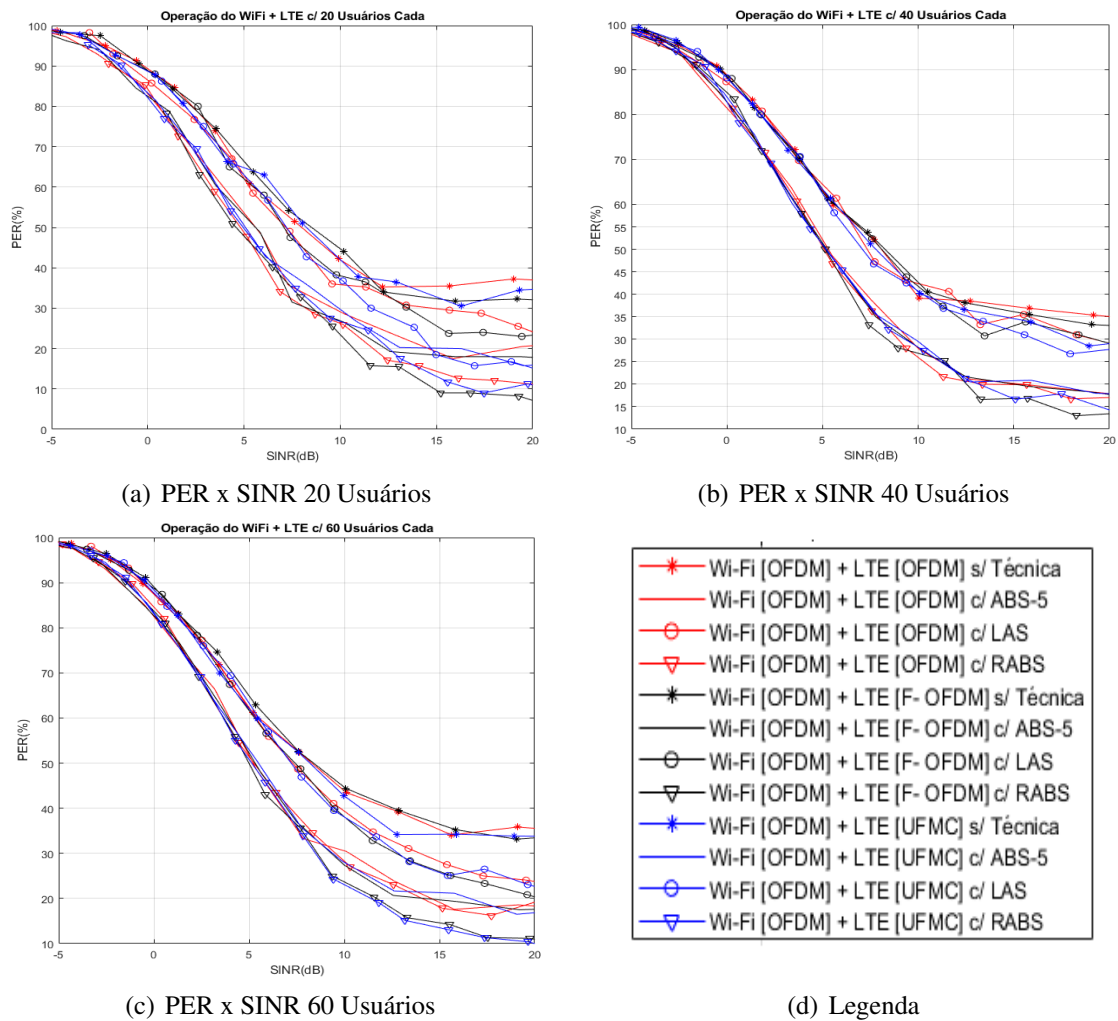


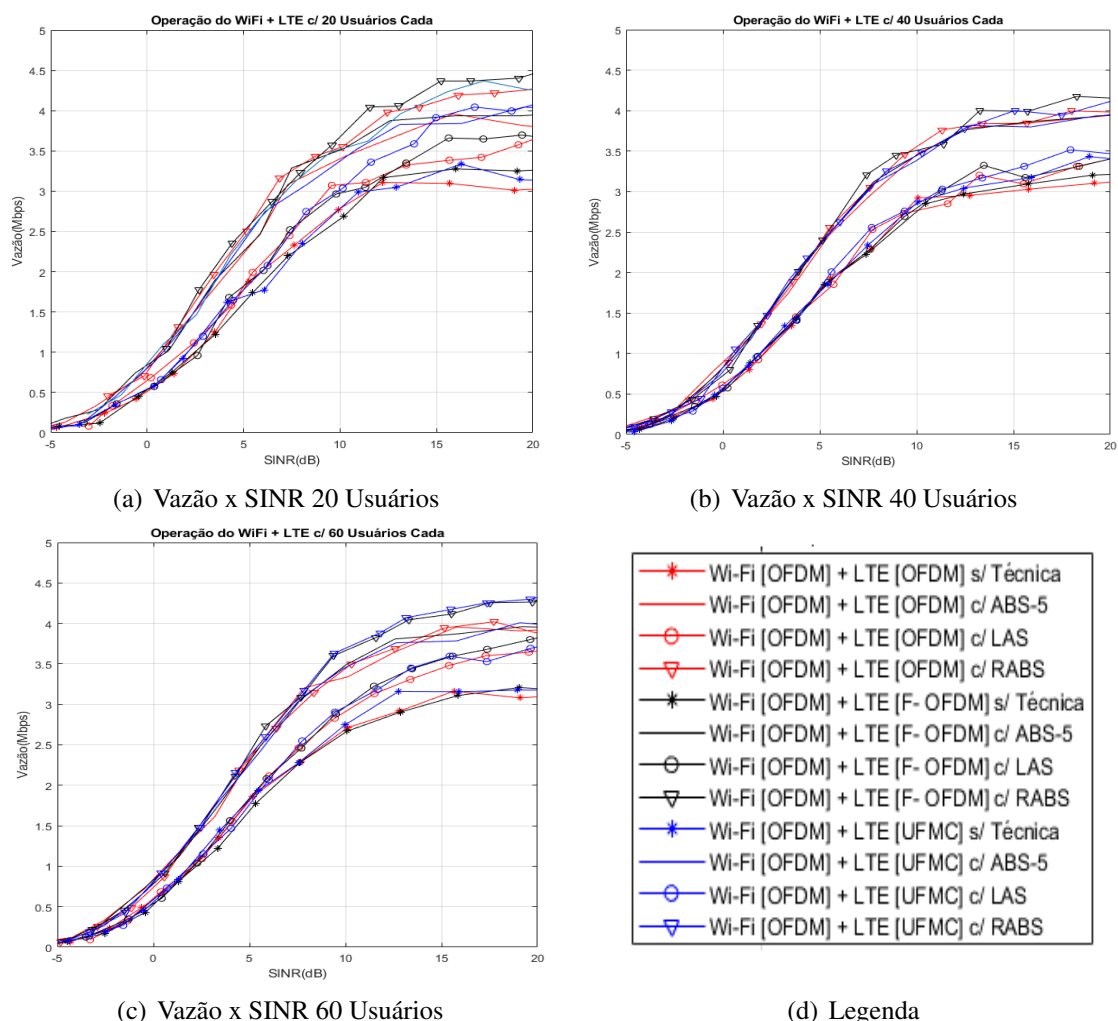
Figura 6. PER x SINR Nó Wi-Fi, do autor.

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.