

# Análise da aplicabilidade do ns-3 na Avaliação de cenários de Coexistência do 5G NR-U com o Wi-Fi

Dario G. de Macedo, Daniel R. de Luna, Ricardo Q. de F. H. Silva, Tarciana C. de B. Guerra e Vicente A. de Sousa Jr.

**Resumo**—Tecnologias que fazem uso de frequências não licenciadas são amplamente utilizadas mundialmente e o grande sucesso comercial do Wi-Fi foi um incentivo para que os padrões de comunicação móvel, como o 5G NR, sejam adaptados para explorar estas faixas de frequência. Adaptações anteriores utilizando o 4G LTE já foram padronizadas e exploradas, e com o 5G não licenciado (NR-U) recentemente implementado, o propósito deste artigo é investigar seu desempenho quando coexiste com o Wi-Fi. Este estudo utiliza o módulo do NR-U para o simulador de eventos discretos *Network Simulator Version 3 (ns-3)*. Vários testes foram realizados com o intuito de verificar a viabilidade do módulo do ns-3 para simular um cenário de coexistência NR-U/Wi-Fi definido pelo 3GPP. Este artigo contribui com a apresentação e o teste de funcionalidades do módulo de coexistência do ns-3 e a discussão sobre a curva de aprendizado bem como a flexibilidade de usar o módulo para análise de valor agregado de soluções de coexistência envolvendo o NR-U.

**Palavras-Chave**—5G, NR-U, Espectro não licenciado, ns-3, Wi-Fi.

## I. INTRODUÇÃO

A faixa de frequência denominada não licenciada existe com a intenção de liberar uma faixa para que equipamentos possam se comunicar livremente sem se preocupar com pagamentos de licenças para uso exclusivo, se preocupando somente com o compartilhamento do meio de forma democrática. Essa faixa não é novidade, pois diversas tecnologias muito conhecidas, como o Wi-Fi e Bluetooth, e outras não comumente conhecidas, porém igualmente importantes, como as que operam na frequência definida por *Industrial, Científica e Médica (ISM)*, têm tido uma importância e uso crescente na sociedade. Por ser uma faixa de frequência sem custo e bem aceita no mercado de telecomunicações, é interessante que também seja explorada em tecnologias de comunicação móvel. É com essa visão que o 3GPP padronizou o uso do acesso às frequências não licenciadas baseada em 5G *New-Radio (NR)*, chamado *NR-Unlicensed (NR-U)*.

Sabendo que o NR, em sua forma padrão, é uma tecnologia que não utiliza mecanismos de compartilhamento de espectro, modificações em sua versão base devem ser feitas para garantir a coexistência justa com outros sistemas próximos. Algumas modificações discutidas neste artigo são: implementar limitação de ocupação de canal (chamado de *Duty Cycle*), adaptar técnicas de gerenciamento de acesso ao canal e,

Todos os autores são da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), E-mails: dario.macedo.129@ufrn.edu.br, daniel.luna.088, ricardo.queiroz.105@ufrn.edu.br, tarciana.guerra.051@ufrn.edu.br, vicente.sousa@ufrn.br. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. As simulações fornecidas por esse trabalho foram realizadas com o apoio do Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

principalmente, adotar mecanismos de múltiplo acesso baseado em contenção, como o *Listen Before Talking (LBT)*.

A padronização do sistema 5G NR pelo 3GPP foi disponibilizada com o *Release 15* em 2018, com três características básicas: *enhanced mobile broadband (eMBB)*, *massive machine-type communications (mMTCs)* e *ultra-reliable low-latency communications (URLLCs)* [1]. Com o *Release 16*, o 3GPP teve a intenção de expandir as características do 5G NR para outros usos além da comunicação celular em banda larga. Foi a partir daí que o NR-U para frequências abaixo de 7 GHz foi padronizado.

Outros padrões de redes móveis em frequências não licenciadas foram padronizados. Algumas tecnologias que se basearam no 4G LTE para operar na banda ISM de 5 GHz [2] são descritas a seguir:

- *LTE Licenced Assisted Access (LAA)*: padronizado pelo 3GPP nos *Releases 13, 14 e 15* do LTE. O gerenciador de acesso ao canal, ou mecanismo de coexistência, utiliza o *Listen Before Talking (LBT)*, tornando esse tecnologia similar ao mecanismo de acesso CSMA/CA do Wi-Fi, que também usa LBT;
- *LTE Unlicensed (LTE-U)*: desenvolvido pelo fórum LTE-U e disponível no LTE *Release 12*. Utiliza o mecanismo de ciclo de trabalho, ou *Duty Cycle (DC)*, desligando periodicamente o LTE como mecanismo de coexistência com outros sistemas.
- *MulteFire*: sistema comercial especificado pela *MulteFire Alliance* (<https://www.mfa-tech.org/>) com sua versão 1.0 baseada no LTE-LAA *Release 13* para *downlink* e no LTE-LAA *Release 14* para o *uplink*. Diferente do LTE-U e do LTE-LAA, o *MulteFire* não precisa de um sistema LTE licenciado com âncora, pois opera em modo *stand-alone*. Recentemente, em sua versão 1.1, o *MulteFire* inclui versões para operação do LTE-LAA em 1,9 GHz, bem como do NB-IoT-U em 800/900 MHz e do mMTC-U em and 2.4 GHz [3].

Este artigo é dedicado a mostrar testes de usabilidade do módulo do ns-3 para estudos de coexistência NR-U/Wi-Fi. Por envolver aspectos de rede, do sistema de comunicação e a modelagem de toda sua pilha de protocolos, a curva de aprendizado do ns-3 pode ser longa. Para facilitar o uso e devido a complexidade dos sistemas de comunicações contemporâneos, o desenvolvimento do ns-3 é feito em módulos dedicados a cada sistema. Existem também módulos que promovem a integração dos diferentes sistemas, permitindo o estudo de interferência e a concepção de mecanismos de coexistência. Assim, o sucesso em vencer a curva de aprendizado e realizar trabalhos investigativos significativos usando o ns-3 dependem da maturidade do módulo escolhido.

Testar e discutir a maturidade do módulo de coexistência NR-U/Wi-Fi é o principal foco desse artigo.

O alvo são dois módulos criados pelo grupo *Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya* (CTTC): (i) o 5G-LENA, que possibilita a utilização de enlaces 5G *New Radio* no código base do ns-3 (que já possui o Wi-Fi) [4]; e (ii) o módulo do NR-U, que possibilita o 5G NR a ser utilizado para simular conexões em bandas não licenciadas [5]. No momento da escrita deste artigo, o módulo de NR-U está em uma versão de desenvolvimento inicial, portanto, além de trazer uma análise de desempenho da coexistência NR-U/Wi-Fi, este trabalho traz como contribuição a apresentação do estado do módulo em desenvolvimento e os problemas encontrados durante o seu uso.

O artigo está dividido como a seguir: na Seção II são enumerados alguns artigos relacionados a coexistência entre sistemas 3GPP e Wi-Fi; a Seção III discute o módulo de coexistência NR-U/Wi-Fi, explicando os modos de gerenciamento de acesso e apresentando um histórico de desenvolvimento do módulo; a Seção IV apresenta o cenário que foi utilizado para os testes realizados neste artigo; a Seção V traz os resultados obtidos e finalmente, a Seção VI apresenta as principais conclusões do trabalho.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Vários trabalhos abordam coexistência LTE/Wi-Fi em banda 5 GHz não licenciada [2], [6]–[10]. Existe unanimidade em afirmar que o LTE-LBT é melhor vizinho para o Wi-Fi do que ele mesmo, e que o LTE-DC depende de um ciclo de trabalho flexível e adaptável para uma coexistência eficiente. Mais recentemente, muitos trabalhos exploram a coexistência entre sistemas NR-U e dele com versões recentes do Wi-Fi [11]–[14]. Contudo, a maioria dos trabalhos simplificam a modelagem do sistema em prol da complexidade da simulação.

Na direção oposta, os autores de [15] introduzem o módulo do 5G NR-U utilizando como base o 5G-LENA, oferecendo maior acurácia na modelagem do sistema ao preço de maior complexidade computacional. Assim, é possível realizar a análise de coexistência com o NR-U de forma mais precisa e incluindo aspectos como: transmissão de portadoras mmWave, largura de banda extensa e coexistência com sistemas Wi-Fi em 60 GHz (802.11ad) e em 5 GHz (802.11ax). Essa opção de simulação sistêmica possibilita testes em cenários mais complexos com múltiplos usuários e pontos de acesso, suportando a variação de parâmetros como: tipo de acesso ao canal, numerologia do NR, largura de banda, tipo de *beamforming*, modelos de tráfego e de canal recomendados pelo 3GPP para o 5G, entre outros.

Contudo, o artigo [15], que foi publicado em abril de 2020, introduz o módulo de coexistência NR-U/Wi-Fi, e logo em seguida, em agosto de 2020, foi publicada a versão 0.1 do módulo do NR-U (ver [https://gitlab.com/cttc-lena/nr-u/-/blob/master/RELEASE\\_NOTES.md](https://gitlab.com/cttc-lena/nr-u/-/blob/master/RELEASE_NOTES.md)). Essa versão utiliza o Release 0.4 do módulo NR e uma versão não especificada do ns-3, bem como uma versão do Wi-Gig indisponível ao público. Essa primeira versão do NR-U foi publicada sem um exemplo funcional.

Este trabalho é baseado na versão 0.2 do módulo de coexistência NR-U/Wi-Fi do ns-3 [5], que será alvo da próxima seção.

## III. GERENCIADORES DE ACESSO NO NR-U E O MÓDULO NR-U NO NS-3

Esta seção é separada em três partes: as Seções III-A e III-B apresentam os gerenciadores de acesso padronizados para o NR-U e implementados no módulo NR-U do ns-3 desde sua primeira versão. A Seção III-C apresenta brevemente a versão 0.2 de tal módulo, o exemplo de simulação disponível e suas métricas de saída.

### A. NR-U Listen Before Talking (LBT)

O 5G NR, por ser uma tecnologia que utiliza frequência licenciada e múltiplo acesso sem contenção, não faz reuso de espectro para mais de um usuário na mesma estação base ao mesmo tempo. Portanto, o mecanismo LBT pode ser implementado para garantir o compartilhamento de espectro em banda não licenciadas.

Com o LBT, qualquer nó da rede, seja o equipamento do usuário ou a estação base, deve sensorar o canal e utilizar o protocolo de Verificação Estendida de Canal Livre (*Extended Clear Channel Assessment*) ou eCCA para definir se existe transmissão no canal antes de o utilizar. Primeiro, ocorre um período fixo de espera para verificar se o canal está livre e uma quantidade de *slots* de *back-off* é escolhida dentro da Janela de Contenção (*Contention Window*), cada um com duração de 9  $\mu$ s. Após o fim do tempo de espera, caso seja determinado que o canal está livre, o contador de *back-off* é diminuído em um, o eCCA é utilizado até que o *back-off* se torne zero, após isso, o canal pode ser ocupado [9].

O método mais simples de sensoriamento é utilizando a detecção de energia, que verifica o canal por qualquer tipo de potência sendo transmitida, atrasando a transmissão caso ultrapasse um limiar especificado. Outro método é de detecção de pré-âmbulo. O nó que utiliza o canal deve enviar um pré-âmbulo que anuncia algumas informações úteis, como o tipo de transmissão e o tempo que irá durar a transmissão, permitindo que os outros nós possam programar suas próximas transmissões e economizarem energia ao se desligarem enquanto o canal não estiver livre. Mesmo com essas vantagens, o pré-âmbulo necessita ser compatível com os outros equipamentos no ambiente para ser recebido. O Wi-Fi utiliza uma combinação de detecção de pré-âmbulo para sinais Wi-Fi acima de -82 dBm e detecção de energia para todas as transmissões acima de -62 dBm [16]. O 3GPP preferiu não padronizar essa técnica no NR-U, utilizando apenas uma detecção de energia em -72 dBm para quaisquer transmissão observada. Um exemplo gráfico de como o LBT ocorre está na Fig.1.

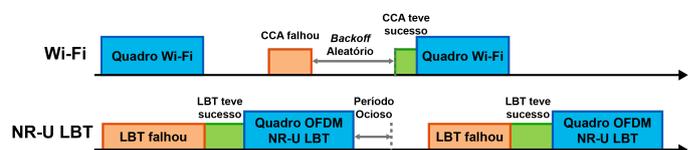


Fig. 1: Funcionamento do LBT do NR-U.

O LBT no NR-U é classificado em 4 categorias que separam o intervalo de tempo de cada transmissão [16]:

- Categoria 1 (Cat 1): não ocorre LBT e a transmissão é imediata após  $16 \mu\text{s}$  do fim da transmissão anterior;
- Categoria 2 (Cat 2): ocorre um período de CCA (verificação de LBT) de  $25 \mu\text{s}$  fixo;
- Categoria 3 (Cat 3): ocorre um período de contenção (*back-off*) variável escolhido aleatoriamente dentro da Janela de Contenção de  $15 \text{ slots}$ ;
- Categoria 4 (Cat 4): ocorre um período de contenção variável escolhido aleatoriamente dentro da Janela de Contenção, que varia de acordo com a qualidade do canal, mínimo de 15 e um máximo de  $1023 \text{ slots}$ .

### B. NR-U Duty Cycle (DC)

Apesar do NR-U utilizar o *LBT* por padrão, o *NR-U DC* também é uma opção disponível no ns-3. O DC implementa um período de *Ciclos de Trabalho (Duty Cycle)*, simplesmente ligando e desligando a transmissão do NR-U. Por padrão, o DC é 50%, alternando entre períodos de 9 ms ligado (ON) e 9 ms desligado (OFF). Enquanto estiver ligado, o NR-U deve utilizar o canal pelo período de tempo especificado, sem nenhuma verificação CCA, como ocorre no LBT; e quando desligado, o NR-U deve permitir a utilização das outras tecnologias. A Fig. 2 ilustra como o DC ocorre.

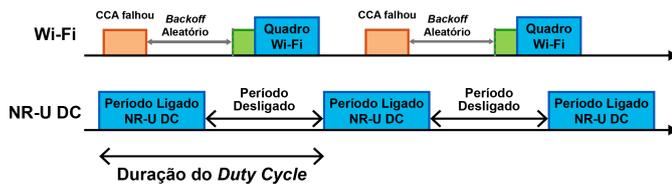


Fig. 2: Funcionamento do DC do NR-U.

### C. Módulo de coexistência NR-U/Wi-Fi - Versão 0.2

Em maio de 2021 foi publicada a versão 0.2 do módulo NR-U, utilizando o módulo NR em sua versão 1.1 e o ns-3.35. Esta é a versão mais recente e a que foi utilizada neste artigo. O módulo traz um exemplo chamado *NR-U-WiFi-Interference*, que apresenta um cenário básico de coexistência com vários parâmetros configuráveis. Com foco na modelagem da interferência entre NR-U e Wi-Fi, o exemplo também pode ser configurado para testar os gerenciadores de acesso LBT, DC e Always ON, que permite o acesso irrestrito ao canal para o NR-U.

Depois de executado, o exemplo *NR-U-WiFi-Interference* gera como saída um arquivo do tipo *banco de dados (.db)*, que coleciona vários indicadores de desempenho coletados durante a simulação, entre eles:

- *Tempo de ocupação (occupation Time)*: porcentagem de tempo que cada sistema utiliza o canal para transmitir;
- *Taxa de útil na recepção (throughput)*: taxa de recepção média de cada usuário em bps;
- *Bytes de transmissão (Transmission Bytes)*: bytes transmitidos em *downlink* para cada usuário;
- *Bytes de recepção (Reception Bytes)*: bytes recebidos com sucesso pelo usuário;

- *Latência (Latency)*: tempo entre a transmissão e a recepção de um pacote;
- *Variação (Jitter)*: variação da latência;
- *Relação Sinal e Ruído mais Interferência (SINR)*: a razão entre a potência do sinal recebido e a soma do ruído com a interferência co-canal.

## IV. CENÁRIOS DE TESTE

A coexistência NR-U/Wi-Fi é investigada no primeiro cenário de coexistência definido pelo 3GPP em [17]. O cenário é composto de duas redes de acesso de rádio (RANs), um *Access Point (AP) Wi-Fi* e outro 5G NR (*gNB*). A *gNB* atende um *User Equipment (UE)* em NR-U e o AP Wi-Fi uma *Station (STA)*. Sem perda de generalidade, *gNB* será chamada de AP e UE será chamado de STA a partir desse momento. A distância entre STA e AP é  $d_1$ , enquanto  $d_2$  é a distância entre as duas RANs que compartilham o meio de comunicação, como mostra a Fig. 3.

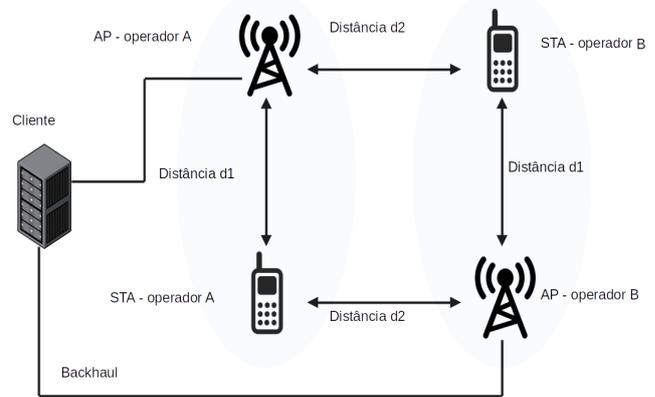


Fig. 3: Cenário de simulação definido pelo 3GPP [17].

Os dois APs podem ser configurados tanto para a tecnologia NR-U quanto Wi-Fi, e também é possível configurar as distâncias  $d_1$  (distância STA-AP) e  $d_2$  (distância AP-AP). Neste trabalho, a distância  $d_1$  foi modificada entre 10 e 50 m com a intenção de investigar a cobertura dos APs, enquanto a distância  $d_2$  foi modificada entre 10 e 10000 m para investigar a interferência entre APs. Com intenção de gerar um situação de alta carga, a taxa oferecida do AP para o STA é 100 Mbps. Outros parâmetros do sistema são demonstrados na Tabela I.

A investigação foi feita em duas situações: (i) Coexistência da mesma RAN: com os dois APs utilizando a mesma tecnologia de acesso (ou seja, Wi-Fi com Wi-Fi, NR-U LBT com NR-U LBT); e (ii) Coexistência de RAN diferentes: um AP Wi-Fi e outro AP NR-U. Como mencionado anteriormente, o alvo dos testes de desempenho realizados neste artigo são baseados no exemplo do módulo NR-U, *NR-U-WiFi-Interference*. O desempenho da coexistência é analisado por meio do *throughput* médio por usuário, um valor de saída obtido ao final de cada simulação.

## V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mencionado anteriormente, o módulo NR-U não está totalmente finalizado e diversos problemas foram encontrados

TABELA I: Parâmetros da simulação.

Parâmetros do Canal		
Parâmetro	Valor	Fonte
Número de STAs	1 Wi-Fi e 1 NR-U	[17]
gNBs	2	[17]
MIMO	2 x 2	[5]
Potência de transmissão	18 dBm	[18]
Numerologia	0	[5]
Frequência da portadora	5,2 GHz	[5]
Largura de Banda	20 MHz	[5]
Distância AP-STA ( $d_1$ )	10 m a 50 m	-
Distância entre APs ( $d_2$ )	10 m a 10000 m	-
Taxa oferecida	100 Mbps	-
Parâmetros do NR-U DC		
Tempo do ciclo de trabalho (DC)	9ms-On e 9ms-Off	[5]
Parâmetros do NR-U LBT		
Limiar de detecção de energia	-79 dBm	[5]
Parâmetros do Wi-Fi		
Padrão	IEEE 802.11ax	[5]

na maioria dos cenários. Especialmente o NR-U em *Duty Cycle* (DC) não está funcional para os parâmetros de simulações escolhidos neste trabalho.

Os resultados das duas situações de coexistência investigadas são apresentados nas Figs. 4 (coexistência de mesma RAN) e Figs. 5 (coexistência com RANs diferentes). As figuras mostram a taxa útil (*throughput*) em Mbps medido em cada AP. Nas figuras, cada par de legendas corresponde a uma linha da tabela. Assim, na Fig. 4, pares vizinhos da legenda são da mesma tecnologia de acesso, enquanto que na Fig. 5, pares vizinhos são compostos de uma das tecnologias NR-U e o Wi-Fi sempre sendo o AP B.

A discussão dos resultados leva em consideração a expectativa de desempenho e o resultado obtido na simulação, evidenciando quais estão coerentes com a expectativa e quais resultados precisam de uma investigação mais pormenorizada, inclusive a procura de possíveis problemas de código.

- RANs iguais NR-U LBT
  - **Resultado:** é observado que todas as categorias do NR-U LBT apresentam desempenho igual;
  - **Expectativa:** considerando que o Cat 2 tem CCA fixo de 25  $\mu$ s, era esperado que seu desempenho fosse diferente, pois os modos Cat 3 e o Cat 4 sorteiam aleatoriamente o período de eCCA, com o Cat 4 variando o eCCA com a qualidade do canal.
- RANs iguais NR-U *always on*
  - **Resultado:** o NR-U *Always On* tem maior taxa útil comparado ao LBT;
  - **Expectativa:** é um comportamento esperado para uma situação de baixa carga ou de baixa interferência, o que condiz com a taxa oferecida do experimento realizado. Contudo, para os casos que  $d_2$  é pequeno, a interferência é alta, e sabendo da capacidade melhor em gerenciar interferência, existe a expectativa do LBT superar o desempenho do *always on* mesmo com as perdas de espera pelo canal que o protocolo LBT implementa.
- RANs iguais Wi-Fi
  - **Resultado:** um dos nós domina a transmissão quando o  $d_1$  é maior;
  - **Expectativa:** mesmo considerando o efeito do terminal exposto, a distância de 50 m pode não justificar que um STA ou AP esteja exposto.

- RANs iguais Wi-Fi (comparação com NR-U)
  - **Resultado:** o Wi-Fi possui um valor de *throughput* muito superior comparado à qualquer instalação de NR-U apresentada, isso é ainda mais evidenciado na terceira coluna,  $d_1 = 50$  e  $d_2 = 10$ , em que o *throughput* no NR-U despenca;
  - **Expectativa:** pelas configurações da simulação, existia a expectativa que o NR-U e o Wi-Fi tivessem desempenho similares, pois utilizam a mesma largura de banda. Na verdade, especialmente no modo *always on*, se esperava superioridade do NR-U perante ao Wi-Fi.
- RANs diferentes NR-U LBT vs Wi-Fi
  - **Resultado:** ocorreu erro em todas as categorias do NR-U LBT;
  - **Expectativa:** algum problema de código impede que simulações sejam finalizadas. Os autores do artigo verificaram que esse problema foi reportado no fórum de discussões do ns-3 e que existem pesquisadores/desenvolvedores tentando descobrir e resolver o problema.
- RANs diferentes NR-U *always on* vs Wi-Fi
  - **Resultado:** a taxa útil do NR-U *always on* quando em coexistência com o Wi-Fi é similar quando comparado ao cenário de coexistência entre dois sistemas NR-U com  $d_2$  distante;
  - **Expectativa:** é esperado menor taxa útil do Wi-Fi quando em coexistência entre NR-U *always on*, que não implementa mecanismo de coexistência. O resultado de taxa útil igual a zero é o esperado, pois o NR-U *always on* transmite continuamente e sempre ativa o mecanismo de *back-off* do Wi-Fi.

Dado a estabilidade do módulo 5G-LENA do ns-3, não era esperado tantos problemas com o módulo NR-U. O problema principal encontrado nos testes exploratórios deste artigo foi uma mensagem de erro ao agendar eventos em tempo negativo, exibida assim que um pacote de informação é gerado. Este problema ocorreu em todas as simulações envolvendo o NR-U *Duty Cycle* e estão indicados por “-” na tabela da Fig. 5. É possível entender que é um problema com a chamada do gerenciador de eventos do ns-3, mas ainda não foi possível identificar sua origem.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo apresentar e testar o módulo do ns-3 que implementa a coexistência entre NR-U e Wi-Fi. A intenção é conceber soluções de coexistência similares aos desenvolvidos pelos autores para coexistência LTE-U/Wi-Fi [2], [6], [10], [19], [20]. Contudo, como os testes aqui expostos evidenciam, o módulo não está maduro o suficiente e precisa de intervenção da comunidade de desenvolvimento para resolução de problemas.

Para futuros trabalhos, pretende-se realizar um estudo do código específico sobre os gerenciadores de acesso, bem como caracterizar o desempenho de cada sistema separadamente, objetivando a procura de algum *bug* de código ou parametrização que explique os resultados obtidos até o momento. Superada essa etapa de instabilidade, o módulo será

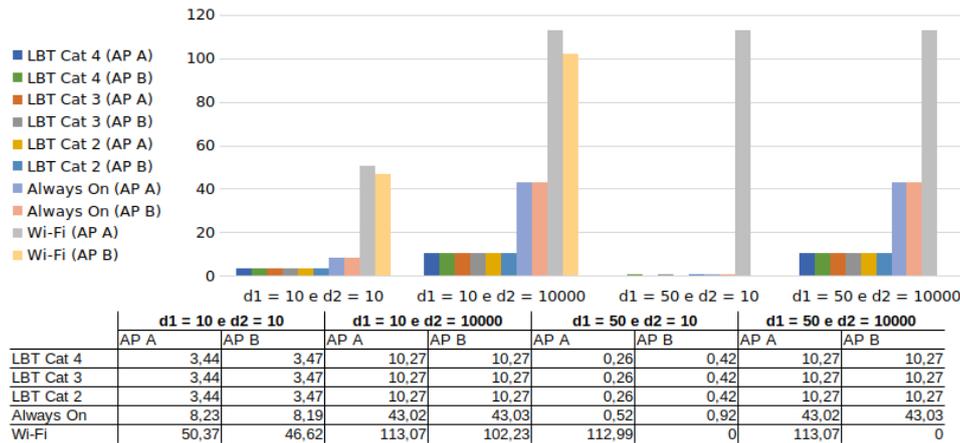


Fig. 4: Taxa útil em Mbps para RAN iguais. O AP A é sempre igual ao AP B, ambos indicados na primeira coluna.

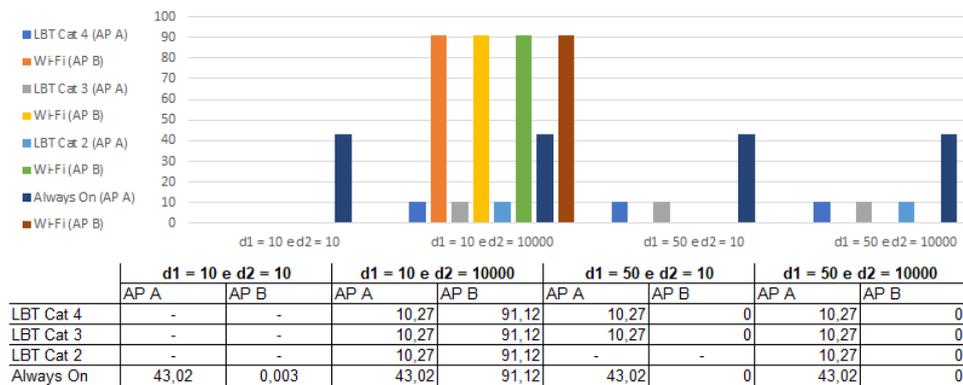


Fig. 5: Taxa útil em Mbps para RANs diferentes. O AP A é NR-U (opções de acesso indicadas na coluna mais a esquerda) e o AP B é sempre Wi-Fi.

usado para avaliar o desempenho de estratégias de coexistência usando *machine learning*.

## REFERÊNCIAS

- [1] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard *et al.*, “5g wireless network slicing for embb, urllc, and mmcc: A communication-theoretic view,” *IEEE Access*, vol. 6, p. 55765–55779, 2018.
- [2] F. M. A. Jr., V. A. de Sousa Jr. *et al.*, “LTE/Wi-Fi Coexistence in 5 GHz ISM Spectrum: Issues, Solutions and Perspectives,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 99, no. 1, pp. 403–430, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-017-5114-2>
- [3] MFA. (2023, May) MulteFire Specifications. <https://www.mfa-tech.org/technology/specifications/>.
- [4] Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya. (2023, May) 3GPP NR ns-3 module Repository. [Online]. Available: <https://gitlab.com/cttc-lena/nr>
- [5] —. (2023, May) 3GPP NR-U ns-3 module Repository. [Online]. Available: <https://gitlab.com/cttc-lena/nr-u.git>
- [6] F. M. Abinader, E. P. Almeida *et al.*, “Enabling the coexistence of LTE and Wi-Fi in unlicensed bands,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 11, pp. 54–61, 2014.
- [7] A. M. Cavalcante, E. Almeida *et al.*, “Performance Evaluation of LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Bands,” in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013, pp. 1–6.
- [8] E. Almeida, A. M. Cavalcante *et al.*, “Enabling LTE/WiFi coexistence by LTE blank subframe allocation,” in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013, pp. 5083–5088.
- [9] B. Bojovic, L. Giupponi *et al.*, “Evaluating unlicensed LTE Technologies: LAA vs LTE-U,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [10] P. M. Santana, J. M. Neto, and V. A. Sousa, “Evaluation of LTE unlicensed solutions using ns-3,” *2017 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2017.
- [11] M. Haghshenas and M. Magarini, “NR-U and Wi-Fi Coexistence Enhancement Exploiting Multiple Bandwidth Parts Assignment,” in *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, 2022, pp. 260–263.
- [12] R. Saha, “An Overview and Mechanism for the Coexistence of 5G NR-U (New Radio Unlicensed) in the Millimeter-Wave Spectrum for Indoor Small Cells,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–18, 09 2021.
- [13] F. Luo, X. Sun *et al.*, “Optimal Coexistence of NR-U with Wi-Fi under 3GPP Fairness Constraint,” in *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*, 2022, pp. 4890–4895.
- [14] K. Kosek-Szott, A. Lo Valvo *et al.*, “Downlink channel access performance of NR-U: Impact of numerology and mini-slots on coexistence with Wi-Fi in the 5 GHz band,” *Computer Networks*, vol. 195, p. 108188, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621002437>
- [15] N. Patriciello, S. Lagen *et al.*, “NR-U and IEEE 802.11 Technologies Coexistence in Unlicensed mmWave Spectrum: Models and Evaluation,” *IEEE Access*, 2020.
- [16] N. Rastegardoost, “3gpp: The unlicensed journey,” Nov 2020. [Online]. Available: <https://ofinno.com/article/3gpp-the-unlicensed-journey/>
- [17] 3GPP TR 36.889, “TR 36.889: Feasibility Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum (Release 13),” *3GPP*, 2015. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2579>
- [18] L. Al-Sahan, N. Lasla *et al.*, “Bcsm: Blockchain-based cooperative spectrum management system for 5g nr-u and wifi coexistence in the unlicensed band,” *IET Communications*, vol. 16, pp. n/a–n/a, 06 2022.
- [19] P. M. De Santana, V. D. De Lima Melo, and V. A. De Sousa, “Performance of license assisted Access Solutions using ns-3,” *2016 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2016.
- [20] J. M. de C. Neto, S. F. G. Neto *et al.*, “Multi-cell lte-u/wi-fi coexistence evaluation using a reinforcement learning framework,” *Sensors*, vol. 20, no. 7, 2020. [Online]. Available: [www.mdpi.com/1424-8220/20/7/1855](http://www.mdpi.com/1424-8220/20/7/1855)