



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Daniel Luzente de Lima

Análise de Desempenho da Coexistência do Wi-Fi com o LTE

Rio de Janeiro

2021

Daniel Luzente de Lima

Análise de Desempenho da Coexistência do Wi-Fi com o LTE



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Orientador: Prof. D.Sc. Marcelo Gonçalves Rubinstein

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

L732 Lima, Daniel Luzente de.
Análise de desempenho da coexistência do wi-fi com o LTE /
Daniel Luzente de Lima. – 2021.
64f.

Orientador: Marcelo Gonçalves Rubinstein.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Sistemas de
comunicação móvel - Teses. 3. Sistemas de comunicação sem
fio - Teses. 4. Sistemas de transmissão de dados - Teses. I.
Rubinstein, Marcelo Gonçalves. II. Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 621.391

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou
parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Daniel Luzente de Lima

Análise de Desempenho da Coexistência do Wi-Fi com o LTE

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Aprovada em: 11 de novembro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. D.Sc. Marcelo Gonçalves Rubinstein (Orientador)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Ph.D. Célio Vinicius Neves de Albuquerque

Universidade Federal Fluminense

Prof. D.Sc. Rodrigo de Souza Couto

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2021

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus, fonte de toda força e inspiração que nos move diariamente. À Maria, Maya e sua irmã que ainda vamos escolher o nome, meninas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Maria e minha filha Maya por serem minhas inspirações e aquelas que me impulsionam sempre em frente, e principalmente a Deus por permitir-me acordar diariamente com força e disposição para enfrentar os desafios da vida. Concluir esta dissertação é uma vitória pessoal gigantesca, principalmente em virtude do período tenebroso dos últimos anos em que vivenciamos uma pandemia capaz de neutralizar corpo e mente. Agradeço ao meu orientador Marcelo G. Rubinstein, pelos ensinamentos e por todas as vezes em que se dispôs a analisar e orientar. Aos companheiros do PRODERTJ pelas palavras de motivação, a todos meu muito obrigado!

O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil da vida de alguém.

Dalai Lama

RESUMO

LIMA, Daniel Luzente de. *Análise de Desempenho da Coexistência do Wi-Fi com o LTE*. 2021. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.

LTE (*Long Term Evolution*), padrão de comunicação móvel conhecido como 4G, avançou na gerência de recursos, modulações e aumento da largura de banda. O 5G, já presente em diversos países como China, Estados Unidos etc., apresenta ainda maior velocidade, além de baixas latências. No entanto, enquanto não se torna global, cresce a demanda por recursos, o que motiva pesquisas dentro do LTE, de forma a extrair mais desempenho e prover mais banda. Nesse contexto surge o tema da coexistência das redes Wi-Fi e LTE, que consiste em permitir a expansão das capacidades de transmissão fazendo uso adicional das faixas não licenciadas de frequência para envio do tráfego, como por exemplo a de 5 GHz. O problema é que esta faixa é pública e usada nas redes Wi-Fi; portanto é necessário regular esta implementação, para que não se esgotem as frequências com tráfego dos clientes, inviabilizando o uso pelos dispositivos Wi-Fi nativos. É necessário um plano de coexistência justo de uso das frequências. Duas tecnologias voltadas para este cenário são o *LTE-Unlicensed* (LTE-U) e o *Licensed-Assisted Access* (LAA). A primeira opera em modo de ciclos de tempo predefinidos de duração de transmissão ou *duty cycle*, a segunda com mecanismo de sensoriamento do espectro antes das transmissões na faixa não licenciada. O objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho de dois padrões para coexistência de redes LTE e Wi-Fi em faixas não licenciadas, que são o LAA e o LTE-U. Para isto utilizou-se o software de simulação de redes ns-3, com *framework* específicos para padrões de coexistência de redes. Os resultados mostram que os padrões LAA e LTE-U, apesar dos diferentes mecanismos de acesso ao espectro, permitem a coexistência, com destaques para o relevante impacto que o LTE-U ocasiona nos usuários Wi-Fi, mesmo em um cenário com poucos usuários, bem como o baixo desempenho dos nós LAA quando coexistindo com redes Wi-Fi em cenários de alta densidade.

Palavras-chave: LTE. 4G. 5G. LAA. Wi-Fi. Coexistência de redes LTE e Wi-Fi.

ABSTRACT

LIMA, Daniel Luzente de. *Performance Analysis of Wi-Fi Coexistence with LTE*. 2021. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.

LTE (Long Term Evolution), mobile communication standard known as 4G, advanced in resource management, modulations, and increased bandwidth. The 5G, already present in several countries such as China, United States, etc., presents even more speed, in addition to low latencies. While it does not go global, the demand for resources increases, which motivates research within LTE, in order to get more performance and provide more bandwidth. In this context, the theme of the coexistence of Wi-Fi and LTE networks arises, which consists of allowing the expansion of transmission capacities by making additional use of unlicensed frequency bands for traffic transmission, such as 5 GHz. The problem is that this band is public and used in Wi-Fi networks; therefore it is necessary to regulate this implementation, so that the frequencies with customer traffic do not run out, making its use by native Wi-Fi devices unfeasible. A fair coexistence plan for the use of frequencies is necessary. Two technologies aimed at this scenario are LTE-Unlicensed and Licensed-Assisted Access (LAA). The first operates in a mode of pre-set time cycles of transmission duration or duty cycle, the second with a spectrum sensing mechanism before transmissions in the unlicensed band. The objective of this dissertation is to evaluate the performance of two standards for the coexistence of LTE and Wi-Fi networks in unlicensed bands, which are *Licensed-Assisted Access* and LTE-U. For this, the ns-3 network simulation software was used, with specific framework for network coexistence standards. The results show that the LAA and LTE-U standards, despite the different spectrum access mechanisms, allow coexistence, highlighting the significant impact that LTE-U causes on Wi-Fi devices, even in a scenario with few users, as well as the poor performance of LAA nodes when coexisting with Wi-Fi networks in high-density scenarios.

Keywords: LTE. 4G. 5G. LAA. Wi-Fi. Coexistence of LTE and Wi-Fi networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Utilização do espectro de 2 a 6 GHz.	17
Figura 2	Arquitetura da rede de rádio cognitiva.....	22
Figura 3	Sensoriamento do espectro CCA e LBT.	26
Figura 4	Fluxograma do CCA e eCCA.....	27
Figura 5	<i>Almost blank subframe</i>	28
Figura 6	LTE <i>duty cycle</i>	29
Figura 7	Arquitetura de rede do LTE-Advanced.	32
Figura 8	Agregação de portadoras do LTE-Advanced.....	33
Figura 9	Tipos de agregação de portadoras do LTE-Advanced.....	33
Figura 10	Exemplo de MIMO - <i>Multiple Input Multiple Output</i>	34
Figura 11	Exemplo de nó de retransmissão.	35
Figura 12	Exemplo de CoMP.....	36
Figura 13	Ilustração do uso do RS.....	43
Figura 14	Topologia geográfica.....	48
Figura 15	Vazão Wi-Fi A vs Wi-Fi B.....	50
Figura 16	Latência Wi-Fi A vs Wi-Fi B.....	50
Figura 17	Vazão LTE-U vs Wi-Fi - 8 usuários.	51
Figura 18	Latência LTE-U vs Wi-Fi - 8 usuários.	51
Figura 19	Vazão LTE-U vs Wi-Fi - 40 usuários.....	52
Figura 20	Latência LTE-U vs Wi-Fi - 40 usuários.	52
Figura 21	Vazão LTE-U vs Wi-Fi - 80 usuários.....	52
Figura 22	Latência LTE-U vs Wi-Fi - 80 usuários.	52
Figura 23	Vazão LTE-U vs Wi-Fi - 160 usuários.	53
Figura 24	Latência LTE-U vs Wi-Fi - 160 usuários.....	53
Figura 25	Vazão LAA vs Wi-Fi - 8 usuários.	54
Figura 26	Latência LAA vs Wi-Fi - 8 usuários.	54
Figura 27	Vazão LAA vs Wi-Fi - 40 usuários.	55
Figura 28	Latência LAA vs Wi-Fi - 40 usuários.	55
Figura 29	Vazão LAA vs Wi-Fi - 80 usuários.	56

Figura 30 Latência LAA vs Wi-Fi - 80 usuários.	57
Figura 31 Vazão LAA vs Wi-Fi - 160 usuários.....	58
Figura 32 Latência LAA vs Wi-Fi - 160 usuários.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classes e parâmetros do LAA.	42
Tabela 2	Parâmetros gerais.....	48
Tabela 3	Parâmetros do Wi-Fi.....	49
Tabela 4	Parâmetros do LTE-U.....	49
Tabela 5	Parâmetros do LAA.	49

LISTA DE SIGLAS

1G	<i>First Generation of Mobile Network</i>
2G	<i>Second Generation of Mobile Network</i>
2.5G	<i>Second and a Half Generation of Mobile Network</i>
3G	<i>Third Generation of Mobile Network</i>
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	<i>Fourth Generation of Mobile Network</i>
5G	<i>Fifth Generation of Mobile Network</i>
ABS	<i>Almost Blank Subframe</i>
AGC	<i>Automatic Gain Control</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
API	<i>Application Platform Interface</i>
BS	<i>Base Station</i>
CC	<i>Component Carrier</i>
CA	<i>Carrier Aggregation</i>
CCA	<i>Clear Channel Access</i>
CCC	<i>Common Control Channel</i>
CoMP	<i>Coordinated Multi Point operation</i>
CRS	<i>Cell-Specific Reference Signal</i>
CSAT	<i>Carrier Sense Adaptive Transmission</i>
CSI-RS	<i>Channel State Information Reference Signal</i>
CTTC	Centro Tecnológico de Telecomunicações da Catalunha
CW	<i>Contention Window</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
DMTC	<i>DRS Measurement Timing Configuration</i>
DRS	<i>Discovery Reference Signal</i>
DSAN	<i>Dynamic Spectrum Access Networks</i>
eCCA	<i>extended Clear Channel Access</i>
EDT	<i>Energy Detection Threshold</i>
eNB	<i>evolved NodeB</i>

FAP	<i>Femto Application Platform Interface</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMT-Advanced	<i>International Mobile Telecommunications-Advanced</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAA	<i>License-Assisted Access</i>
LBT	<i>Listen Before Talk</i>
LDS	<i>LTE-U Discovery Signal</i>
LENA	<i>LTE/EPC Network Simulator</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-U	<i>LTE-Unlicensed</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
NHN	<i>Neutral Host Network</i>
NS-3	<i>Network Simulator Version 3</i>
PCell	<i>Primary Cell</i>
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i>
PSS	<i>Primary Synchronization Signal</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RC	<i>Rádio Cognitivo</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RN	<i>Relay Node</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
SCell	<i>Secondary Cell</i>
SDL	<i>Supplemental Downlink</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>

SSS	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
SYN-MAC	<i>Synchronized MAC</i>
TPC	<i>Transmit Power Control</i>
TXOP	<i>Transmit Opportunity</i>
UE	<i>User Station</i>
VoLTE	<i>Voice over LTE</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
	Objetivos e resultados	20
	Estrutura da dissertação	20
1	REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS	21
1.1	Arquitetura e Características Técnicas	21
1.2	Importância do Canal de Dados de Controle	23
1.3	Coexistência de Redes em Faixas Licenciada e Não Licenciada	24
1.3.1	<u>Listen Before Talk</u>	25
1.3.2	<u>Almost Blank Subframe (ABS)</u>	27
1.3.3	<u>Outras Técnicas</u>	29
2	LTE-ADVANCED	31
2.1	Agregação de Portadoras	32
2.2	MIMO (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)	34
2.3	Nó de Retransmissão	35
2.4	<i>Coordinated Multi Point Operation (CoMP)</i>	35
3	SOLUÇÕES DE REDES COGNITIVAS DO LTE	37
3.1	LTE-U	37
3.2	LAA	39
3.2.1	<u>Detecção de Energia</u>	41
3.2.2	<u>Contention Window</u>	41
3.2.3	<u>Discovery Reference Signal</u>	42
3.2.4	<u>LAA Reservation Signal</u>	42
3.3	MulteFire	43
3.4	Trabalhos Relacionados à Coexistência em Faixas não Licenciadas	44
4	SIMULAÇÕES	46
4.1	Simulador	46
4.2	Metas	46

4.3	Cenários e Parâmetros	47
4.4	Resultados	49
4.4.1	<u>Primeira Simulação - Coexistência Wi-Fi x Wi-Fi</u>	49
4.4.2	<u>Segunda Simulação - Coexistência LTE-U x Wi-Fi</u>	51
4.4.3	<u>Terceira Simulação - Coexistência LAA x Wi-Fi</u>	53
	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61

INTRODUÇÃO

As redes de telecomunicações sem fio, que hoje possuem uso massivo por grande variedade de dispositivos, como *smartphones*, notebooks, além de diversos outros eletrônicos em geral, evoluíram para acomodar toda a demanda de tráfego e de novas aplicações em diversos padrões. Os principais padrões são o Wi-Fi e o Bluetooth em redes locais, as redes de telefonia móvel com 1G, 2G, 2.5G, 3G e por fim o LTE, que é o acrônimo para *Long Term Evolution*, o padrão de comunicação da tecnologia móvel da quarta geração (4G). Este último, em constante evolução e adotado na maioria dos países, traz novas técnicas que envolvem desde algoritmos de gerenciamento de recursos, modulações e principalmente maior da largura de banda de transmissão [1]. Tais recursos fomentaram o desenvolvimento e utilização em larga escala de aplicações multimídia e em tempo real, que culminaram em provocar uma demanda por serviços de dados muito superior aos serviços de voz, cujo aumento acompanha o exponencial crescimento na utilização de dispositivos móveis.

O cenário acima é corroborado por pesquisas internacionais de importantes empresas do mercado de tecnologia, como por exemplo a *Cisco Systems*, que publica anualmente o *Cisco Annual Internet Report*, com análise e previsão global da mudança de negócios voltados para telecomunicações, contemplando desde a banda larga fixa e o Wi-Fi até a telefonia móvel (3G, LTE etc). Importantes projeções são apresentadas ao lado de dados já consolidados do mercado em anos anteriores, ilustrando o crescimento de usuários da Internet que deve chegar a 5,3 bilhões em 2023 [2].

A próxima geração da telefonia móvel, chamada de 5G, já presente em alguns países como Coreia do Sul, Reino Unido, Itália, Estados Unidos, e com previsão de início no Brasil em 2022, promete velocidades que deverão superar os 100 Mbps de *downlink* e 50 Mbps de *uplink* do seu antecessor, porém com uma grande vantagem, com uma latência muito menor, algo em torno de 4 ms, contra os 20 ms especificados pelo padrão anterior [3], o que favorecerá muito aplicações em tempo real, por exemplo. No entanto, não é o mais adequado considerar que o 5G irá substituir completa e imediatamente o 4G, pois ambas as tecnologias terão um longo período de transição, assim como está sendo a mudança do 3G para o 4G, que tem sua cobertura ainda limitada, não sendo uma realidade no Brasil todo.

Entretanto, enquanto o 5G não se torna uma realidade, a demanda dos usuários

e das aplicações por recursos de comunicação só aumenta, o que motiva diversas iniciativas no campo das pesquisas de novas implementações dentro do LTE, de forma a extrair do padrão melhor desempenho e certamente disponibilizar mais banda [1]. Isso se deve principalmente ao fato de que estudos indicam uma subutilização das faixas de frequência de 0 a 6 GHz, conforme pesquisa realizada pelo FCC (*Federal Communications Commission*) e exemplificada na Figura 1 [4]. Percebe-se claramente um potencial a ser explorado quando vemos o baixo nível de utilização principalmente na frequência de 5 GHz.

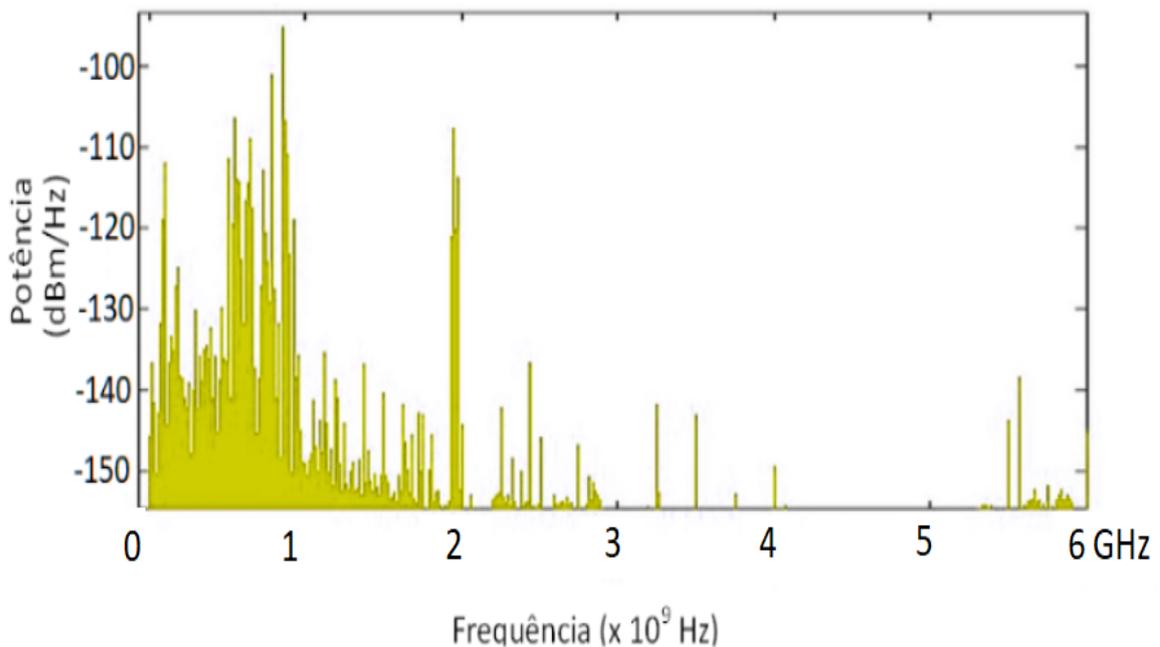


Figura 1: Utilização do espectro de 2 a 6 GHz.

Fonte: Imagem adaptada de [4].

É nesse contexto que surge o tema da coexistência das redes Wi-Fi e LTE, também dentro do escopo de estudos que conhecemos por Redes Cognitivas. Segundo Akyildiz et al. [5], um Rádio Cognitivo (RC) é definido como um rádio que pode mudar seus parâmetros de transmissão baseando-se na interação com o seu ambiente. Na prática, trata-se de uma rede sem fio inteligente que possui conhecimento do seu meio físico circundante e capacidade de aprender em tempo-real com as variações estatísticas dos estímulos de entrada RF (Rádio Frequência), fazendo alterações correspondentes em certos parâmetros operacionais (por exemplo, potência de transmissão, frequência portadora e modulação) [6].

O LTE é utilizado por empresas que detêm faixas exclusivas no espectro e por não sofrer interferências de outras redes, já faz melhor uso possível da banda disponível. Contudo, é necessário buscar alternativas para atender a crescente demanda por vazão de dados em um cenário de escassez de faixas licenciadas. Uma solução é fazer uso de outras faixas para agregação de portadoras, no caso faixas não licenciadas, como por exemplo a de 2,4 ou 5 GHz.

O problema é que essas faixas são públicas e usadas nas redes Bluetooth e Wi-Fi. Logo, há necessidade de regulação rígida deste tipo de implementação, pois não se pode permitir que as operadoras esgotem as faixas de frequências públicas como a de 2,4 GHz por exemplo, também conhecida como parte da banda ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*), com tráfego dos seus clientes, inviabilizando o uso pelos dispositivos Bluetooth ou Wi-Fi nativos. É primordial o estabelecimento de um plano de coexistência justo do uso das frequências em conjunto com uma análise dos seus impactos ou efeitos relacionados [7].

Hoje uma série de implementações derivadas do LTE-Advanced com o mesmo objetivo da coexistência das redes de rádio: LAA, LTE-U, MulteFire [8], etc. O *Licensed-Assisted Access* (LAA) e o LTE-U são derivações onde se agregam as redes em duas células, a primeira operando na faixa licenciada com requisitos de QoS, e a segunda célula na faixa não licenciada, oportunisticamente para aumentar a vazão de dados, diferindo-se entre si apenas no mecanismo de acesso ao meio, onde o primeiro somente transmite após sensorar o espectro e se certificar que não há nenhuma transmissão em curso; já o segundo opera em ciclos de duração de transmissão predefinidos, com períodos de pausa. O MulteFire possui uma arquitetura concebida para operar apenas em faixa não licenciada e visa o fomento a atuação de pequenos provedores no provisionamento de redes LTE, independente de concessões de faixas de frequências licenciadas. A coexistência das redes LTE e Wi-Fi somente deve ocorrer sob uma metodologia que garanta “assegurar o compartilhamento justo do espectro não licenciado com outros sistemas legados, tais como o Wi-Fi” [9]. A base desta premissa é o LBT (*Listen Before Talk*), que é um recurso disponível no LAA e introduzido pelo 3GPP, em sua versão 13, com a função de permitir aos rádios transmissores escutar (*listen*) o ambiente antes de iniciar a transmissão (*talk*), o que garantiria que não haveria a deterioração do meio que já é ocupado pelos sistemas legados, em particular o Wi-Fi.

A despeito do MulteFire também ser uma tecnologia de coexistência de redes em faixas não licenciadas, o presente trabalho avaliou o desempenho dos padrões LAA e LTE-U, que possuem estrutura ancorada em faixa licenciada, com utilização da faixa não licenciada para aumento da vazão de dados. Foram utilizados diferentes parâmetros e cenários, principalmente diferentes quantidades de usuários na topografia, com o objetivo principal de comparar o desempenho individual de cada derivação do LTE, além de medir os impactos causados nos usuários nativos da faixa não licenciada, no caso o Wi-Fi. A presente avaliação verificou que em certos cenários o LAA se mostra melhor vizinho aos usuários da rede Wi-Fi que o LTE-U, porém os testes em diferentes densidades de redes mostram que o desempenho do LAA não se mantém quando esta coexiste com outra rede LTE ou Wi-Fi de densidade mais alta que o usual, o que nos testes realizados foi verificado como algo em torno de 160 usuários somando-se os usuários das duas redes que compartilham a mesma faixa de frequência.

Objetivos e resultados

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho dos padrões mais promissores dentro do conceito das redes cognitivas e da coexistência de usuários em faixas não licenciadas, que são *Licensed-Assisted Access* e LTE-U. Os principais parâmetros avaliados são o mecanismo *duty cycle* de acesso ao meio do LTE-U e o DRS (*Dynamic Reference Signal*) do LAA, que é um sinal de controle dentro do processo de sensoriamento do espectro visando avaliar ocupação do canal, além de diferentes densidades de usuários. A abordagem será na observação dos resultados para determinadas métricas, como vazão e latência, o foco será a comparação dos cenários de densidade da rede, a fim de verificar se há impacto significativo na rede não licenciada quando usuários de uma rede licenciada utilizam a faixa do espectro aberta para envio do tráfego.

Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 1, são abordados os conceitos e as principais características das redes cognitivas. No Capítulo 2 é apresentado o LTE-Advanced e no Capítulo 3 são apresentadas as iniciativas mais promissoras para

acesso às faixas não licenciadas como mecanismo de complementação da banda disponível ou soluções de redes cognitivas do LTE, que são o LTE-U, o LAA e o Multefire. No Capítulo 4 apresentamos as simulações realizadas e são discutidos os resultados em detalhes. Finalmente apresentamos as conclusões e em seguida as sugestões para trabalhos futuros.

1 REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS

A primeira definição de rede cognitiva por [10] é: "*... uma rede dotada de capacidade cognitiva, que pode perceber as condições atuais da rede e então planejar, decidir e atuar sobre essas condições. A rede pode aprender a partir dessas adaptações e utilizar essas informações para tomar futuras decisões, enquanto leva em consideração os objetivos de transmissão fim-a-fim.*"

As redes cognitivas prometem uma grande largura de banda por conta da utilização mais eficiente do espectro e com o provimento de acesso oportunista às faixas de frequência sem afetar negativamente os usuários primários daquelas redes.

O uso oportunista do espectro demanda dos protocolos de comunicação o conhecimento contextual de seu ambiente, de forma que seja possível reconhecer e adaptar automaticamente as técnicas de comunicação sem fio a serem utilizadas, levando em conta principalmente localização, tempo e ocupação espectral.

No processo geral da tecnologia de rádio cognitivo, estão contempladas as seguintes funções:

- sensoriamento espectral: determinar faixas do espectro disponíveis e detectar a presença de usuários da rede primária;
- gerenciamento espectral: identificar e selecionar o melhor canal disponível para comunicação;
- compartilhamento espectral: compartilhar o acesso ao canal com outros usuários de forma justa;
- mobilidade espectral: manter a comunicação quando da mudança do usuário para outra faixa (*handoff* espectral).

1.1 Arquitetura e Características Técnicas

As redes sem fio tradicionais possuem pouca capacidade de adaptação por sua característica reativa de operação, também pelo fato de que os nós não trocam informações sobre o estado atual do ambiente. Tal cenário inviabiliza a criação de uma visão geral sobre o estado da rede, proporcionando uma utilização não otimizada da mesma.

A arquitetura básica das redes cognitivas é apresentada a seguir [11]:

- Rede Primária: infraestrutura de rede (usuários primários e estação rádio base) com direitos de acesso exclusivos a uma certa faixa do espectro;

- Rede Cognitiva ou Secundária: infraestrutura de rede (usuário cognitivo, secundário ou não licenciado; estação rádio base cognitiva, secundária ou não licenciada; escalonador do espectro) que não tem autorização para operar naquela faixa de frequência, porém o faz de maneira oportunista, sem que isto afete aos usuários da rede primária.

É de acordo com a classificação das faixas do espectro de frequência que se identificam aquelas cujo acesso oportunista será provido:

- espaços negros (*black spaces*): faixas ocupadas por interferências de alta potência;
 - espaços cinzas (*grey spaces*): faixas parcialmente ocupadas por interferências de baixa potência;

- espaços brancos (*white spaces*): faixas livres de interferências, exceto por ruídos ambientes aceitáveis (ruído térmico e impulsivo).

A Figura 2 ilustra com um exemplo a arquitetura de uma Rede de Rádio Cognitivo, cujos componentes de destaque são a estação base cognitiva que é o ponto de acesso dos usuários secundários ou da faixa não licenciada e o escalonador de espectro que é a figura mais central da topologia, responsável por capturar informações sobre a atividade espectral e compartilhar estes dados fazendo papel de um gerenciador dos recursos espectrais.

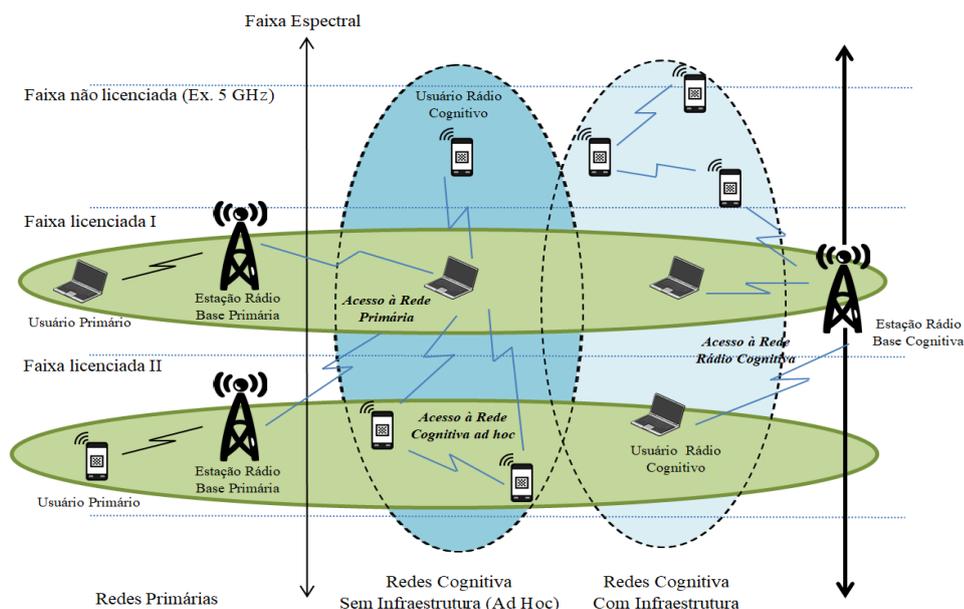


Figura 2: Arquitetura da rede de rádio cognitiva.

Fonte: Imagem adaptada de [4].

A camada física mantém funções de buscas de espaços em branco relacionadas principalmente ao sensoriamento do espectro, tais como: busca das melhores faixas de frequência, reconfigurabilidade e compartilhamento do meio de transmissão sem interferências aos usuários primários. Outras modalidades menos exploradas são o registro em banco de dados e sinalizadores regionais, ambas com menor complexidade, porém associadas a um custo de infraestrutura maior.

O sensoriamento de espectro pode ser realizado de três maneiras: filtragem casada que requer demodulação do sinal pelo receptor; detecção de energia que considera um limiar de potência para avaliar a ocupação do meio e; detecções de características ciclo estacionárias que adicionam informações obtidas do sinal a um custo de complexidade [11].

Na subcamada MAC, se encontram as funções de análise e decisão espectral, que visam respectivamente conhecer as faixas com espaços em branco e selecionar aquelas com melhor desempenho procedendo com a alocação da faixa, considerando os requisitos de QoS do usuário.

A camada de rede em redes cognitivas considera processos de aprendizagem e estabelecimento dos melhores enlaces de forma constante e colaborativa, computando uma espécie de mapa cognitivo com informações que são compartilhadas pelos *hosts* da rede.

1.2 Importância do Canal de Dados de Controle

O uso oportunista do espectro, que é a identificação, alocação e utilização dos espaços em branco ou ociosos em determinadas faixas de frequência, é utilizado em redes cognitivas. Em suma, essas redes, conhecidas como DSANs (Dynamic Spectrum Access Networks), operam o processo de permissão do usuário secundário ou não autorizado a uma faixa de frequência licenciada, quando esta não estiver ocupada mediante acesso dinâmico ao espectro, bem como coleta e tratamento de informações do ambiente. O mesmo conceito pode ser aplicado para o usuário em uma faixa licenciada que realiza acesso à faixa não licenciada, quando esta não está em uso pelos usuários primários da faixa não licenciada.

O processo de acesso aos espaços em branco demanda um grande número de informações da rede disponíveis em tempo mínimo para que seja possível alocar o canal

de transmissão e o envio dos dados do usuário sem que isso demande muito tempo e um usuário primário comece uma nova transmissão naquele mesmo instante. Nesse contexto que fica evidenciada a importância do canal de controle, que é uma abordagem muito comum em redes cognitivas, que na prática significa um canal livre e exclusivo para troca de informações da rede, faixas de frequências etc.

Dois métodos conhecidos para estabelecimento de canais de controle são: o CCC (*Common Control Channel*) e o SYN-MAC [12]. No CCC é feita uma busca por um canal vago em todos os rádios cognitivos, já no SYN-MAC usa-se um mecanismo com saltos em *round-robin*, com sincronismo temporal dos RCs, que chaveiam para determinado canal em um tempo definido.

Como o canal de controle precisa ser confiável, em [13] é proposto um modelo de consultas aos vizinhos de um salto para a formação de uma sequência de canais, aumentando a robustez e a disponibilidade. Duas fases são necessárias, a fase de decisão ou período de decisão (PD), em que o usuário decide quais canais estão disponíveis para uso e o período de transmissão e controle, com o envio efetivo dos dados de controle ou do usuário.

1.3 Coexistência de Redes em Faixas Licenciada e Não Licenciada

De acordo com o 3GPP, a infraestrutura de rede de telefonia móvel baseada em espectro não licenciado com agregação de portadoras em rede licenciada forma duas células classificadas como LTE *Secondary Cell (SCell)* e LTE *Primary Cell (PCell)*, respectivamente. O LTE PCell fica responsável pelo tráfego de controle e dados com QoS e o SCell com o tráfego *best-effort*.

Este tipo de cenário vem sendo estudado há anos, e os resultados vêm indicando a faixa do espectro de 5150 a 5925 MHz como a recomendada para o tráfego na célula secundária. No entanto, vale lembrar que esta faixa de frequências é comumente utilizada por radares meteorológicos e dispositivos Wi-Fi; portanto um mecanismo de coexistência justa se faz necessário para que todos os dispositivos possam fazer uso do meio físico sem inviabilizar a utilização pelos vizinhos.

A questão central é que o LTE normalmente opera no domínio do tempo e demanda adaptações em suas especificações para cumprir requisito de sensoriar o meio de transmissão antes de transmitir. Por outro lado, o Wi-Fi opera com mecanismo de *Clear*

Channel Assessment (CCA) para avaliar se o meio está ocupado ou ocioso, transmitindo apenas se o meio estiver ocioso.

O LTE vem evoluindo no sentido de ter modificado o seu método de acesso ao meio para permitir seu uso em faixa de espectro não licenciadas, como na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 5 GHz [13]. No entanto, é necessário que a operação em tal faixa respeite as regulamentações e implemente mecanismos capazes de manter a coexistência com todos os sistemas que desejem operar em conjunto.

Algumas técnicas básicas voltadas para coexistência entre redes licenciadas e não licenciadas foram surgindo tanto em pesquisa da comunidade científica quanto na indústria, cada uma com características específicas, vantagens e desvantagens. A maioria delas se basearam em duas técnicas, *Listen Before Talk* (LBT) e *Almost Blank Subframe* (ABS), que serão abordadas com mais detalhes a seguir.

1.3.1 Listen Before Talk

Inicialmente, o 3GPP apresentou um padrão que permite ao RC fazer acesso às faixas não licenciadas, porém sem um algoritmo de coexistência justa. Tal padrão somente se mostrou viável em localidades cujas regulações não demandam este tipo de requisito, como EUA ou China. No entanto, era necessário uma tecnologia que pudesse ser utilizada em escala global; portanto foi criada uma versão com um mecanismo de sensoriamento de espectro, denominado LBT. Basicamente o algoritmo deve verificar a potência de um sinal dentro da faixa específica, caso esteja dentro do limiar definido (ex. -62 a -82 dBm), o canal é considerado livre e disponível, caso esteja fora do limiar considera-se o canal ocupado. Caso o canal esteja livre, é designada uma TXOP (*Transmit Opportunity*), um período em que o host pode transmitir que varia normalmente de 2 a 10 ms.

Principal característica das tecnologias de redes cognitivas e coexistência de redes licenciadas e não licenciadas, o LBT é um mecanismo utilizado por um equipamento que executa um CCA para verificar a disponibilidade de um determinado canal antes de iniciar a transmissão no mesmo. Na prática, o mecanismo consiste em avaliar o estado do canal, antes da transmissão, por meio de detecção de energia eletromagnética, o que reduz a probabilidade de colisão com as transmissões de outros nós coexistindo nas mesmas frequências.

A Figura 3 ilustra o processo de sensoriamento do espectro, cuja rede secundária

é um Wi-Fi e a rede primária um LTE com LBT. O usuário LTE não inicia o envio do quadro antes de um processo de LBT com sucesso, e não impacta na transmissão em curso do usuário Wi-Fi, pois o LBT na prática detectou a ocupação do meio e não realizou envio de dados. De maneira similar ao LBT, o processo CCA de sensoriamento de espectro do Wi-Fi também só envia quadros após garantir que o meio está disponível para transmissão.

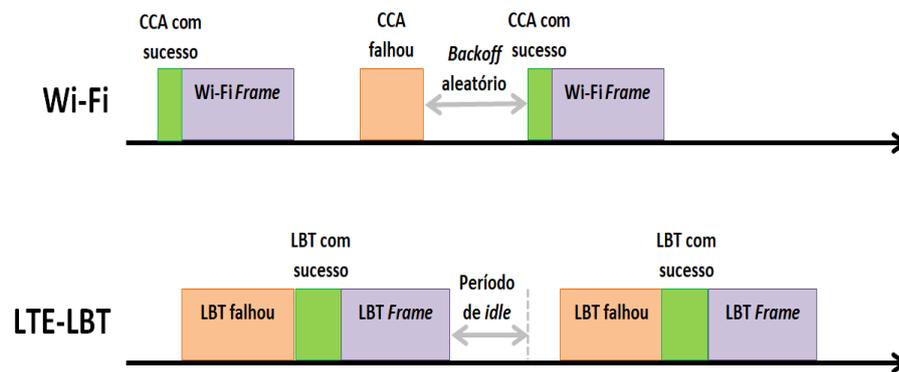


Figura 3: Sensoriamento do espectro CCA e LBT.

Fonte: Adaptada de [13].

Com relação ao LBT, foi proposta pelo 3GPP uma classificação de quatro esquemas de acesso ao canal [14]:

- categoria 1: sem LBT. Nenhum sensoriamento do espectro do tipo LBT é realizado pelo transmissor (categoria para classificar soluções que não adotam a abordagem LBT);
- categoria 2: LBT sem procedimento de *backoff* aleatório. O período que o canal está ocioso antes do transmissor iniciar o envio é determinístico;
- categoria 3: LBT com *backoff* aleatório de janela de contenção (CW). Se o canal for detectado como ocioso por uma quantidade fixa de vezes, o transmissor extrai um número aleatório do intervalo $[0, CW]$. Esse número aleatório é usado no procedimento LBT para determinar a quantidade adicional de intervalos de tempo que o canal precisa ser detectado como ocioso antes que o transmissor possa começar a transmitir;
- categoria 4: LBT com *backoff* aleatório tendo uma janela de contenção de tamanho variável. Semelhante à categoria 3, mas com o valor de CW que varia dependendo do resultado das tentativas de transmissões anteriores, podendo haver diferentes critérios para escolher o valor de CW. Uma das possibilidades é associar o valor de CW ao nú-

mero de tentativas de transmissão malsucedidas, semelhante ao que é feito por Wi-Fi e Ethernet.

Ao *Evolved NodeB* (eNB), que é a estação rádio base LTE, é permitido iniciar a transmissão após sensoriar o canal e detectar que está inativo durante o período de espera inicial do CCA ou após execução do eCCA (Extended CCA), após verificado que o canal esteve ocioso pelo período de adiamento (*defer period*, bem como a geração e espera do período de *backoff*, atualização da janela de contenção etc. conforme mostra a Figura 4).

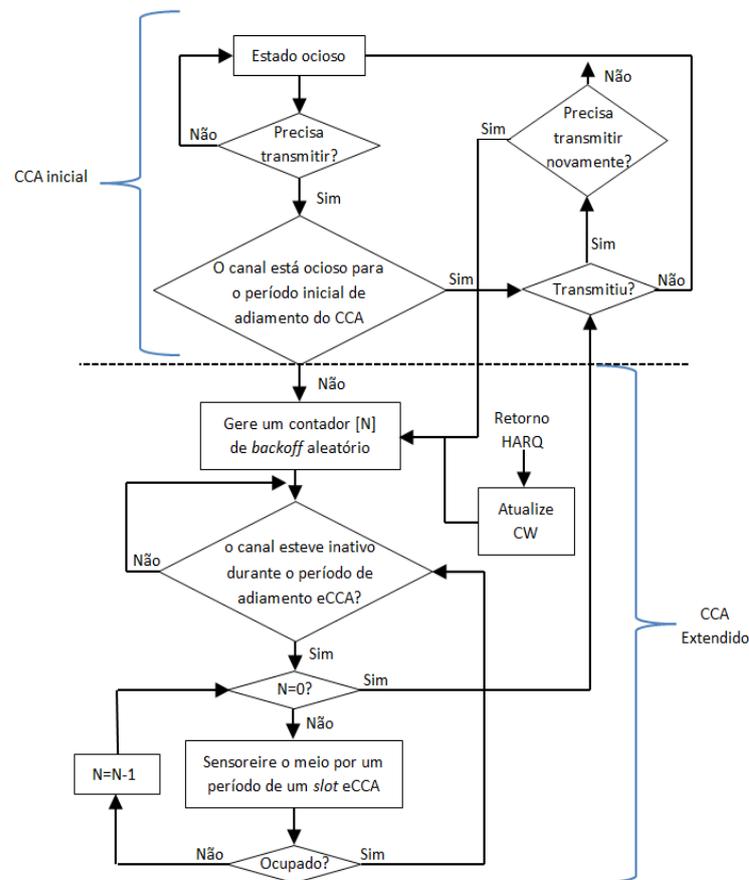


Figura 4: Fluxograma do CCA e eCCA.

Fonte: Imagem adaptada de [15].

1.3.2 Almost Blank Subframe (ABS)

Enquanto regulações europeias e japonesas, por exemplo, definem a necessidade de utilização do método LBT para transmissões em cenários de coexistência de redes licenciadas e não licenciadas, nos Estados Unidos e China não há requisito regulatório para um esquema LBT nas redes cognitivas, mas limites de duração máxima de rajadas

de transmissão no espectro não licenciado. Tal mecanismo fomentou diferentes linhas de pesquisa sobre como as células LTE deveriam interromper voluntariamente as transmissões com o objetivo de limitar a ocupação do canal, abrindo margem oportunística para que outros dispositivos em redes não licenciadas (ex. estações Wi-Fi) pudessem transmitir seus dados nestes “espaços” periódicos, cuja duração normalmente é determinada tomando como base medições de ocupação do canal por outras redes.

Definida no LTE *Release 10*, a técnica ABS (*Almost Blank Subframe*) considera a heterogeneidade das redes, dividindo-as em células LTE de diferentes tamanhos, as quais são denominadas *femtocell*, *picocell*, *microcell* e *macrocell*. O objetivo do ABS é limitar a interferência entre as transmissões de células/redes distintas. Nas Figuras 5 e 6 ilustra-se a operação básica do ABS, que consiste nas transmissões da *macrocell* restritas a ocorrerem apenas em certos quadros, usando o domínio do tempo e as *femto*, *pico* e *microcells* transmitem, portanto, em *subframes* utilizados pela *macrocell* que ficaram vagos, que recebem pouca interferência, exceto pelo tráfego de controle e sinalização que ainda podem ser transmitidos pela célula principal. Estes períodos de quadros em branco, ilustrados na Figura 5 como ABS, podem ser utilizados para transmissão oportunística pelo usuário 1 (UE 1), que poderia ser um dispositivo de outra tecnologia, como por exemplo o Wi-Fi. Tais acessos tiram proveito de um mecanismo de operação denominado *duty cycle*, que alterna períodos de tempo ON e OFF, onde no OFF, ou seja, quando o nó central da rede LTE não está transmitindo, é que temos as oportunidades de transmissão dos usuários nativos da faixa não licenciada (ex. Wi-Fi), cuja probabilidade de colisão dependerá da possibilidade de transmissão de outro nó Wi-Fi, o que é tratado pelo seu mecanismo de sensoriamento de espectro.

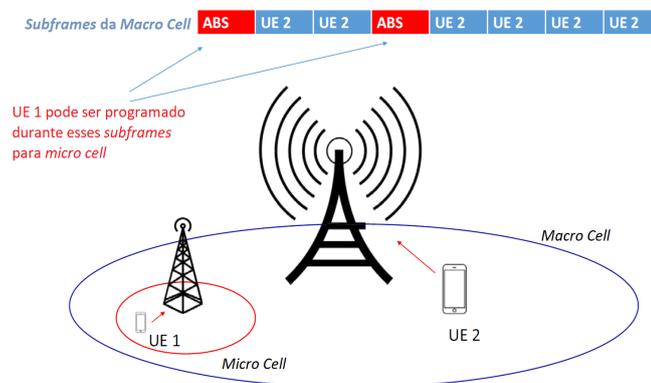


Figura 5: *Almost blank subframe*.

Fonte: Imagem adaptada de [16].

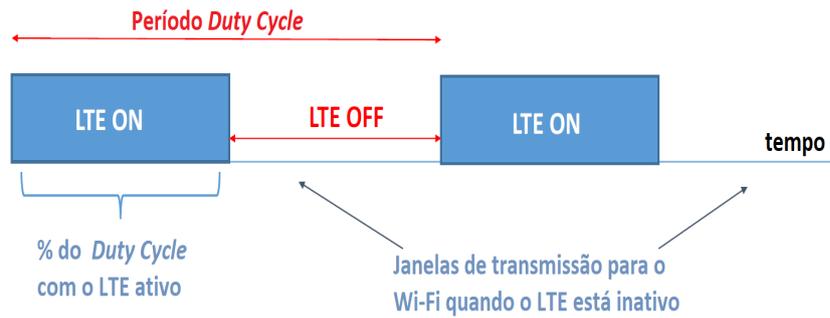


Figura 6: LTE *duty cycle*.

Fonte: Imagem adaptada de [16].

É importante ressaltar que o mecanismo ABS, tal como foi definido no *Release 10*, não faz qualquer tipo de sensoriamento de espectro e opera no domínio do tempo, com troca de mensagens de controle e sinalização.

1.3.3 Outras Técnicas

Com o objetivo de proporcionar uma boa vizinhança da rede LTE com a rede Wi-Fi, outras técnicas foram propostas na literatura, muitas delas podendo ser utilizadas em conjunto com o LBT e o ABS com o objetivo de melhorar tal capacidade:

- *carrier selection*: diante da grande disponibilidade de banda no espectro não licenciado, um esquema de seleção de portadora pode ser uma estratégia que reduza a interferência nas transmissões. Basicamente o mecanismo consiste em realizar medições da atividade em diferentes canais potencialmente utilizáveis, escolhendo aquele em que se detecta menor atividade;

- *Automatic Gain Control (AGC)*: mecanismo que opera nos receptores, visa reduzir interferência controlando o nível de ganho do sinal antes de passar os dados para a cadeia de processamento de banda base para decodificação, tendo em vista que o mesmo chega por diferentes caminhos até alcançar o dispositivo, e que pode ser bastante variado;

- *minimum channel occupancy*: para evitar que a banda seja consumida por comunicação de baixo rendimento, alguns países regulam que os canais de 20 MHz devem ser ocupados por pelo menos 80% da largura de banda na maior parte do tempo, embora seja também permitido ocupar somente 4 MHz para transmissões por curtos períodos de tempo;

- *Transmit Power Control (TPC)*: algumas regiões determinam que os dispositivos

reduzam a potência de transmissão enquanto outras transmissões no mesmo canal são detectadas. Os dispositivos podem ser configurados para operar sem TPC, porém a técnica se mostra útil para reduzir interferência das células LTE operando no espectro não licenciado.

A evolução do LTE trouxe ao longo do tempo diversas implementações voltadas ao compartilhamento de frequências, cada uma com suas características específicas e objetivos estabelecidos. Nos capítulos a seguir são apresentadas as principais iniciativas do 3GPP para acesso às faixas não licenciadas como mecanismo de complementação da banda disponível.

2 LTE-ADVANCED

Mesmo não se tratando de uma versão do LTE voltada especificamente para o compartilhamento de frequências, foi a partir de adaptações do LTE-Advanced que foram emergindo os estudos e as tecnologias de coexistência em faixas de frequência, principalmente pelo advento do suporte à agregação de portadoras, além de outros requisitos descritos a seguir:

- maior eficiência na gestão de energia;
- gestão de interferência avançada;
- capacidade de auto-organização da rede;
- suporte a tecnologia de antena MIMO (*Multiple Input Multiple Output*);
- taxa de transferência de pico para *uplink* de 500 Mbps e *downlink* de 1 Gbps;
- suporte a agregação de portadoras;
- largura de banda acima de 20 MHz escalável, podendo chegar a 100 MHz;
- diversas melhorias na arquitetura de rede e protocolos;
- maior eficiência na utilização do espectro.

Lançado no início de 2014 com a *Release 10* do 3GPP e com a perspectiva de ser uma evolução do LTE, o padrão LTE-Advanced veio com o objetivo de cumprir ou até mesmo ultrapassar todos os requisitos do *International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced)* [17] que é a definição oficial do 4G feita pela *International Telecommunication Union (ITU)* em 2008 [18].

O LTE, primeira versão do que conhecemos como 4G, ainda utiliza rede analógica para tráfego de voz, já o LTE Advanced é conhecido como LTE “verdadeiro”, pois é totalmente baseado no protocolo IP, tanto para dados quanto voz, através do novo padrão VoLTE (*Voice over LTE*) [19]. Esse padrão que proporciona chamadas de voz em alta definição graças a banda passante seis (6) vezes maior que nas chamadas tradicionais, proporcionada pela comutação de pacotes em substituição à comutação de circuitos, que permitiu a implementação de *codecs* que detectam e suprimem os períodos de silêncio enquanto falamos, o que trouxe significativa economia de dados a serem trafegados.

A despeito da nova arquitetura, o LTE Advanced garante total compatibilidade com as redes legadas, porém com maior disponibilidade de espectro, com mais faixas de baixa frequência para ampliação de cobertura e outras de alta frequência para situações

de baixa mobilidade nas quais os acessos desta nova rede tendem a ser mais estáveis e rápidos.

A Figura 7 mostra que o núcleo da rede do sistema LTE-Advanced é dividido em diversas partes, dentre as quais podemos destacar o eNB que se comunica com equipamentos de usuário (UEs) e o EPC (*Evolved Packet Core*) que contempla outros quatro componentes S-GW (*Serving Gateway*) e PDN GW (*Packet Data Network Gateway*) responsáveis por roteamento e encaminhamento de pacotes, MME (*Mobility Management Entity*) que trata da questão da mobilidade e o PCRF (*Policy and Charging Rules Function*) que gerencia políticas e regras de cobrança.

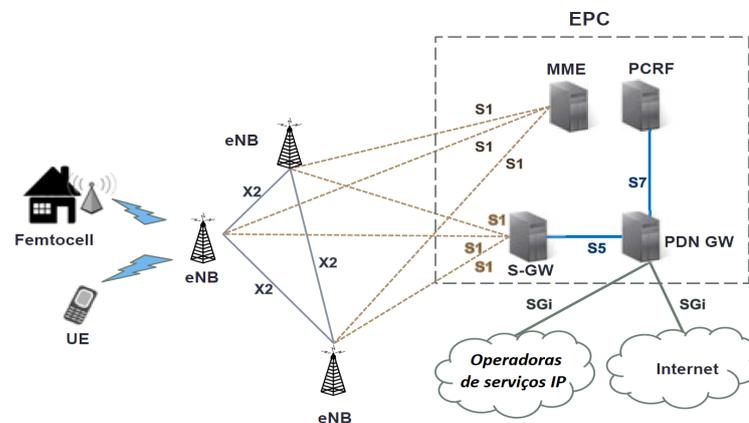


Figura 7: Arquitetura de rede do LTE-Advanced.

Fonte: Imagem adaptada de [20].

2.1 Agregação de Portadoras

A forma mais direta de aumentar a vazão em uma rede móvel é adicionando mais largura de banda, que é feito pelo LTE-Advanced através de agregação de portadoras.

Cada portadora agregada é denominada portadora componente (*Component Carrier - CC*), que pode ter diferentes larguras de bandas como 1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz, e de acordo com a definição, um máximo de cinco portadoras componentes podem ser agregadas. Desta forma, a largura de banda máxima teórica é de 100 MHz. Uma definição importante é que as portadoras agregadas podem ser diferentes em DL (*download*) e UL (*upload*), porém o número de portadoras componentes de UL nunca é maior do que as de DL, podendo as portadoras de componente individuais ter larguras de bandas diferentes, conforme mostram as Figuras 8 e 9.

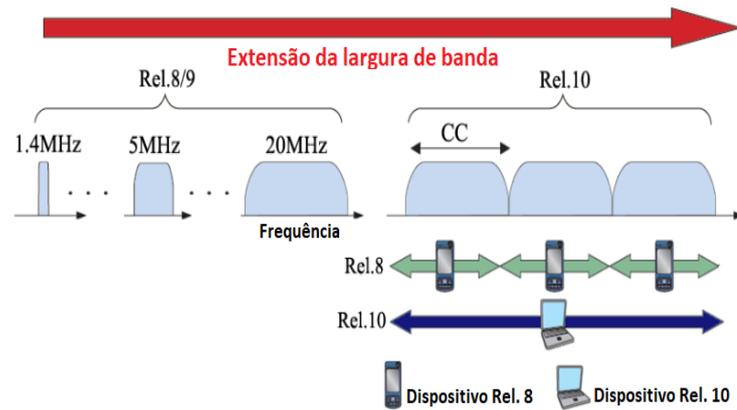


Figura 8: Agregação de portadoras do LTE-Advanced.

Fonte: Imagem adaptada de [21].

O *Release 10* trouxe diversas melhorias e uma delas é justamente a capacidade de se agregar mais de uma portadora, em faixas de frequências distintas, de modo que um único usuário possa fazer uso simultâneo, aumentando significativamente a capacidade de transmissão. Antes, nas versões 8 e 9, os usuários estavam limitados à largura de banda de cada faixa de frequência em utilização, mesmo que outras faixas estivessem livres de ocupação.

O mecanismo possui três tipos de agregação:

- Intra-band contígua;
- Intra-band não contígua;
- Inter-band não contígua.

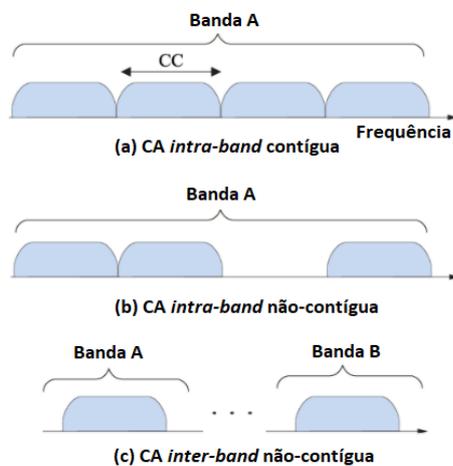


Figura 9: Tipos de agregação de portadoras do LTE-Advanced.

Fonte: Imagem adaptada de [21].

O modo mais simples de arranjo para agregação é a *Intra-band* contígua, que consiste na utilização de portadoras componentes contíguas operando na faixa de frequência. Apesar de ser o mais simples, nem sempre essa composição é possível em virtude da heterogeneidade de cenários de alocação de frequência. Para arranjos não contíguos podem ser alocados tanto *Intra-band* ou seja, na mesma faixa de frequência, como *Inter-band*, para o caso das portadoras componentes estarem operando em faixas de frequências diferentes.

2.2 MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

MIMO é o recurso usado basicamente para aumentar a taxa geral de bits de transmissão com uso de dois ou mais fluxos distintos de dados em diferentes antenas simultaneamente, usando os mesmos recursos em frequência e tempo, com uso de sinais de referência diferentes, de forma que os receptores também possam ser múltiplas antenas. A Figura 10 mostra um exemplo simples do funcionamento.

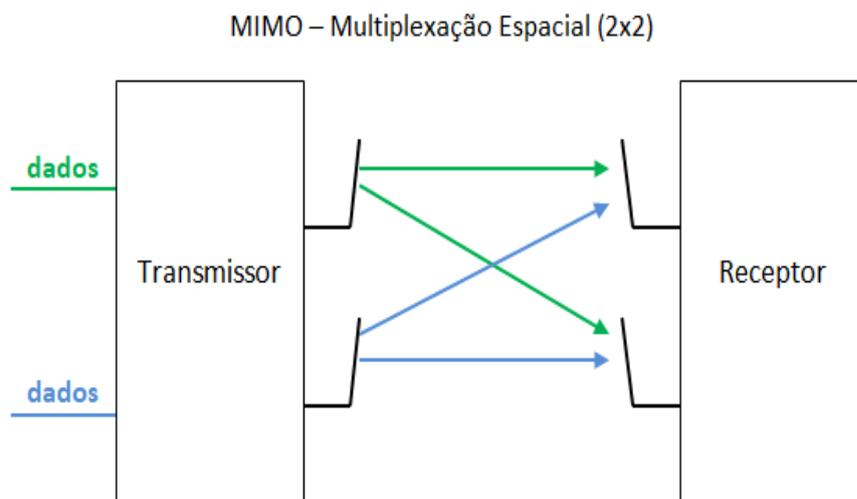


Figura 10: Exemplo de MIMO - *Multiple Input Multiple Output*.

O MIMO pode ser utilizado quando a relação sinal-ruído é alta, ou seja, em um canal de rádio de alta qualidade. Em síntese, quanto mais alta for esta relação, menor é o efeito do ruído sobre a detecção ou medição do sinal.

2.3 Nó de Retransmissão

Nó de retransmissão (*relay node*) é um recurso do LTE-Advanced que objetiva o provisionamento de redes supereficientes, combinando pequenas e grandes células. Trata-se de estações base de baixa potência que melhoram a cobertura e a eficiência nas bordas das grandes células, áreas de *hot-spot* e para conectar pontos remotos que não possuem interconexões em fibra ótica. Conforme ilustrado na Figura 11, os nós podem estar conectados ao *relay node* ou ao *Donor* eNB, cada um com uma interface de rádio específica (U_u para *relay node*, U_n para *Donor* eNB), mas que podem ser diferentes (*outband*), ou as mesmas (*inband*). No caso de serem *inband*, há um risco de auto interferência no RN, mas isso pode ser atenuado com esquemas de compartilhamento de tempo entre as interfaces.

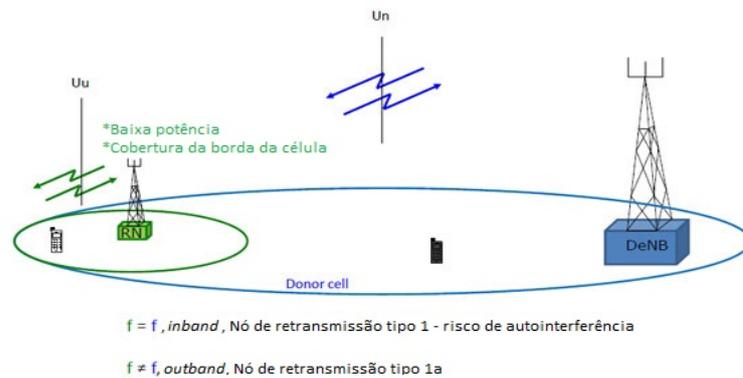


Figura 11: Exemplo de nó de retransmissão.

Fonte: Imagem retirada de [22].

2.4 Coordinated Multi Point Operation (CoMP)

No *Release 11*, o LTE-Advanced trouxe o recurso de CoMP (*Coordinated Multi Point operation*), que possui relação com o conceito de CA (*Carrier Aggregation*). Diante da necessidade de melhorar o desempenho nas bordas das células, o CoMP permite mais de um ponto de TX (*transmit*) coordenando transmissões em DL, bem como um número de pontos de RX (*receive*) coordenando recepção em UL. O objetivo principal é aumentar a cobertura, tendo em vista que o mesmo dado estará em diferentes pontos de transmissão e recepção, aumentando a confiabilidade da rede. Os modos de operação do CoMP, conforme a Figura 12, podem ser *joint transmission* ou *dynamic point selection*. No modo *joint* a transmissão dos dados ocorre na mesma frequência e no mesmo tempo

dos múltiplos pontos, já no modo *dynamic point selection* as transmissões são alternadas dinamicamente entre os pontos de transmissão.

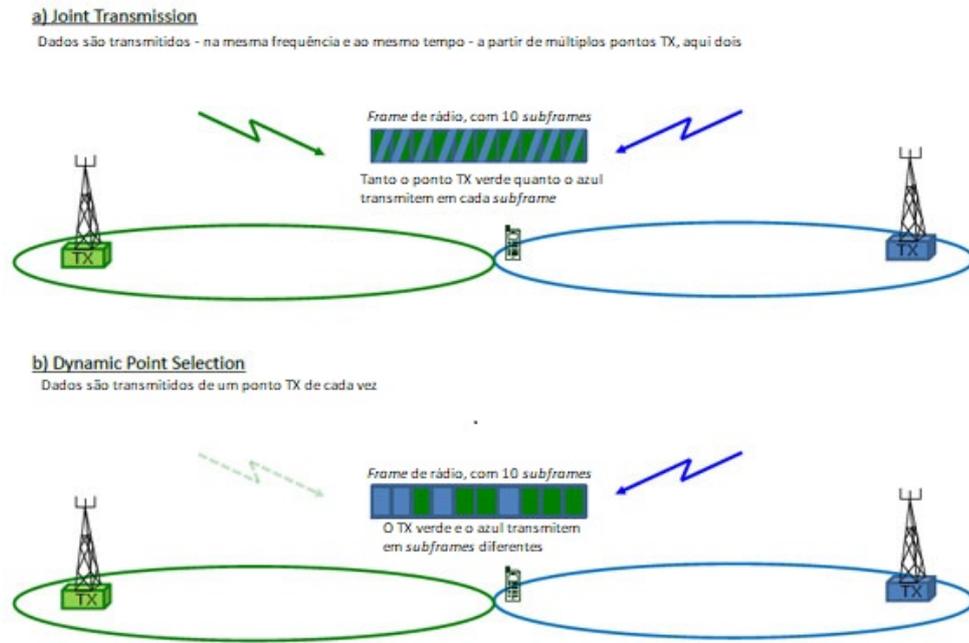


Figura 12: Exemplo de CoMP.

Imagem retirada de [22].

3 SOLUÇÕES DE REDES COGNITIVAS DO LTE

A crescente demanda por vazão nas redes móveis envolve naturalmente a necessidade de novas faixas de frequências para transmissão. No entanto, as redes 4G teriam alcançado o limite físico diante da escassez de novas faixas de frequências dentro daquelas definidas atualmente pelas regulações internacionais para utilização das redes móveis de dados. Diante das complexidades econômicas e regulatórias de se buscar a utilização das frequências altas, as pesquisas indicam que a faixa de 5 GHz é a que possui melhor potencial segundo os fabricantes de infraestrutura de telecomunicações e chips integrados [23]. Por esta razão que o 3GPP tem fomentado estudos voltados para utilização dos sistemas de telefonia móvel em coexistência com as faixas de espectro não licenciadas.

É importante registrar que os estudos voltados para coexistência entre redes em faixas públicas de frequências buscam principalmente permitir que as redes celulares aumentem a velocidade dos dados em distâncias curtas, sem exigir que o usuário use uma rede Wi-Fi separada como normalmente faria. Na prática permanece um canal de controle usando LTE, mas os dados podem fluir também pela banda não licenciada de 5 GHz, em vez de pelas frequências da operadora. Este conceito de operação é importante tendo em vista as disparidades de alcances típicas dos equipamentos LTE e Wi-Fi.

3.1 LTE-U

Conforme já mencionado anteriormente, o ISM está no grupo das bandas não-licenciadas, ou seja, de utilização pública, desde que atendidas as normas de regulação locais existentes. Na esteira da necessidade de se prover maior vazão aos usuários das redes móveis LTE, diversas instituições de pesquisa iniciaram estudos visando modificar o padrão LTE de forma a aumentar o desempenho com transmissão de dados em uma composição de coexistência de bandas licenciadas e não licenciadas. Uma dessas soluções é o LTE-U, que foi apresentado em meados de 2014 como proposta de um novo padrão de comunicações em banda não-licenciada para ser usado em redes LTE nas versões 10/11/12 do 3GPP existentes. O padrão foi concebido no âmbito do LTE-U Forum, criado pela Verizon, em associação com Alcatel-Lucent, Samsung, Qualcomm e Ericsson.

O LTE-U Forum é formado por um número limitado de empresas participantes, e apesar do padrão ser uma derivação do LTE, as informações técnicas não são publici-

zadas no âmbito do 3GPP, que busca sempre envolver o consenso de todas as empresas participantes, inclusive das empresas que representam a indústria do Wi-Fi.

Tecnicamente o LTE-U foi concebido para operar em modo de ciclos predefinidos de duração de transmissão ou *duty cycle*. Na prática, o mecanismo ocupa o canal por um período de tempo seguido de outro período de pausa ou silenciamento, o que permite a outras tecnologias como o IEEE 802.11, por exemplo, fazer uso do recurso. Uma metodologia dinâmica de definição do tempo do *duty cycle*, tomando como base medições de potência no meio de transmissão pode ser implementada, visando o aumento do desempenho.

O Forum LTE-U provê todas as informações referentes à avaliação técnica da utilização do padrão, tais como:

- relatório técnico (TR) incluindo metodologia, cenários de implantação e observações de avaliações de tecnologia baseadas em simulação abrangente de rede;
- especificações mínimas de desempenho de equipamentos de *secondary cells* (infraestrutura de rede baseada em espectro não licenciado e agregação de portadoras) e usuários;
- especificações de coexistência projetadas para garantir o compartilhamento justo do espectro entre o LTE-U e o Wi-Fi, bem como entre operadoras LTE-U.

As especificações garantem a operação desta modificação do LTE na faixa do espectro de 5 GHz, com portadoras do tipo SDL (*Supplemental Downlink*) trabalhando em conjunto com as faixas licenciadas do LTE padrão 3GPP. O problema inicial, e um dos principais, é que a célula secundária pode gerar colisão com usuários da(s) rede(s) Wi-Fi quando entra em modo ON, ou seja, quando está transmitindo, pois o LTE-U possui mecanismos de acesso ao meio que pode causar mais colisões do que aqueles que usam método LBT. A célula secundária, quando está em modo ON, funciona como o LTE tradicional, porém com algumas modificações, dentre as quais podemos citar duas mais importantes:

- CSAT (*Carrier Sense Adaptive Transmission*): mecanismo de acesso ao meio que avalia a ocupação e com base nas métricas coletadas estabelece o valor do período de transmissão (*duty cycle ON*);
- LDS (*LTE-U Discovery Signal*): é um sinal relacionado aos parâmetros de sincronização necessários ao equipamentos dos usuários para manter o alinhamento de tempo e frequência com a célula secundária.

O CSAT definido pelo LTE-U Forum é usado pela célula secundária para sensoriar o meio de forma a verificar sua ocupação por outros usuários e, de acordo com as informações coletadas, estabelecer um padrão *duty cycle* que consiste basicamente na definição dos tempos ON e OFF. Este padrão *duty cycle* é periodicamente ajustado de acordo com as informações coletadas a cada CSAT executado, cujo objetivo é proporcionar um compartilhamento mais justo possível do canal.

Com relação aos valores, as especificações técnicas do LTE-U Forum para o algoritmo do *duty cycle* ficam a critério de adaptações dos fabricantes de equipamentos. Em resumo, o eNB deverá ser capaz de criar o padrão de tempo ON/OFF do *duty cycle*, de acordo com medições de utilização do meio recebidas dos pontos de acesso Wi-Fi ou outras operadoras LTE-U. Essa medição é definida no padrão como Wi-Fi MU (de *Media Utilization*) e ocorre sempre que a LTE-U *SCell* está no estado OFF, e é a base para os ajustes no padrão do *duty cycle*. O CSAT monitora o resultado do Wi-Fi MU para aumentar ou diminuir o valor dos períodos ON/OFF do *duty cycle*. O LTE-U Forum definiu os valores mínimos e máximos a serem utilizados no padrão CSAT conforme a seguir:

- $4 \text{ ms} \leq T_{\text{ON}} \leq 20 \text{ ms}$;
- $1 \text{ ms} \leq T_{\text{OFF}} \leq T_{\text{LDS}}$.

T_{ON} e T_{OFF} são os períodos em que respectivamente o usuário está transmitindo na célula secundária e ocioso. T_{LDS} é o intervalo de tempo de envio de dados de controle voltado à obtenção e manutenção de sincronismo de tempo e frequência pelo usuário com o equipamento controlador da célula secundária, além de outras funções e medições que darão subsídio ao algoritmo do *duty cycle* ajustar os valores dos estados ON e OFF. O LDS pode ser configurado para ser enviado em intervalos de 40, 80 ou 160 ms.

O LTE-U é compatível com o conceito de implementação de *Carrier Aggregation* (CA), pois a tecnologia está ancorada em uma célula primária que é a licenciada, além da secundária que é a não licenciada. No entanto, esta dissertação foca no tráfego *downlink* na faixa não licenciada e tráfego *uplink* na faixa licenciada.

3.2 LAA

Uma iniciativa promissora chama-se *Licensed-Assisted Access* (LAA), que basicamente se constitui em uma implementação em que se agregam as redes em duas células, a primeira operando na faixa licenciada, com requisitos de QoS e a segunda célula na

faixa não licenciada, oportunisticamente para aumentar a taxa de dados. No entanto, diferentemente do LTE-U que não faz verificação de ocupação do meio de acesso antes da transmissão dos dados, o LAA opera mediante processo de sensoriamento do espectro, ou seja, um mecanismo de escuta do meio de transmissão capaz de detectar alguma transmissão em curso e proceder com a espera antes da sua transmissão.

Introduzido inicialmente em 2015, pelo 3GPP *Release* 13, o LAA permite que uma LTE *Base Station* transmita dados na faixa não licenciada de 5 GHz para escoamento de tráfego de *download*, enquanto a faixa licenciada fica responsável pelo dados de *uplink* e tráfego de controle da rede, fazendo uso de agregação de portadoras [24]. Posteriormente, o *Release* 14 adicionou a possibilidade do tráfego de *uplink* também pela faixa não licenciada, em um padrão que ficou conhecido como tecnologia *enhanced LAA* (LTE-eLAA) [25].

Os principais requisitos do LAA são:

- o LAA não pode ocasionar impactos em redes Wi-Fi mais do que qualquer outra rede Wi-Fi incluída no mesmo ambiente, o que é alcançado com a definição de parâmetros mínimos a serem observados que são a vazão (*throughput*), a latência e a variação do atraso (*jitter*);
- inclusão de LBT quando em uso nas faixas de espectro não licenciadas;
- uso de SCell (*Secondary Cell*) operando na faixa não licenciada para controlar o LBT;
- limite de detecção de energia (*Energy Detection Threshold* - EDT) para verificação de meio ocioso.

O espectro não licenciado de 5 GHz está disponível globalmente, no entanto um equipamento de rádio operando nesta faixa deve obedecer às normas regulatórias, que variam em cada região do mundo. Além dos requisitos de uso somente interno, potência máxima de saída, densidade espectral de potência na banda, a operação do LTE em espectro não licenciado também deve implementar as funcionalidades *Dynamic Frequency Selection* (DFS), *Transmit Power Control* (TPC) e LBT, de forma que se evite as interferências em radares [26].

A Anatel, em sua agenda regulatória do biênio 2017-2018, estabeleceu em um de seus itens o seguinte tema a ser deliberado: item 51 - “Elaborar regulamentação que permita o uso da faixa de 5 GHz por operadoras de forma compartilhada no espaço e

no tempo com tecnologias Wi-Fi” [27]. Esta pauta surgiu diante da necessidade de se obter mais banda diante dos conteúdos digitais disponíveis, cada vez mais voltados para mídias em tempo-real, e da escassez de faixas disponíveis no espectro. Adicione-se a isto o fato de estarem surgindo na época diversas tecnologias que permitem o compartilhamento do uso de faixas entre serviços de telecomunicações que, em regra, necessitam de autorização de acesso a radiofrequências e serviço ou aplicações que são dispensadas desse tipo de autorização. Na prática a Anatel decidiu que não haverá qualquer alteração na regulamentação vigente, apenas a definição de que os equipamentos que farão uso da coexistência de frequências para agregação de portadoras façam obrigatoriamente uso do recurso LBT e que sejam estabelecidos critérios de certificação dos mesmos.

3.2.1 Detecção de Energia

O processo de detecção de energia é um tipo de CCA que verifica se o meio está ocupado através de medição de energia total que o dispositivo recebe. O processo de LBT é baseado em um método de detecção de energia para determinação da ocupação de um canal para, caso esteja livre, iniciar a utilização para transmissão de dados. Se a energia detectada estiver acima do *threshold* predefinido, o canal é considerado ocupado, isto torna o ED *threshold* um dos parâmetros mais importantes do mecanismo de coexistência entre redes.

De acordo com o 3GPP, o ED *threshold* para o LAA deveria ser igual a -72 dBm para um canal de 20 MHz. No entanto, a própria especificação já indica que tal parâmetro deve ser adaptativo, baseado em mecanismo definido no *Release* 14 do LTE [28].

3.2.2 Contention Window

O CW é um parâmetro que está relacionado com as ocorrências de colisões na rede e é definido com base em classes de prioridade, que identificam o tipo de tráfego. Conforme vão ocorrendo as colisões, o valor do CW é incrementado. Este processo de identificação é realizado pelo LAA com base no feedback do HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) recebido dos nós receptores, que em síntese consiste em um processo em que se contabiliza a quantidade de NACKs e caso a quantidade supere um valor (normalmente 80%), o CW é incrementado. O CW está diretamente relacionado com o tempo que o host espera para ocupar o canal com sua transmissão. Além disso, o mecanismo zera o CW ao estado

inicial após quatro transmissões sucessivas com porcentagem de NACKs abaixo do limiar, pois trata-se de um indicativo de que houve melhora das condições do canal.

A Tabela 1 mostra principalmente a relação do CW com o tamanho da oportunidade de transmissão:

Tabela 1: Classes e parâmetros do LAA.

Fonte: Adaptada de [29].

Classe	CW-min	CW-max	TXOP	Tamanhos CW
1	3	7	2 ms	3, 7
2	7	15	3 ms	7, 15
3	15	63	10 ou 8 ms	15, 31, 63
4	15	1023	10 ou 8 ms	15, 31, 63, 127, 255, 511, 1023

3.2.3 Discovery Reference Signal

O DRS consiste em uma série de sinais cujo objetivos incluem descoberta e sincronização com células LTE além do *Radio Resource Management* (RRM). Dentre os sinais temos o *Primary Synchronization Signal* (PSS), o *Secondary Synchronization Signal* (SSS), o *Cell-Specific Reference Signal* (CRS) e, caso configurado, o *Channel State Information - Reference Signal* (CSI-RS).

O DRS pode ser transmitido dentro de uma janela de tempo chamada *DRS Measurement Timing Configuration* (DMTC), que tem uma duração de 6 ms e um período configurável de 40/80/160 ms. A transmissão de DRS também está sujeita ao processo de LBT.

3.2.4 LAA Reservation Signal

O LTE tradicional transmite de forma síncrona e inicia no limite do quadro. Com o advento do LBT, após o nó transmissor detectar que o canal está ocioso, há um espaço de tempo até que se chegue no limite do quadro e ele possa iniciar efetivamente sua transmissão. Neste espaço de tempo, nós vizinhos que não estão submetidos ao LBT, como por exemplo Wi-Fi, podem aproveitar dessa espera que o LAA eNB faz, e que deixa o canal ocioso, para iniciarem a sua transmissão. Isso pode causar colisão e para solucionar este problema, o LAA emite um sinal de reserva do canal após o LBT ter tido sucesso e o acesso ao meio ter sido adquirido; acesso este que vai durar até o próximo limite de

quadro. Apesar de mitigar algumas colisões, esta reserva de sinal naturalmente diminui a eficiência espectral, afetando principalmente as redes não submetidas ao LBT, como o Wi-Fi. Em resumo, os nós vizinhos não irão transmitir pois o canal estará reservado pelo tempo do TXOP adquirido pelo nó LAA. A Figura 13, que ilustra este mecanismo, indica uma linha do tempo e um TXOP de 4 ms contendo quatro *subframes*, o primeiro é um *subframe* parcial, indicado pelo RS (*Reservation Signal*), contendo o sinal que reservará os próximos *subframes* (SF1, SF2 e SF3) até o limite do TXOP, totalizando uma ocupação de canal de 4 ms ou quatro *subframes*.

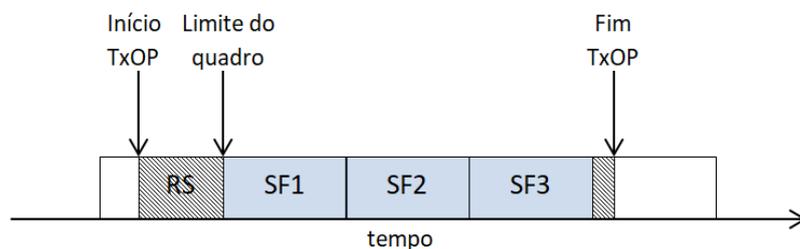


Figura 13: Ilustração do uso do RS.

Fonte: Imagem adaptada de [15].

3.3 MulteFire

Uma aliança formada em dezembro de 2015 por grandes empresas da indústria de tecnologia como Qualcomm, Nokia, Ericsson e Intel promoveu uma alternativa para utilização do LTE em faixas de frequências não licenciadas que foi denominada como MulteFire. Foi concebida para ser uma versão específica para *Small Cells* (SCs), ou seja, uma rede LTE com todas as funcionalidades que o padrão disponibiliza tais como: VoLTE, dados em alta velocidade e mobilidade, porém sem o custo de faixas licenciadas, aprovações regulatórias e com baixa complexidade de implantação, tal como em redes Wi-Fi. O padrão foi definido para fazer uso apenas do espectro não licenciado com portadora única. A intenção é permitir que pequenos provedores provisionem redes para telefonia móvel voltadas para a indústria 4.0, independente de concessões de faixas de frequência, que normalmente são absorvidas por grandes operadoras em leilões governamentais.

As primeiras especificações técnicas do MulteFire foram lançadas em janeiro de 2017 [30] e, assim como o Wi-Fi, dependem apenas do espectro não licenciado para o

meio de transmissão e disponibilizam aos clientes serviço com ou sem *SIM card*. Em resumo, a tecnologia permite benefícios do LTE em uma infraestrutura física e lógica de rede de telecomunicações tão simplificada quanto a de uma rede Wi-Fi. No entanto, diante da necessidade de garantir o LBT, requisito para transmissões em faixas não licenciadas, o MulteFire implementou diversas modificações na interface aérea de radiofrequência do LTE padrão.

O MulteFire suporta qualquer faixa do espectro na qual seja utilizada contenção no meio de transmissão aéreo para coexistência e compartilhamento justo de frequências, tais como a banda global de 5 GHz ou a 3,5 GHz (serviço de banda larga via rádio para cidadãos dos EUA). Garante também toda a gama de serviços disponíveis no LTE incluindo melhorias para IoT [30].

Dois tipos de arquiteturas estão disponíveis e podem ser provisionadas tanto por operadoras tradicionais quanto por pequenos provedores:

- modo de acesso PLMN (*Public Land Mobile Network*): permite a operadoras de telefonia móvel estender sua cobertura com a utilização das faixas não licenciadas de frequência, principalmente em áreas onde a faixa licenciada não é acessível;

- modo de acesso NHN (*Neutral Host Network*): topologia física e lógica de rede similar ao Wi-Fi com acesso à Internet.

As especificações da arquitetura de rede do MulteFire são baseadas no 3GPP *Release 13* e herdam propriedades como suporte a mobilidade avançada, segurança, interoperabilidade, suporte para diferentes níveis de QoS em diferentes fluxos de IP e diferentes níveis de serviços para os usuários [30].

3.4 Trabalhos Relacionados à Coexistência em Faixas não Licenciadas

A indústria de telefonia móvel tem demonstrado muito interesse em soluções voltadas para uma melhor utilização do espectro, que é a base do conceito de redes cognitivas, cujo objetivo é basicamente expandir a capacidade das redes sem fio. Em 2006 o tema já era discutido por importantes autores, quando se citava a limitada disponibilidade do espectro e a ineficiência de sua utilização direcionava os estudos na busca pela exploração de acessos oportunistas nas faixas existentes [11]. Em particular, duas tecnologias derivadas do LTE para coexistência em faixas não licenciadas ganharam muita atenção: o LAA e LTE-U. Embora estas estejam ganhando espaço rapidamente no mercado, os estudos na

literatura normalmente focam nos resultados de apenas uma única tecnologia. Em uma pesquisa relacionada ao tema [15], são apresentados de forma abrangente e em riqueza de detalhes os padrões LTE-U e LAA, suas características técnicas de funcionamento, bem como foi construído um *framework* específico para coexistência das redes LTE e Wi-Fi, aderente às especificações técnicas tanto do LTE quanto do Wi-Fi, além de apresentação de testes comparativos dos padrões LAA e LTE-U, operando em faixas compartilhadas com rede Wi-Fi. Assim como no artigo supramencionado, em [13] os autores também concluíram que o LAA é uma solução promissora para coexistência. No entanto os testes foram feitos com base em um cenário com baixa densidade (dois usuários) e apenas foi avaliado o padrão LTE com LBT versus o Wi-Fi. Em [5], é abordada a reutilização de faixas de frequências através de acesso dinâmico ao espectro (*Dynamic Spectrum Access - DSA*), um conceito muito importante no contexto das redes cognitivas e do gerenciamento de utilização do espectro. Já em [31] e [32] temos análises do LTE-U e LAA respectivamente, que são padrões muito presentes em estudos para coexistência de redes em faixas frequências, corroborando que o aumento massivo do tráfego das redes sem fio vem motivando as pesquisas e o desenvolvimento de novas gerações de redes *wireless*. O tema da coexistência vem sendo bastante estudado, porém não há disponibilidade de uma variedade de simuladores que contemplem todas as tecnologias, mas o que se verifica atualmente é que o foco das pesquisas estão voltadas para o simulador ns-3 que fornece modelos confiáveis e aderentes aos padrões de especificações oficiais das redes móveis do Wi-Fi Alliance (Wi-Fi) e do 3GPP (LTE), especialmente as derivações LAA e LTE-U voltadas para o compartilhamento de faixas de frequências. Em [33] parte do presente trabalho foi publicada, porém com o parâmetro do protocolo de controle DRS configurado em seu valor padrão de 80 ms e em cenários de até 80 usuários no total.

4 SIMULAÇÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos com base nas simulações realizadas no software ns-3. Inicialmente são feitas considerações a respeito do simulador ns-3 e do *framework* LENA (LTE/EPC Network simulAtor) e são apresentados os objetivos propostos, os cenários e as métricas de avaliação do desempenho.

4.1 Simulador

Para simulação das redes LTE e Wi-Fi, foi utilizado o software *Network Simulator* – versão 3, popularmente conhecido como ns-3. O ns-3 é um software simulador de redes com código aberto voltado basicamente para ensino e pesquisa. Trata-se de um sistema com modelos de alta fidelidade para todas as camadas de uma pilha de protocolos de rede (*full stack*). Permite alta diversidade de cenários de redes, das mais simples às mais complexas, cabeadas ou sem fio e nós estáticos ou com movimentação. Permite ainda a extração de *logs* em diversos níveis e a exibição de resultados de forma automática. O modelo LTE do NS-3 [34] foi modificado para criação dos modelos LTE-U e LAA no âmbito do projeto LENA [35]. Foi desenvolvido de acordo com as *Femto Application Platform Interfaces* (FAPIs), definidas pelo *Small Cell Forum* e permite a fornecedores desenhar e testar algoritmos e soluções de redes. As FAPIs são definidas para encorajar a competição e a inovação entre fornecedores de plataformas de hardware e software, fornecendo uma *Application Platform Interface* (API) comum. Os modelos Wi-Fi foram desenvolvidos seguindo os padrões IEEE, começando com os modelos 802.11a iniciais e posteriormente estendendo a muitos aspectos dos padrões 802.11b/g/p/e/n/ac. Em [15], foram apresentadas novas extensões para o ns-3 voltadas para a coexistência de redes na faixa de 5 GHz. Tendo como base o modelo do LTE, os autores de [15] desenvolveram os modelos para o LAA e LTE-U que foram utilizados neste trabalho para as avaliações de desempenho.

4.2 Metas

As metas a serem alcançadas com os estudos realizados a partir dos resultados das simulações foram definidas no sentido de simular diferentes cenários de redes cognitivas,

quantidade de usuários, parâmetros de controle e comparar o desempenho dos mecanismos de acesso ao meio LBT do LAA e *duty cycle* do LTE-U, coexistindo e operando na mesma faixa de frequência da rede Wi-Fi, além dos impactos causados nos usuários da rede Wi-Fi.

O foco da avaliação de desempenho é medir o impacto que uma rede LTE, que nativamente opera em faixa licenciada do espectro, impõe a uma rede Wi-Fi quando compartilha a faixa pública de frequência de 5 GHz. Considera-se uma coexistência justa quando os usuários da rede LTE não impactam os usuários da rede Wi-Fi na sua faixa de frequência nativa (não licenciada) mais do que outros usuários de outras redes Wi-Fi compartilhando a mesma faixa de frequência. Esta definição foi utilizada para definir a metodologia de avaliação que consiste nos cenários e métricas a seguir:

- avaliar o desempenho e os impactos que usuários Wi-Fi causam em outros usuários Wi-Fi quando compartilhando a mesma frequência de transmissão;
- avaliar o desempenho do padrão LTE-U quando compartilhando a mesma frequência de transmissão de 5 GHz de uma rede Wi-Fi e os impactos causados nos usuários nativos;
- avaliar o desempenho do padrão LAA quando compartilhando a mesma frequência de transmissão de 5 GHz de uma rede Wi-Fi e os impactos causados nos usuários nativos;
- comparar o desempenho do LAA com o LTE-U mediante análise das métricas de vazão e latência média.

4.3 Cenários e Parâmetros

O estudo dos diferentes padrões e os respectivos impactos foram realizados em cenário da especificação técnica do 3GPP *Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum* (TR 36889-011) [36], onde duas operadoras implantam 4 (quatro) SCs cada, em um prédio de um único andar, cujas dimensões são de 120 por 50 m. A distância entre os pontos centrais consecutivos das SCs de uma operadora é de 25 m. A distância entre as SCs mais próximas de diferentes operadoras é de 5 m. Os testes se baseiam na utilização das SCs, ou seja, células pequenas com alcance reduzido, cenário *indoor* e na utilização da faixa de frequência de 5 GHz em coexistência com usuários Wi-Fi.

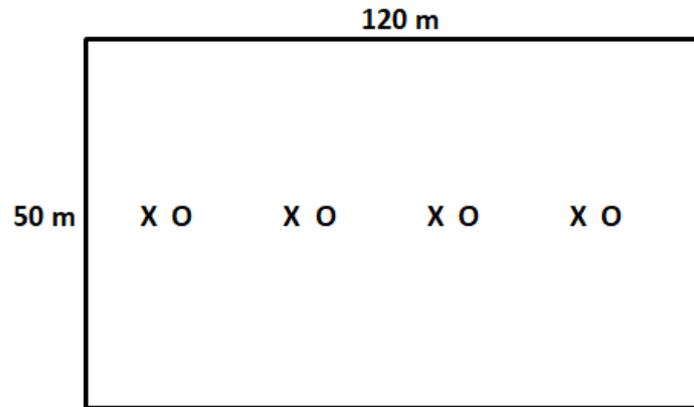


Figura 14: Topologia geográfica.

Na Figura 14, os 'X's e 'O's denotam os pontos centrais das SCs para as duas operadoras, que podem ser de redes Wi-Fi ou LTE (LAA ou LTE-U). Desta forma, em uma simulação de coexistência entre Wi-Fi e LAA/LTE-U, os 'X's são os APs da rede Wi-Fi e os 'O's são as estações rádio base da rede LAA/LTE-U. São utilizados N UEs (STAs) associados a cada célula, que são distribuídos aleatoriamente no terreno e permanecem estáticos durante toda a simulação.

Para cada conjunto de usuários da rede Wi-Fi e da rede LTE (LAA ou LTE-U), há um único nó fonte que envia fluxos de tráfegos para os N diferentes nós de destinos na frequência compartilhada dentro da faixa de 5 GHz, em um mesmo canal predefinido no código fonte do simulador. Estes fluxos são gerados sob o modelo de tráfego *Poisson* a uma taxa λ (*lambda*) de 2,5. De acordo com a especificação TR 36.814 do 3GPP este modelo é denominado *FTP Traffic Model 1*. Os fluxos são enviados utilizando-se o UDP como protocolo de transporte.

Tabela 2: Parâmetros gerais.

Área	120m x 50m
Qtde. de APs/ENBs	4
Qtde. de hosts em cada rede	4, 20, 40 e 80
Fontes	1(uma) fixa em cada rede
Destinos	demais nós
Protocolo	tipo FTP (UDP na camada de transporte)
Tamanho Pacote	512 kB
Taxa máxima de transmissão	300 Mbps

Tabela 3: Parâmetros do Wi-Fi.

Versão	802.11n
Acesso ao meio	CSMA-CA
Detecção de Energia	-62 dBm
Janela de contenção mínima	15
Janela de contenção máxima	63

Tabela 4: Parâmetros do LTE-U.

Acesso ao meio	<i>duty cycle</i> (adaptação do CSAT)
Período ON	entre 4 e 20 ms
Período OFF	entre 1 e 160 ms

Tabela 5: Parâmetros do LAA.

Acesso ao meio	LBT
Detecção de Energia	-62 dBm
Período do DRS	40, 80 e 160 ms
Oportunidade de transmissão	8 ms
Classe	3
Janela de contenção mínima	15
Janela de contenção máxima	63

4.4 Resultados

Os resultados foram obtidos mediante 10 (dez) rodadas de simulação, cada uma com 60 s de duração, sendo apresentados a média e o intervalo de confiança de 90%. Os nós fontes e destinos foram posicionados aleatoriamente em diferentes locais a cada rodada. Foi realizado um conjunto de rodadas de simulações em diferentes densidades (8, 40, 80 e 160 usuários) conforme descrito na Tabela 2, sempre metade dos usuários em cada rede (ex. para 160 usuários, 80 na rede LAA/LTE-U e 80 na rede Wi-Fi). Além disso, para o LAA foi feita a variação do parâmetro DRS, cujo valor padrão é de 80 ms e outras duas opções são 40 e 160 ms. As densidades ou quantidade de usuários distribuídos no ambiente de simulação foram definidas para simular diferentes níveis de utilização dos canais de transmissão.

4.4.1 Primeira Simulação - Coexistência Wi-Fi x Wi-Fi

A primeira simulação foi realizada com o objetivo de se obter um parâmetro que permita a comparação entre duas redes que usam nativamente a faixa de frequência não licenciada de 5 GHz e assim permitir a análise mediante a substituição de uma das redes

pelas tecnologias LAA e LTE-U, que utilizarão seus respectivos métodos de acesso ao meio de transmissão. Desse modo, pode-se avaliar o quão justo é o compartilhamento da frequência não licenciada.

Seguindo a estratégia proposta, iniciamos com a avaliação de um cenário tradicional, e que será nosso *baseline*, exibida nas Figuras 15 e 16, onde duas redes Wi-Fi distintas, que foram definidas como Wi-Fi A e Wi-Fi B, compartilham o mesmo meio de transmissão. Em uma rede menos densa, com 8 usuários dispostos aleatoriamente na topografia, observa-se uma menor interferência entre as redes tendo em vista um menor compartilhamento de pontos de acesso e menos colisões nas transmissões. Como resultado, observa-se pouca diferença na vazão entre as duas redes, em média 128,06 Mbps na rede Wi-Fi A e 128,21 Mbps na rede Wi-Fi B. A latência também corrobora essa análise, ficando em média em 16,45 ms na rede A e 16,48 ms na rede B.

Aumentando-se a densidade para 40 usuários não se percebe ainda alterações significativas no impacto, com as redes A e B entregando 127,58 Mbps e 127,81 Mbps de vazão média e 16,92 ms e 16,55 ms de latência respectivamente.

Com a adição de mais usuários na topografia, casos de 80 e 160 usuários, pode-se verificar que uma das redes recebe certo impacto, resultado de maior compartilhamento de pontos de acesso, bem como maior ocupação do canal por uma das redes. Nestes cenários uma das redes teve sua vazão diminuída para 115,10 Mbps (80 usuários) e outra para 114,06 Mbps (160 usuários), com latência nestas redes registrando 21,81 e 21,09 ms nas densidades de 80 e 160 usuários respectivamente.

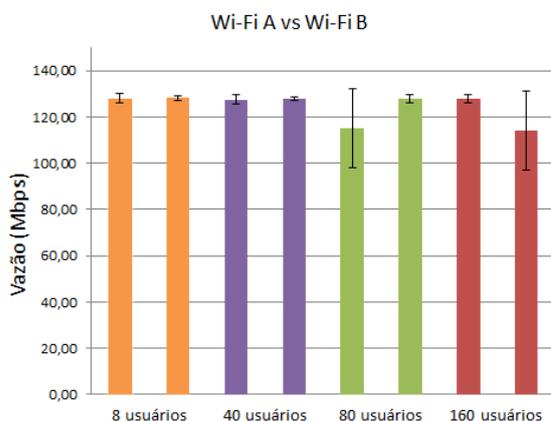


Figura 15: Vazão Wi-Fi A vs Wi-Fi B.

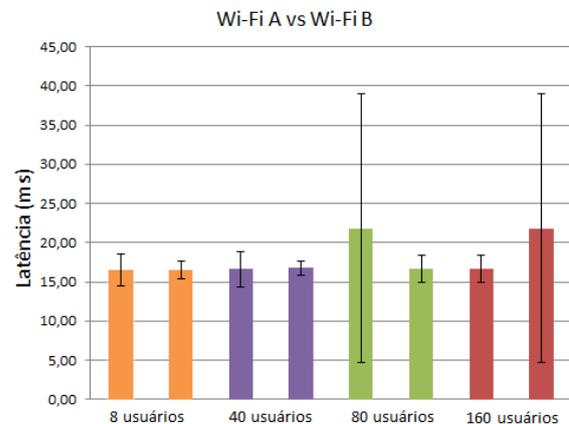


Figura 16: Latência Wi-Fi A vs Wi-Fi B.

4.4.2 Segunda Simulação - Coexistência LTE-U x Wi-Fi

A primeira análise de padrões de coexistência foi realizada com simulações do LTE-U compartilhando a frequência de 5 GHz com uma rede Wi-Fi.

Inicialmente com densidade de 8 usuários no terreno, pudemos perceber conforme as Figuras 17 e 18, que o padrão LTE-U impõe significativo impacto aos usuários da rede Wi-Fi, o que pode ser explicado pelo mecanismo de acesso ao meio sem LBT baseado em *duty cycle*. A vazão alcança 127,90 Mbps, bem próxima do cenário *baseline*, também ilustrado nas figuras para efeito de comparação. No entanto, ao compartilhar a mesma frequência com a rede Wi-Fi, o LTE-U impõe significativo impacto aos usuários nativos que somente podem transmitir durante os períodos de OFF do LTE-U, limitando sua vazão média em 66,60 Mbps, corroborado pela latência média verificada de 32,90 ms, muito acima dos 18,90 ms do LTE-U.

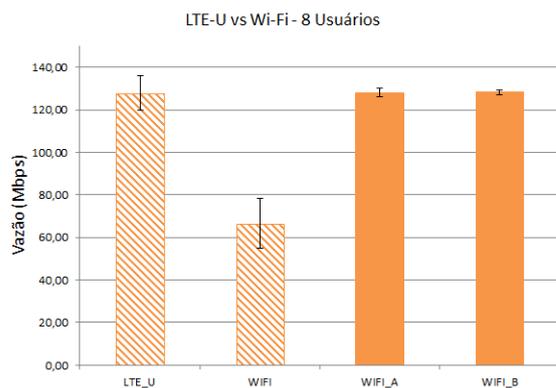


Figura 17: Vazão LTE-U vs Wi-Fi - 8 usuários.

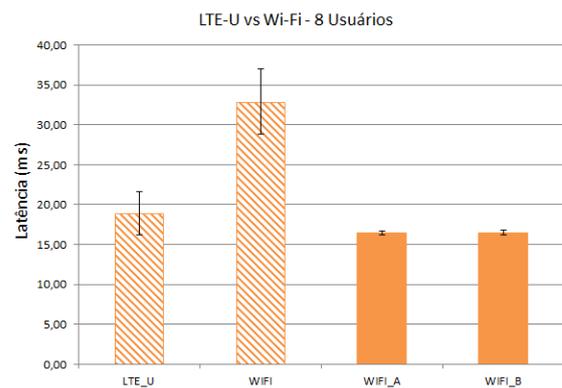


Figura 18: Latência LTE-U vs Wi-Fi - 8 usuários.

Aumentando o número de usuários na rede para 40 no total, o LTE-U perdeu algo em torno de 22% de desempenho e a rede nativa permaneceu sofrendo impacto significativo, alcançando um máximo de 73,20 Mbps de vazão média conforme a Figura 19. Tais desempenhos podem ser ilustrados também pela Figura 20 que indica latência de 27,20 ms no tráfego LTE-U, 44% mais lento que na rede com 8 usuários. Já a rede nativa Wi-Fi obteve latência média de 30,40 ms nas simulações com 40 usuários.

Nas Figuras 21 e 22 para 80 usuários, o desempenho do LTE-U foi menor em aproximadamente 17% em comparação ao da rede com 40 usuários, mantendo o mesmo nível de interferência na rede Wi-Fi, que por sua vez obteve vazão média de 64,60 Mbps e latência de 35,40 ms. Em comparação com o cenário *baseline*, o LTE-U como vizinho

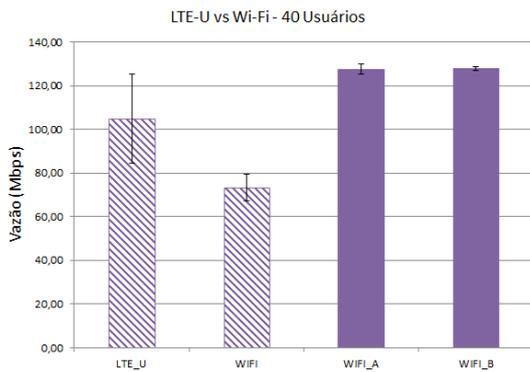


Figura 19: Vazão LTE-U vs Wi-Fi - 40 usuários.

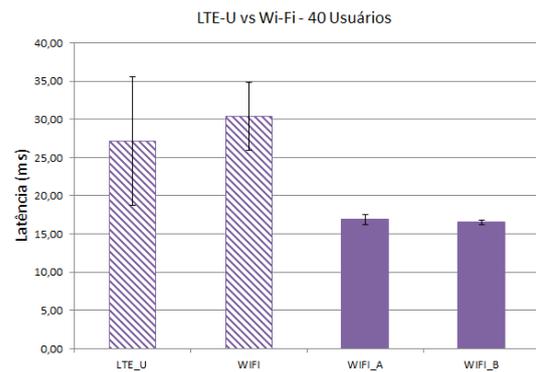


Figura 20: Latência LTE-U vs Wi-Fi - 40 usuários.

da rede Wi-Fi obteve desempenho cerca de 43% inferior (89,70 Mbps) do que um outro vizinho também Wi-Fi (127,91 Mbps).

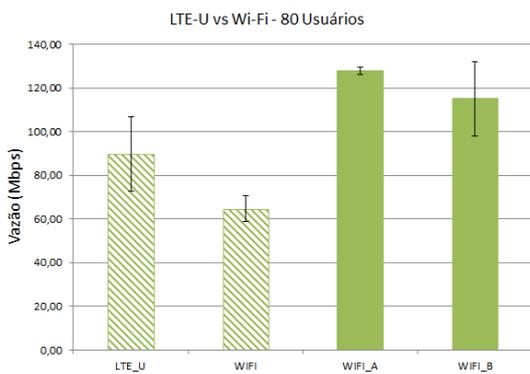


Figura 21: Vazão LTE-U vs Wi-Fi - 80 usuários.

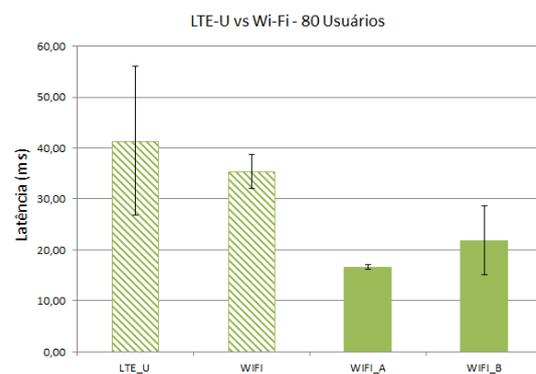


Figura 22: Latência LTE-U vs Wi-Fi - 80 usuários.

As Figuras 23 e 24 ilustram o cenário mais denso das simulações realizadas para o padrão LTE-U. Foi mantido o mesmo nível médio de desempenho de vazão e latência das redes LTE-U e Wi-Fi quando comparados ao cenário com 80 usuários.

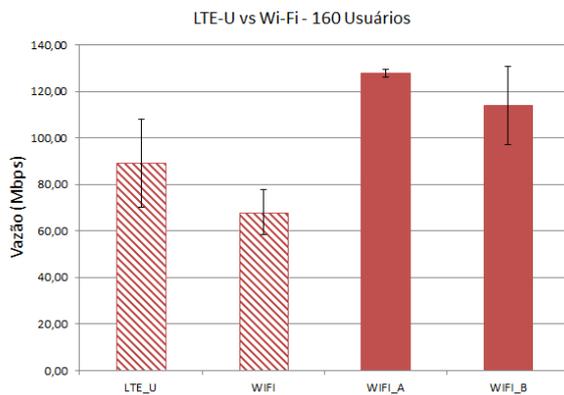


Figura 23: Vazão LTE-U vs Wi-Fi - 160 usuários.

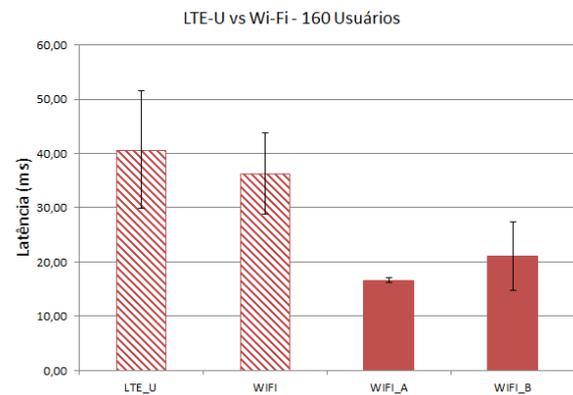


Figura 24: Latência LTE-U vs Wi-Fi - 160 usuários.

4.4.3 Terceira Simulação - Coexistência LAA x Wi-Fi

Esta seção mostra o desempenho do padrão de coexistência LAA, que faz uso do LBT como mecanismo de acesso ao meio, nas diferentes densidades de rede já testadas anteriormente e variando o parâmetro de controle DRS entre os três possíveis valores: 40, 80 (padrão) e 160 ms. São apresentados nas figuras a seguir os resultados relativos à coexistência do LAA com o Wi-Fi assim como os resultados das seções anteriores (Wi-Fi vs Wi-Fi e LTE-U vs Wi-Fi) para efeito de comparação.

Conforme ilustrado na Figura 25, com 8 usuários no ambiente e DRS configurado em 40 ms obtivemos na rede LAA vazão média de 110,70 Mbps contra 106,50 Mbps do Wi-Fi e latência de 20,30 ms para LAA e 19,30 para Wi-Fi. A vazão do LTE-U havia sido aferida em 127,90 Mbps, ou seja, 16% acima que o LAA, e latência um pouco menor, 18,90 contra 20,30 ms do LAA. No entanto o impacto do LAA na rede Wi-Fi foi consideravelmente menor, 106,50 Mbps de vazão média e 19,30 ms de latência dos usuários Wi-Fi coexistindo com LAA, contra uma vazão de 66,60 Mbps e latência de 32,90 ms quando coexistindo com o LTE-U.

Alterando o parâmetro DRS para 80 ms, observamos os ganhos resultantes de uma menor ocupação do canal com tráfego de controle, algo em torno de 3% para o LAA e 6% para a rede Wi-Fi. O desempenho é ainda melhor com o parâmetro configurado para 160 ms de intervalo, se aproximando bastante do desempenho obtido no cenário *baseline* (Wi-Fi com Wi-Fi); corroborando a teoria de que o LAA se configura como um vizinho cujo compartilhamento da faixa de frequência de 5 GHz é similar ao compartilhamento quando o outro vizinho é uma outra rede Wi-Fi.

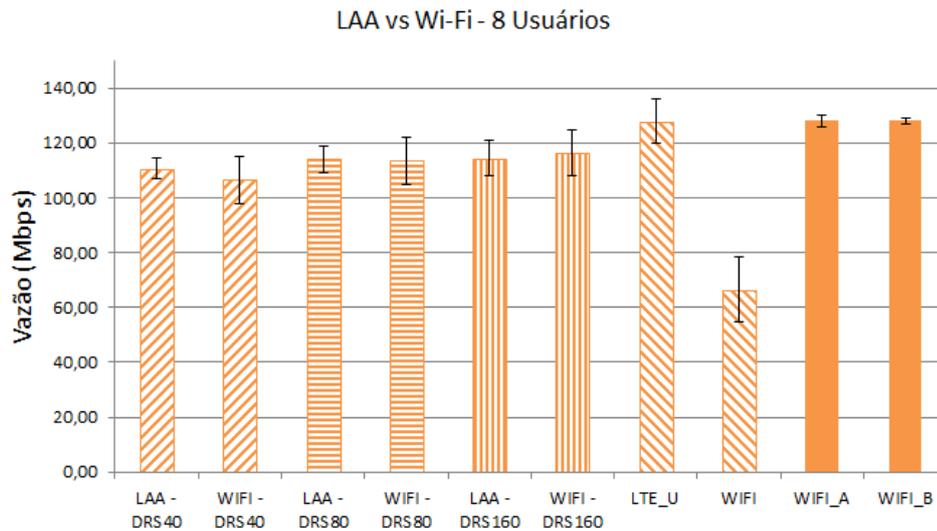


Figura 25: Vazão LAA vs Wi-Fi - 8 usuários.

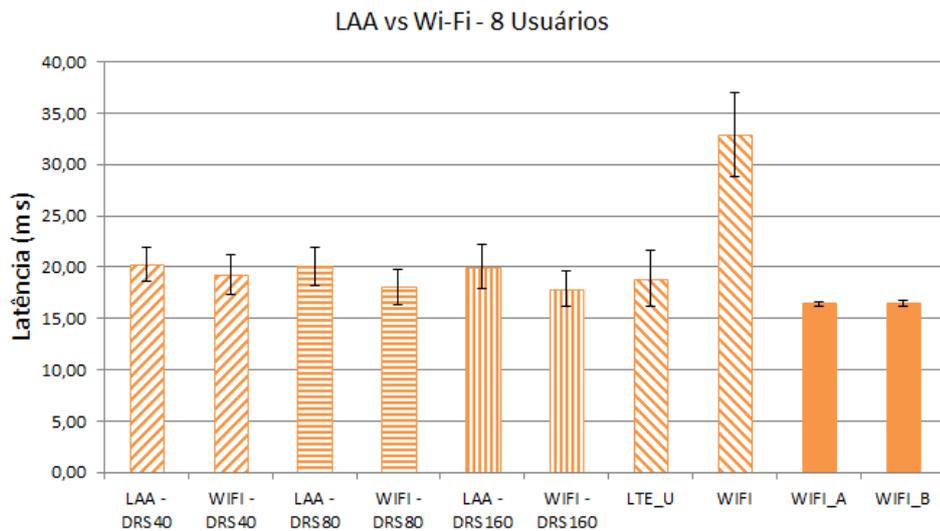


Figura 26: Latência LAA vs Wi-Fi - 8 usuários.

As Figuras 27 e 28 mostram os resultados para o cenário com 40 usuários e com a variação dos intervalos do DRS. Com maior incidência dos pacotes DRS (intervalo de 40 ms), o LAA apresentou vazão média de 91 Mbps, aproximadamente 15% menor que os 105 Mbps do LTE-U, e uma latência de 34,40 ms, maior que os 27,20 ms do LTE-U. Mesmo com esta diferença, considera-se um bom desempenho para o padrão de coexistência, principalmente pelo fato de que a rede Wi-Fi obteve praticamente o mesmo resultado do que com a rede com 8 usuários tanto com relação à vazão, quanto com relação à latência média aferida.

Ao diminuir o tráfego de controle, com DRS configurado para 80 e 160 ms, veri-

ficamos ganhos do LAA, principalmente com o último valor, quando a vazão sai dos 91 Mbps para 97,20 Mbps e latência varia dos 34,40 ms para 27,20 ms. Essa latência ainda está acima da latência aferida no padrão LTE-U, porém há menor impacto na rede Wi-Fi vizinha, que chega a entregar mais dados que o LTE-U, 120,90 Mbps contra 105 Mbps, e ter uma latência média 79% menor (17 ms) do que a rede Wi-Fi junto do LTE-U (30,40 ms).

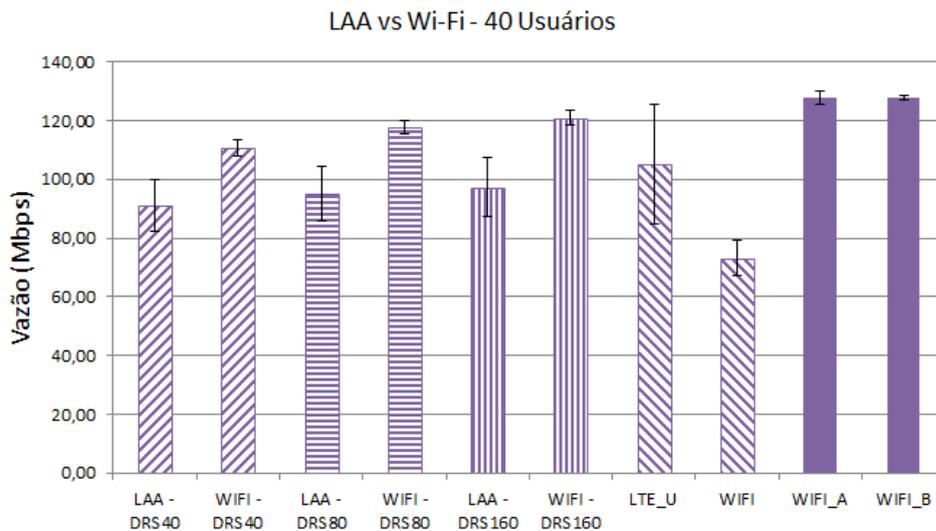


Figura 27: Vazão LAA vs Wi-Fi - 40 usuários.

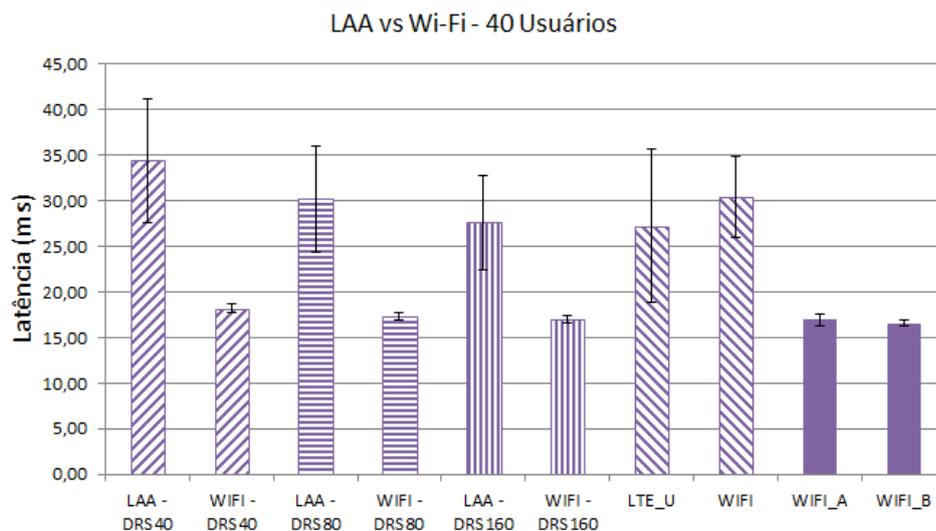


Figura 28: Latência LAA vs Wi-Fi - 40 usuários.

Prosseguindo nos resultados, apresentamos nas Figuras 29 e 30 os desempenhos com a densidade de 80 usuários no total. Neste cenário com DRS em 40 ms, o desempenho da vazão do LAA se aproxima do LTE-U, 87,90 Mbps para o LAA e 89,70 Mbps para

LTE-U, porém com intervalos maiores deste parâmetro de controle (80 e 160 ms) a vazão média do LAA superou a do LTE-U, alcançando 95,20 Mbps (80 ms) e 97,50 Mbps (160 ms). Essa diferença de pouco mais de 8% pode parecer não muito significativa, mas se torna muito importante quando comparamos com os impactos na rede Wi-Fi vizinha que usa a mesma faixa compartilhada de frequência. Com o vizinho LAA e seu método LBT, a rede Wi-Fi obtém vazão média de 107,10 Mbps e latência 20,40 ms, com o DRS configurado em 160 ms, que se mostrou o melhor valor em nossos testes. Em resumo, com uma densidade alta da rede, na faixa de 80 usuários, o LAA se mostra melhor vizinho a uma rede Wi-Fi em um ambiente de compartilhamento da frequência de 5 GHz do que o LTE-U, entregando maior vazão e com impacto à rede nativa Wi-Fi aproximadamente 60% menor que o LTE-U impõe com seu mecanismo *duty cycle*.

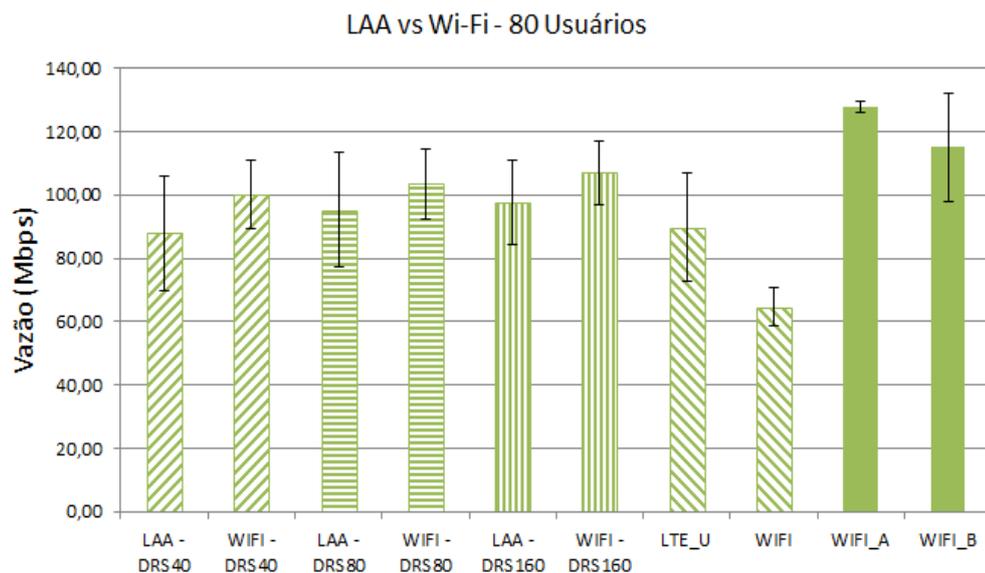


Figura 29: Vazão LAA vs Wi-Fi - 80 usuários.

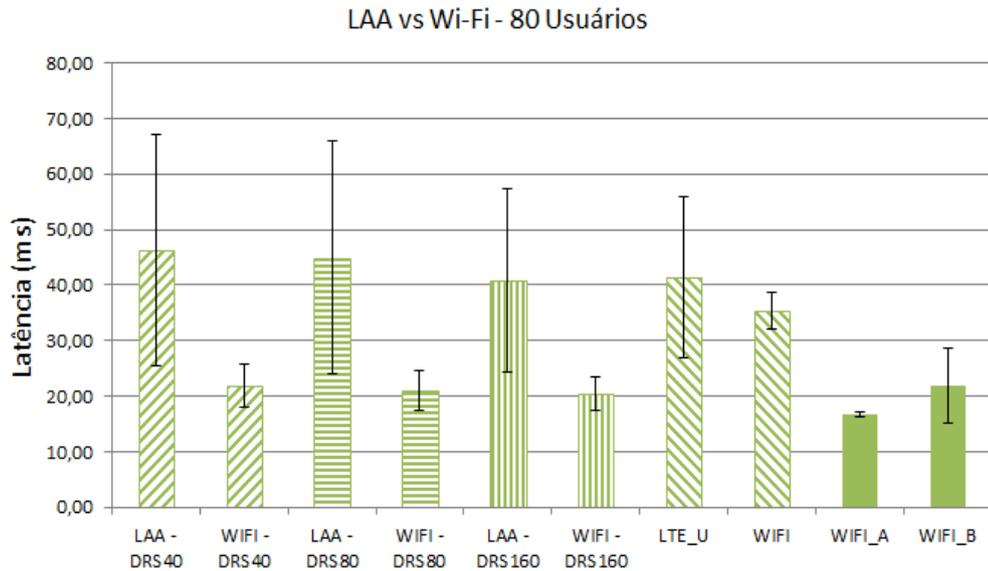


Figura 30: Latência LAA vs Wi-Fi - 80 usuários.

Finalmente, em nossos últimos testes realizados, optamos por distribuir na topografia 160 usuários, uma densidade que pode ser considerada super alta, diante da topologia dos testes que resultou em uma média de 20 nós por AP/Estação Rádio Base. Os resultados se encontram nas Figuras 31 e 32. Neste cenário tivemos uma mudança significativa no desempenho do padrão LAA, com grande redução da vazão média e aumento considerável da latência. Considerando o intervalo do DRS em 160 ms, o LAA entregou apenas 40,70 Mbps de vazão média, quase 46% a menos que os 89,20 Mbps do LTE-U, com latência de 95,30 ms, aproximadamente 138% a mais que o LTE-U, que apresentou 40 ms de latência média. Possivelmente o aumento do tráfego de dados e de controle, mesmo com o intervalo do DRS no valor máximo de 160 ms, foi o responsável pela ocupação do canal e pelo impacto significativo no desempenho do LAA em comparação principalmente com os demais cenários com menos usuários.

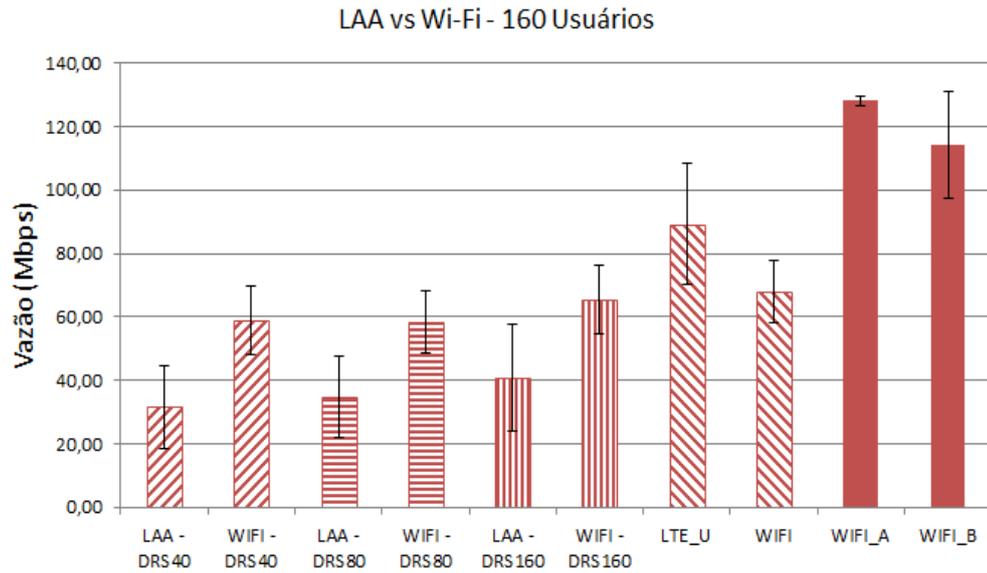


Figura 31: Vazão LAA vs Wi-Fi - 160 usuários.

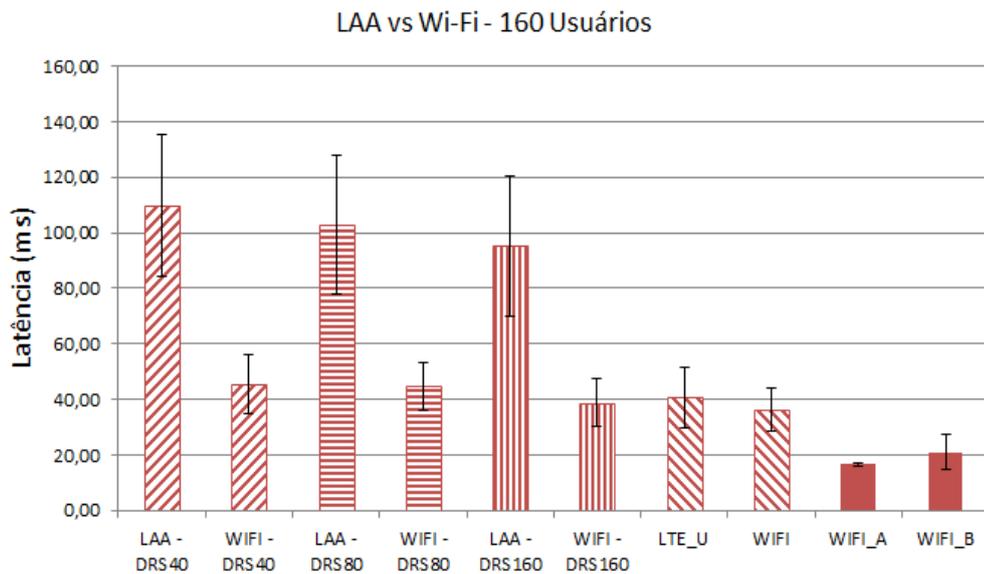


Figura 32: Latência LAA vs Wi-Fi - 160 usuários.

Em densidades de redes variando entre 8 e 80 usuários podemos perceber que o LAA entrega desempenho um pouco menor que o LTE-U quando coexistindo com outra rede Wi-Fi, em alguns casos praticamente igual. Contudo, o grande destaque é o menor impacto aos usuários do Wi-Fi, que quando compartilhando a frequência com o LAA obtêm desempenhos em termos de vazão até 72% superior do que quando coexistindo com o LTE-U. O resultado é reflexo da utilização do mecanismo de LBT para acesso ao meio, que permite a coexistência justa entre as redes, reduzindo colisões e permitindo

ao LAA enviar tráfego pela faixa não licenciada com impactos aos usuários nativos da frequência pública muito próximos do que quando outro vizinho também usa a tecnologia Wi-Fi.

Com relação à variação do parâmetro de controle DRS, cujo valor padrão é de 80 ms, podemos perceber que o aumento desse tipo de tráfego na rede, ou seja, diminuindo o intervalo em que eles são enviados para 40 ms, não se obtém ganhos de desempenho, apenas maior ocupação do canal e conseqüente maior atraso nas entregas de pacotes. No entanto, diminuindo o intervalo para 160 ms, obtém-se melhor desempenho de vazão e latências menores, tanto no LAA quanto para o vizinho Wi-Fi.

CONCLUSÃO

Inicialmente foram realizados testes que serviram de *baseline* nos quais duas redes Wi-Fi compartilhavam a mesma faixa, o que é o cenário comum. Os dados observados serviram apenas de parâmetro para fins de comparação quando uma das redes é trocada por uma rede LTE (LAA ou LTE-U). Com relação à coexistência dos dispositivos de redes licenciadas e não licenciadas, verificamos que os padrões LAA e LTE-U, apesar dos diferentes mecanismos de acesso ao meio, permitem a coexistência, com destaques para o significativo impacto que o LTE-U ocasiona nos dispositivos Wi-Fi, mesmo em cenário com poucos usuários. Esse impacto acontece em virtude do mecanismo de acesso baseado em *duty cycle* que ocupa o canal de forma imediata durante os períodos ON. Com relação ao LAA, o seu baixo desempenho quando em redes extremamente densas se deve principalmente ao grande aumento do tráfego de dados e de controle gerado pelo mecanismo de acesso LBT, que distribui na rede diversos sinais visando evitar colisões com os usuários da rede nativa.

Considerando o cenário no Brasil, em que a Anatel decidiu que o compartilhamento das faixas públicas de frequência deve ser realizado mediante dispositivos de rádio que utilizem métodos de acesso ao meio com LBT, verifica-se que na maioria dos cenários o desempenho mediante compartilhamento da frequência de 5 GHz deverá ser satisfatório, exceto quando tivermos uma super alta densidade da rede. Neste caso, a vazão cai drasticamente tanto na rede LAA/LTE quanto para os usuários nativos da rede Wi-Fi. O LAA é um padrão relativamente novo e que ainda pode ser explorado e melhorado visando maior desempenho; porém sem dúvidas está pronto para uso e oferece excelente condição para acesso adequado e justo às faixas públicas de frequência do espectro.

Em trabalhos posteriores, considera-se importante realizar simulações com a inclusão de uma dinâmica que permita, por exemplo, a alternância entre os padrões de acesso à faixa pública de frequência (LAA e LTE-U), onde de acordo com informações coletadas da rede, se defina o melhor mecanismo de acesso ao meio, com LBT ou sem LBT. Adicionalmente, sugere-se também avaliar a alternância do parâmetro de detecção de energia, que pode variar entre os limiares de -62 a -82 dBm. Outro estudo sugerido é incluir o padrão MulteFire no comparativo, tendo em vista as similaridades técnicas e de objetivos.

REFERÊNCIAS

- [1] Lima, H. V.; Bueno, E. F.; Cardoso, K. V. “Alocação de recursos em redes LTE utilizando bandas não-licenciadas”. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2018, Campos do Jordão. v. 36 (2018).
- [2] Cisco Annual Internet Report (2018–2023). <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
- [3] <https://www.5gradar.com/features/5g-speed>
- [4] Sousa, M. P.; Lopes, R. F. ; Lopes, W. T. A. ; Alencar, M. S. “Redes Cognitivas: um novo paradigma para as comunicações sem fio”. In: Sociedade Brasileira de Computação. (Org.). Livro de Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2010). Porto Alegre - RS, v. 1, p. 153-197.
- [5] Akyildiz, I. F.; Lee, W. Y.; Vuran, M. C; Mohanty, S. “A survey on spectrum management in cognitive radio networks”. IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 4, pp. 40–48, 2008.
- [6] Rocha, U.; Olimpio, T.; Sobral, A. A. L.; Araujo, C. A.; Sousa, M. P.; Rocha, J. S. “Simulação com redes de rádios cognitivos”. In: VI Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia (Encom 2016), 2016, Fortaleza - CE.
- [7] Chuyen Khoa Huynh, Deok Won Yun, Joo Pyoung Choi, Won Cheol Lee (2018). "Performance analysis for coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi systems in the spatial, time, spectrum domain." School of Electronic Engineering, Soongsil University Sangdo 5-dong, Dongjak-gu, Seoul, Republic of Korea;
- [8] MulteFire: LTE-like performance with Wi-Fi-like deployment simplicity. [Online] Disponível: <https://www.qualcomm.com/invention/5g/spectrum-sharing/multefire/>
- [9] H. -J. Kwon et al. "Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum in LTE Release

- 13.", IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 2, pp. 201-207, Fevereiro 2017, doi: 10.1109/MCOM.2016.1500698CM.
- [10] R. W. Thomas, L. A. DaSilva, e A. B. Mackenzie. "Cognitive networks." In Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, MD, EUA, Novembro 2005.
- [11] I. Akyildiz, W. Lee, M. Vuran, e S. Mohanty. "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey.", Computer Networks, (50):pp.2127–2159, 2006.
- [12] Timalina, S.K., Moh, S., Chung, I. et al. A concurrent access MAC protocol for cognitive radio ad hoc networks without common control channel. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2013, 69 (2013).
- [13] Santana, P. M. ; Sousa Junior, V. A. "Desempenho da coexistência LTE-LBT/Wi-Fi", Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2016, Santarém.
- [14] 3GPP TR 36.889 V13.0.0 (2015-06) - 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum; (Release 13).
- [15] Bojović, B.; Giupponi, L.; Ali, Z.; Miozzo, M. "Evaluating unlicensed LTE technologies: LAA vs LTE-U". In IEEE Access, vol. 7, pp. 89714-89751, 2019.
- [16] S. Zinno, G. Di Stasi, S. Avallone, G. Ventre. "On a fair coexistence of LTE and Wi-Fi in the unlicensed spectrum: a Survey." Computer Communications, volume 115, 2018, Páginas 35-50. ISSN 0140-3664. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.10.019>.
- [17] Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s), Report ITU-R M.2134 (2008).
- [18] Shin et al.. "Advanced technologies for LTE advanced." EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2013 2013:25.
- [19] Daniel Amorim Koga, Daniel Andrade Nunes. Voice Over LTE: Guia básico de implantação. V SRST – Seminário de Redes e Sistemas de Telecomunicações. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. Setembro de 2016.

- [20] Tran et al.. "Overview of enabling technologies for 3GPP LTE-advanced." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2012 2012:54.
- [21] H. Lee, S. Vahid and K. Moessner. "A survey of radio resource management for spectrum aggregation in LTE-Advanced.", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 745-760, Second Quarter 2014.
- [22] <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>.
- [23] Signals Research Group. The prospect of LTE and Wi-Fi sharing unlicensed spectrum. White Paper: Fevereiro 2015.
- [24] P. Kutsevol, V. Loginov, E. Khorov e A. Lyakhov. "Analytical study of license-assisted access in 5G networks.", 2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking), Warsaw, Poland, 2019, pp. 1-9.
- [25] J. Zhang, M. Wang, M. Hua, T. Xia, W. Yang, e X. You, "LTE on license-exempt spectrum.", *IEEE Communications Surveys e Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 647–673, 2017.
- [26] H. -J. Kwon et al., "Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum in LTE Release 13.", *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 201-207, Fevereiro 2017, doi: 10.1109/MCOM.2016.1500698CM.
- [27] SEI/ANATEL – 3349698 – Análise (Processo nº 53500.035604/2018-30).
- [28] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/14.02.00_60/ts_136213v140200p.pdf.
- [29] H. Koorapaty, "RP-151866: Work item on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum (TSG RAN meeting 70)," 3GPP, Tech. Rep., 2015.
- [30] https://www.mfa-tech.org/wp-content/uploads/MulteFire-Release-1.0-whitepaper_FINAL.pdf.
- [31] Abdel-Rahman, Mohammad J., Abdelraheem, Mohamed, Mackenzie, Allen, Cardoso, Kleber, Krunz, Marwan. On the orchestration of robust virtual LTE-U networks from hybrid half/full-duplex Wi-Fi APs. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Doha., 2016. p. 1.

- [32] B. Chen, J. Chen, Y. Gao and J. Zhang, Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz With Corresponding Deployment Scenarios: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 7-32, Firstquarter 2017.
- [33] Lima, L. D.; Rubinstein, G. M.; “Coexistência Wi-Fi x LTE: uma análise comparativa de desempenho entre o LAA e o LTE-U”. Em: XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBRT), 2021, Brasil. (2021)
- [34] <http://bitbucket.org/cttc-lena/ns-3-lena-dev-lte-u>
- [35] N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena-Esteso, and J. Nin-Guerrero, "An open source product-oriented LTE network simulator based on ns-3,"in Proc. 14th ACM Int. Conf. Modeling Anal. Simulatoin Wireless Mobile Syst. (MSWiM), Miami, FL, USA, Oct. 2011, pp. 293–298.
- [36] https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.889/36889-011.zip