

Desempenho da Coexistência LTE-LBT/Wi-Fi

Pedro Maia de Santana, Vinícius Dantas de Lima Melo, Vicente A. de Sousa Jr. .

Abstract—3GPP has been working on a new network infrastructure based on unlicensed spectrum known as LTE Secondary Cell (SCell) in a carrier aggregation scenario in which LTE user terminals would still be anchored to an LTE Primary Cell (PCell) over licensed spectrum. On this scenario, best-effort content would be delivered on the unlicensed band SCell, while QoS traffic and control signaling would still be a PCell responsibility. This work makes a performance analysis of 3GPP's solution, named LTE-LAA, which allows the LTE system to operate on unlicensed spectrum. It is also analysed the impact of this new technology on the performance of Wi-Fi systems in the same band.

Resumo—O 3GPP está criando uma nova infraestrutura de rede denominada *LTE Secondary Cell* (SCell). Baseada em espectro não-licenciado e em um cenário de agregação de portadora, os terminais LTE ainda estariam conectados a uma *LTE Primary Cell* (PCell) via espectro licenciado, trafegando sinalização e dados com restrições de QoS, mas o conteúdo *best-effort* seria transportado pela SCell. Este trabalho faz uma análise de desempenho da solução do 3GPP, denominada *LTE-LAA* (*License Assisted Access*), a qual permite que o sistema LTE opere em espectro não-licenciado. Analisa-se também o impacto desta nova tecnologia no desempenho de sistemas Wi-Fi operando na mesma banda.

I. INTRODUÇÃO

Vem crescendo o interesse em modificar o método de acesso ao meio do LTE para permitir seu uso em faixas de espectro não-licenciadas, como na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 5 GHz. A grande quantidade de usuários que constantemente usa redes Wi-Fi e LTE alternadamente em situações distintas representa um forte indício de que o uso de banda não-licenciada para sistemas LTE pode ser um nicho ou até mesmo uma alternativa para a crescente demanda por taxa de transmissão.

Devido à disponibilidade para operação no modo não-licenciado, a faixa entre 5150 e 5925 MHz é potencialmente interessante para a operação do LTE em modo secundário. Contudo, a operação em tal faixa só é permitida por redes que implementem uma série de mecanismos capazes de manter a interoperabilidade com todos os sistemas que desejam operar em tal faixa [1].

Este artigo traz uma análise de desempenho do LTE-LBT, uma solução do 3GPP para coexistência do LTE com sistemas Wi-Fi na faixa de 5GHz. O LTE-LBT, que foi disponibilizado no *Release 13* do 3GPP em março de 2016, continua sendo aprimorado pelo 3GPP [2], com melhorias sendo concebidas e previstas para compor o *Release 14* em 2017. A próxima seção apresenta características de algumas redes móveis legadas que, na proposta desse trabalho, são expostas a coexistir na faixa

de 5GHz, bem como apresenta o LTE-LBT (*Listen Before Talking*), que é a principal funcionalidade do LTE-LAA. A metodologia do trabalho é apresentada na seção II, seguida dos resultados e discussão na seção III. O artigo é finalizado com os comentários finais e discussões sobre trabalhos futuros.

A. Redes Legadas

O padrão 802.11 (comercialmente conhecido como Wi-Fi) opera mais comumente no modo infraestruturado, no qual cada dispositivo do usuário (denominado STA) se conecta a um ponto de acesso (AP) via uma conexão sem fio. Considerando a Camada de Acesso ao Meio (MAC), o método de acesso padrão é o CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), o qual pode ser caracterizado como uma evolução do tradicional CSMA/CD (*Collision Detection*) utilizado nas redes locais *Ethernet*.

O CSMA/CA utiliza uma função de coordenação chamada DCF (*Distributed Coordination Function*), na qual os nós da rede “escutam” o canal antes de iniciar uma transmissão a partir do procedimento *Clear Channel Access* (CCA). Este período de “escuta” do canal é composto por um período fixo denominado DCF *Interframe Space* (DIFS) mais um tempo aleatório chamado Janela de Contenção (CW). Esta, por sua vez, possui um valor máximo que é incrementado exponencialmente de acordo com a quantidade de retransmissões. O DCF também apresenta um padrão de verificação de erros que ocorre após a transmissão de cada quadro de dados. Uma mensagem de confirmação (ACK) é transmitida pelo receptor da mensagem depois de um intervalo de tempo chamado de *Short Interframe Space* (SIFS), indicando a correta recepção do quadro de dados.

No entanto, quando dois nós Wi-Fi disputam o uso do canal, o problema do nó escondido pode ocorrer. Ele acontece nas situações em que o STA é visível (em termos de sinal) pelo seu AP, mas não é visível para outros STAs que se comunicam com o mesmo AP. Ao tentar acessar o canal, o procedimento de CCA irá falhar para ambos os usuários que não se “escutam” entre si, podendo causar colisão de suas transmissões. Para lidar com esse problema, o padrão 802.11 definiu um mecanismo adicional usando dois sinais de controle, o RTS e o CTS. A utilização desse mecanismo é opcional, entretanto todo nó tem que implementar a função para poder reagir corretamente caso receba esses sinais.

A Figura 1 ilustra o uso do RTS/CTS. Depois de esperar por DIFS (mais um tempo de *backoff* aleatório, se o meio estiver ocupado), o emissor transmite um RTS (*Request to Send*). O pacote RTS inclui o destinatário e uma previsão do tempo de uso do canal. Essa estimativa de tempo especifica o intervalo necessário para transmitir o quadro de dados mais o sinal ACK que será enviado pelo receptor. Toda

Os autores são do Departamento de Engenharia de Comunicações da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. Emails: {pedro,vinicius,vicente}.gppcom@gmail.com

estação que receber o sinal RTS tem que fixar o seu NAV (*Network Allocation Vector*) de acordo com a duração da estimativa de tempo especificada no RTS. O NAV indica o ponto no tempo no qual a estação pode tentar acessar o meio novamente. Se o destinatário da mensagem recebe o RTS, ele responde com um CTS (*Clear to Send*), depois de esperar por SIFS. O CTS contém novamente a estimativa de tempo para transmissão da mensagem. Todas as estações que receberem o CTS têm que ajustar seu NAV novamente. O conjunto de estações que receberam o CTS não é, necessariamente, o mesmo conjunto de estações que receberam o RTS. Agora todas as STAs dentro do raio de cobertura do emissor e do receptor foram informadas que vão ter que aguardar mais tempo para tentar acessar o meio. Isso contorna o problema do terminal escondido, pois o mecanismo reserva o meio para um único emissor. Finalmente, o emissor pode enviar a mensagem propriamente dita depois de SIFS. O destinatário recebe a mensagem, espera por SIFS, e envia o sinal ACK, se a recepção estiver correta. Agora a transmissão está completa e o NAV de cada STA indica que o meio está inativo e o ciclo pode recomeçar [3]. Em 2005, foi especificado o padrão

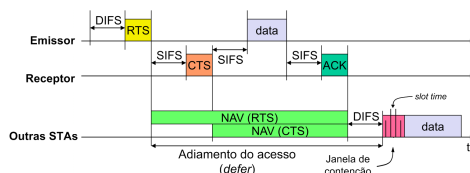


Fig. 1. Ilustração do DCF com RTS/CTS (adaptado de [3]).

IEEE 802.11e [4], no qual surgiu um novo modelo de acesso ao meio capaz de implementar estratégias de QoS (*Quality of Service*). O IEEE 802.11e define quatro novas categorias de tráfego (TC): AC.BK (*Background*), AC.BE (*Best Effort*), AC.VI (*Video*), AC.VO (*Voice*). Modificações no CCA foram necessárias para implementar o suporte a QoS, de maneira que o valor máximo do CW é definido de acordo com a TC em questão, proporcionando, estatisticamente, maior ou menor prioridade de transmissão para determinada TC. Esse modo de transmissão é chamado *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA). Também foi introduzido o *Transmission Opportunity* (TXOP), pelo qual se define o tempo que o STA pode mandar quadros após ganhar o acesso ao canal via CCA. Com o TXOP, diferente do modo tradicional, o STA pode transmitir mais de um quadro ao ganhar o acesso ao canal.

Já o padrão 802.11n-2009 [4] trouxe melhorias importantes para o Wi-Fi, proporcionando taxas de transmissão na ordem de 600 Mbps (802.11n-HT). As principais melhorias na camada MAC incluem: novos métodos de agregação de pacotes (agregar pacotes pequenos para diminuir o *overhead*) e *Block Acknowledgement* (a confirmação pode ser enviada para múltiplos pacotes ao invés de imediatamente depois do recebimento de um pacote). As principais melhorias na camada física incluem: *channel bonding* (canais de 40MHz pela junção de dois canais de 20MHz), intervalo de guarda menor (de 800 ns para 400 ns, permitindo aumentar o número de símbolos transmitidos por unidade de tempo) e MIMO 4x4.

Todas as melhorias no Wi-Fi são efetivas em promover, a

longo prazo, uma distribuição justa de acesso ao canal para todos os STAs e maior taxa de transmissão. Contudo, ainda não existe solução padronizada para gerenciar a interferência que outras redes causam no Wi-Fi ou, até mesmo, a interferência que APs Wi-Fi causam entre si.

LTE é um padrão introduzido pelo 3GPP *Release 8* que se caracteriza por ser uma tecnologia predecessora do 4G. Entre suas principais melhorias, destacam-se aumento da taxa de transmissão, diminuição da latência, maior flexibilidade de uso do espectro e maior eficiência espectral devido ao uso do OFDMA. O LTE opera com múltiplos MCSs (*Modulation and Coding Schemes*), com taxa de transmissão que pode chegar à ordem de 300 Mbps no *Downlink* - DL (com MIMO 4x4, 20 MHz e 64-QAM) e 75 Mbps no *Uplink* - UL (com SIMO 1x2, 20 MHz e 64 QAM).

Outra característica relevante do LTE é o fato de ser uma tecnologia *all-IP*, operando unicamente no modo de chaveamento de pacotes, mas com um arquitetura plana e com número reduzido de nós. Fato que contribui para redução da latência do sistema e viabilidade do uso de pacotes de dados para comunicação de voz e tráfego multimídia em geral.

A infraestrutura do LTE é dividida em dois elementos principais: E-UTRAN, composto por eNodeBs (estações rádio base LTE) e UEs (*User Equipments*), sendo responsável por promover o acesso do usuário ao sistema. O segundo elemento é o *Evolved Packet Core* (EPC), que é responsável pela interconexão da eNodeB com outras redes, garantindo aos usuários acesso à internet e a outras redes externas (e.g., à rede de telefonia fixa).

Um *frame* LTE de 10 ms é dividido em 10 *subframes* de 1 ms cada, com cada *subframe* sendo formado por 2 *slots* de 0,5 ms cada. *Subframe* facilita a alocação de recursos, enquanto o *slot* é útil para sincronização e o *frame* é a unidade de envio de informação do sistema. Cada *slot* contém 6 ou 7 símbolos OFDM, dependendo do tamanho do prefixo cíclico. Na frequência, múltiplos de 12 subportadoras de 15 kHz cada são agrupados em blocos de 180 kHz, denominados *Physical Resource Blocks* (PRBs). O número de PRBs existentes depende diretamente da banda disponível no sistema. Por exemplo, em 20 MHz de banda, existem 100 PRBs disponíveis para alocação. A mínima unidade de alocação de recurso se chama *Resource Block* (RB), o qual corresponde a meio *subframe* no tempo (1 slot) e um PRB na frequência. Assim, a cada TTI (*Time Transmission Interval*, igual a 1 ms), a eNodeB escala RBs para os UEs do sistema.

O 3GPP padronizou melhorias para o sistema LTE até se chegar, em 2011, a uma versão aderente ao padrão 4G em seu *Release 10* (LTE-Advanced). Foram introduzidas técnicas avançadas de gerenciamento de recursos de rádio, tais como *Coordinated Multipoint Transmission and Reception* (CoMP) e *Enhanced Inter-Cell Interference Coordination* (eICIC). Em relação às melhorias da camada física, podem-se citar o método de agregação de portadoras (com banda de até 100 MHz) e a adoção de MIMO 8x8, os quais proporcionam aumento significativo da taxa de transmissão do DL e do UL (3 Gbps e 1.5 Gbps, respectivamente).

1) *Mecanismo de Coexistência do LTE (LAA-LTE)*: Na Europa e na Ásia, existem regulações adicionais sobre o uso

do espectro não-licenciado, como o tempo limite de ocupação do canal, o *Listen Before Talking* (LBT), a mínima ocupação de banda, a densidade espectral de potência, entre outros [5]. O 3GPP, a partir do *Release 13*, concebeu o LAA-LTE, uma solução que visa a atender essas exigências regulatórias, preservando a coexistência com outras tecnologias que operam no espectro não-licenciado, como o Wi-Fi.

Assim, em conformidade com [5], o projeto LTE-LAA modificou o LTE de forma que SCells de espectro não-licenciado possam funcionar segundo um modo de operação *Load Based Equipment* (LBE), no qual um mecanismo de *Listen Before Talking* (LBT) é usado para determinar a disponibilidade de canal antes da transmissão [6]. O LBT é semelhante ao CCA usado no Wi-Fi, como mostra a Figura 2, existindo, entretanto, algumas diferenças minuciosas em seu *modus operandi*. Semelhante ao Wi-Fi, o LTE-LBT

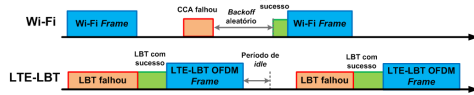


Fig. 2. Modo de operação LTE-LBT.

se certifica sobre a disponibilidade do canal, verificando se a potência de algum sinal externo dentro da banda específica é maior do que um determinado limiar estabelecido entre -62 e -82 dBm [6]. Caso o canal não esteja acessível, o LTE-LBT irá esperar um tempo fixo, denominado *defer time*, mais uma janela de contenção (CW), que é aleatória e varia de acordo com uma certa quantidade de *time slots*, denominados eCCA slots de 9 ou 10 μ s cada.

Se, após a contagem temporal regressiva do CW, o canal ainda estiver ocupado, o processo LBT novamente se reinicia a partir do *defer time*. Caso contrário, ou seja, o canal se encontra livre, o LTE-LBT irá adquirir um TXOP da ordem de 2 a 10 ms, e ocupará o canal durante este tempo. Após o tempo definido pelo TXOP ter sido finalizado, caso exista alguma outra necessidade de transmissão, um novo CW será gerada para que o processo possa reiniciar seguindo o mesmo critério de etapas.

Uma diferença do LTE-LBT em relação ao Wi-Fi é a maneira de atualização da CW máximo. Enquanto no Wi-Fi, o CW máximo é atualizado após não receber um ACK de um *frame* inteiro. No LTE-LBT, é contabilizada a quantidade de NACKS através do *feedback* do HARQ, de forma que, caso a quantidade de NACKs supere um valor acima de determinada percentagem predefinida em relação ao total transmitido, o CW máximo é aumentado. Contudo, para evitar que o CW máximo se mantenha em um valor elevado sem a real necessidade (e.g., caso o canal tenha melhorado suas condições), após quatro transmissões sucessivas com porcentagem de NACKs abaixo do limiar, as configurações atuais do CW máximo são redefinidas ao seu estado inicial [6].

O LTE-LBT ainda possui quatro classes de prioridade, representadas na Tabela I, cada uma contendo diferentes valores de CW e de tempo de ocupação do canal (MCOT), as quais podem ser usadas para diferenciação de QoS semelhante ao EDCA do Wi-Fi.

TABELA I
CLASSES DE PRIORIDADE DO LTE-LBT [7].

| Classe | CW-min | CW-max | MCOT | 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 |

II. MODELAGEM DO SISTEMA

A análise numérica apresentada neste trabalho é baseada no simulador ns-3 [8]. O ns-3 é um simulador de redes baseado em eventos discretos desenvolvido especialmente para pesquisa e uso educacional. Ele nasceu em 2006, oficialmente fundado pela *National Science Foundation* e pela INRIA *National Science Foundation and the Planète group* (INRIA Sophia Antipolis) [8]. Recebeu financiamento importante de algumas universidades (*Georgia Institute of Technology*, *University of Washington* e *University of Porto*) e das forças armadas americanas (*U.S. Naval and Army Research Laboratories*). O projeto *Google Summer of Code* financia projetos com o ns-3 desde 2008.

O ns-3 é construído em linguagem C++ e é uma ferramenta de simulação amplamente utilizada em todo o mundo e com grandes perspectivas de crescimento, contando com modelagem aderente as normas técnicas dos órgãos de padronização de redes emergentes. Pelas razões apresentadas acima, o ns-3 é usado como ferramenta de prototipagem para análise desempenho das soluções testadas neste trabalho.

A. Modelagem da coexistência entre LTE e Wi-Fi

O código que modela a coexistência entre redes LTE e Wi-Fi é mantido em um repositório chamado *laa/ns-3-lbt* [9], separado do principal. Esse código é fruto de um projeto financiado pela *Wi-Fi Alliance* e conduzido pelo *Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya* (CTTC) e pela Universidade de Washington [10]. As principais melhorias implementadas neste projeto foram: (i) no procedimento CCA do Wi-Fi; (ii) na modelagem da sincronização de quadros; (iii) na modelagem de seleção de AP baseada em RSSI; (iv) no modelo de propagação e interferência; (v) na modelagem MIMO. Foram implementados dois novos modos de transmissão do LTE: (i) o LTE *Duty-cycled* (LTE-DC); e (ii) o LTE *Listen Before Talking* (LTE-LBT). Adicionalmente, estão disponíveis alguns cenários de avaliação (*indoor* e *outdoor*) definidos em [6]. A próxima seção traz alguns detalhes da implementação do LTE-LBT desse projeto.

1) *LTE Listen Before Talking (LTE-LBT)*: Para uma implementação que incorpore várias maneiras de acesso ao meio, a classe *ChannelAccessManager* foi especializada para a classe *LbtAccessManager*, a qual implementa os mecanismos necessários para *backoff* do LTE-LBT de acordo com o que está especificado em [7] (*3GPP RAN 1 designs*). Essa classe foi implementada de modo a não impactar nas funcionalidades existentes no módulo LTE do ns-3 [11].

A implementação do LTE-LBT incorpora vários parâmetros que podem ser configurados em tempo de execução, entre eles: o *DeferTime* (tempo mínimo entre tentativas de acesso ao

canal via procedimento de CCA), $MinCw$ (tamanho mínimo da janela de contenção do LTE-LBT), o $MaxCw$ (tamanho máximo da janela de contenção do LTE-LBT), o $Txop$ (duração do acesso ao canal após sucesso no procedimento de contenção do LTE-LBT, o MCOT) e o $CwUpdateRule$ (regra de atualização da janela de contenção). O limiar de detecção de energia (ED *threshold*) também pode ser variado para nós LTE e Wi-Fi de maneira independente [11].

A janela de contenção é atualizada baseada em uma de quatro regras definidas pelo parâmetro $CwUpdateRule$. Atualmente, a janela de contenção pode ser atualizada quando: (i) $NACKS_{10\%PERCENT}$, são recebidos 10% de NACKS no procedimento de HARQ dentro do $Txop$; (ii) $NACKS_{90\%PERCENT}$, quando são recebidos 90% de NACKS; (iii) ALL_NACKS , quando todos os pacotes HARQ recebem NACK; e (iv) ANY_NACK , sempre que algum pacote HARQ recebe um NACK.

Com a especialização da classe *ChannelAccessManager*, é possível configurar o tipo de acesso ao canal usando o método *LteEnbPhy::SetChannelAccessManager*, por meio de três valores: *Default*, *Lbt* e *DutyCycle*. Dessa forma, para configurar o modo LTE-LBT, o usuário deve invocar o método *LteEnbPhy::SetChannelAccessManager* com *Lbt* como parâmetro.

III. ANÁLISE DE DESEMPENHO

A. Cenário de avaliação

O cenário escolhido para avaliar o desempenho do LTE-LBT foi o primeiro cenário de coexistência definido pelo 3GPP em [6]. Trata-se de um cenário composto de dois pontos de acesso (de operadoras diferentes) e dois usuários (um de cada operadora), como mostrado na Figura 3. Os pontos de acesso são configuráveis para operar nas tecnologias LTE tradicional (sem mecanismo de coexistência), LTE-LBT e Wi-Fi.

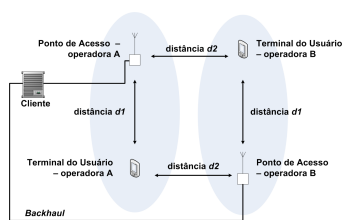


Fig. 3. Cenário de avaliação (adaptado de [6]).

Com esse cenário, é possível configurar a distância d_2 (para modelar diferentes níveis de interferência entre os pontos de acesso) bem como a distância d_1 entre o ponto de acesso e o terminal do usuário (para modelar diferentes níveis de sinal recebido).

Adicionalmente, existe um *backhaul*, que serve como cliente de tráfego. Ele é conectado através de enlaces ponto-a-ponto aos dois pontos de acesso. O *backhaul* gera o tráfego UDP em *downlink* para o terminal dos usuários.

A Tabela II mostra os principais parâmetros usados no levantamento de valor agregado do LTE-LBT apresentado neste trabalho. A comparação de desempenho é feita através da CDF (*Cumulative Distribution Function*) da vazão útil

(*throughput*) de pacotes dos dois usuários indicados na Figura 3 (medidos na camada de transporte).

TABELA II
PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.

| Parâmetros do Wi-Fi (PHY/MAC 802.11n-HT) | |
|--|---|
| Largura de banda e Intervalo de Guarda | 20MHz e 400ns |
| Limiar CCA-ED e Limiar CCA-CS | -62 dBm e -82 dBm |
| Adaptação de enlace (<i>rate adaptation</i>) | Baseado em SINR para atingir BER de 10^{-6} |
| Parâmetros do LTE-FDD | |
| Largura de banda | 20 MHz |
| Packet Scheduler e CQI report | Proportional Fair e Periodic wideband CQI (baseado em SINR) - 15 CQIs |
| LTE-LBT | |
| TxOP e Duração do slot | 8 ms e 9 μ s |
| MinCw e MaxCw | 15 e 63 slots |
| Regra de atualização da janela de contenção | 80% de NACKS do HARQ |
| Limiar de detecção do LBT (LBT-ED) | -62 dBm e -82 dBm |
| Parâmetros comuns | |
| Path loss e Shadow fading | ITU INH e 5dB Lognormal |
| Tecnologia de múltiplas antenas | MIMO 2x2 com 18 dBm de potência de transmissão |
| Modelo de tráfego (somente DL) | Modelo 1 FTP especificado em 3GPP TR36.814, $\lambda = 2.5$ |

B. Resultados e discussão

Essa seção mostra o desempenho da coexistência entre duas operadoras em espectro não-licenciado considerando dois casos: (i) com sistemas desacoplados, em que a distância entre os pontos de acesso é grande o suficiente para que um não interfira no outro ($d_2 = 10000$ m); (ii) com sistemas em coexistência, em que a distância entre os pontos de acesso é pequena o suficiente para haver sobreposição das áreas de cobertura dos dois sistemas ($d_2 = 10$ m). Os dois casos consideram $d_1 = 10$ m e tempo de simulação igual a 500 s.

A Figura 4 mostra o desempenho quando as duas operadoras adotam o Wi-Fi como tecnologia de acesso. Percebe-se que 18 % dos pacotes são recebidos com vazão inferior devido à coexistência. Ao comparar o décimo percentil, 10% dos pacotes são recebidos com até 37% a menos de vazão. Já ao considerar a coexistência entre sistemas LTE-LBT (Figura 5), por volta de 39% dos pacotes são recebidos com vazão inferior devido à coexistência. Contudo, existe uma perda de menos 14% no décimo percentil.

A Figura 6 mostra o desempenho da coexistência entre o LTE-LBT (operadora A) e o Wi-Fi (operadora B). Considerando os parâmetros testados, a perda de vazão é em 50% e 15% dos pacotes para o Wi-Fi e o LTE-LBT, respectivamente. Contudo, existe uma perda de somente 11,7% no décimo percentil do Wi-Fi e 3,7% do LTE-LBT.

Mesmo considerando que esses valores podem ser controlados ao mudar os limiares de detecção de ambos os sistemas, pode-se concluir que o LTE-LBT é um bom vizinho, tanto para coexistir com sistemas LTE-LBT quanto com o sistema Wi-Fi. A coexistência LTE-LBT/Wi-Fi reduz em 11,76% o décimo percentil da vazão do Wi-Fi, enquanto que na coexistência Wi-Fi/Wi-Fi essa redução é de 37%.

A Figura 7 mostra o desempenho do Wi-Fi ao coexistir com o LTE-LBT para diversos valores de d_2 e do limiar LBT-ED. Para d_2 entre 35 e 45 m, o limiar mais baixo (-82 dBm) foi capaz de evitar colisões entre os sistemas (interferência está entre -62 e -82 dBm). Para d_2 menor, a interferência está alta, resultando na não diferenciação entre os limiares. Para d_2 maior que 50 m, a interferência já é baixa o suficiente para resultar em boa SINR.

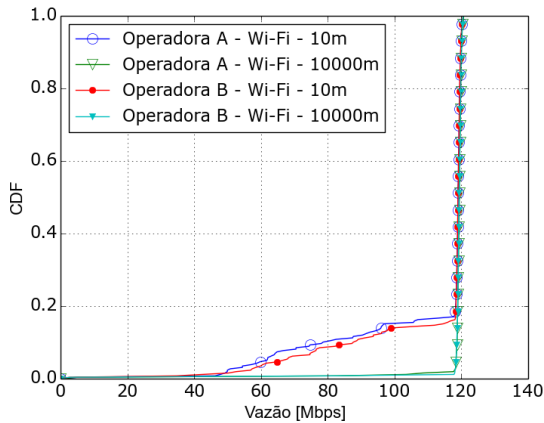


Fig. 4. Coexistência de duas operadoras usando o sistema Wi-Fi.

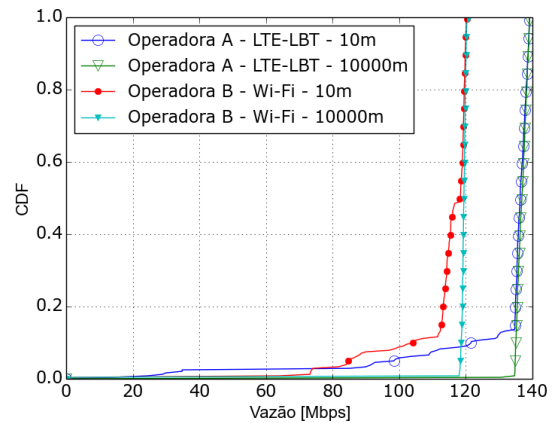


Fig. 6. Coexistência LTE-LBT e Wi-Fi operando juntos.

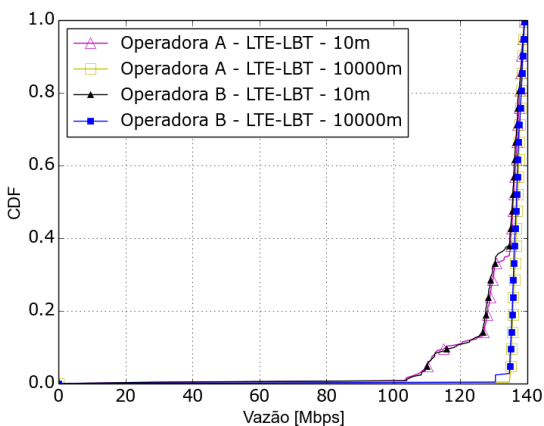


Fig. 5. Coexistência de duas operadoras usando o sistema LTE-LBT.

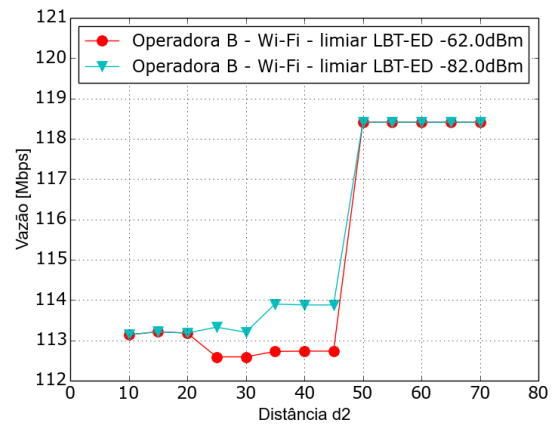


Fig. 7. Desempenho do Wi-Fi para diferentes limiares do LBT-ED.

IV. COMENTÁRIOS FINAIS E PRÓXIMAS INVESTIGAÇÕES

A análise de desempenho proposta neste trabalho demonstrou, em um cenário simples, que o LTE-LBT é uma solução promissora para coexistência com o sistemas Wi-Fi. Os resultados ilustram que o LTE-LBT obtém um bom desempenho ao coexistir com o Wi-Fi, impactando de maneira controlada no desempenho de seu vizinho. Na verdade, no cenário testado, os resultados demonstram que o LTE-LBT é um bom vizinho para o Wi-Fi até mesmo comparado ao cenário com dois sistemas Wi-Fi coexistindo.

Esse trabalho será continuado ao incluir outros cenários de avaliação, por exemplo os cenários *indoor* e *outdoor*, descritos em [6], com alta densidade de usuários. Outra vertente do trabalho investigará outras soluções de coexistência LTE/Wi-Fi e Wi-Fi/Wi-Fi, tais como LTE-DC (Duty-Cycle) [12]. A ideia é usar a ferramenta de prototipagem ns-3 (aderente às normas do IEEE e 3GPP) para avaliar a sensibilidade dos parâmetros de cada solução, bem como para realizar a comparação de desempenho entres elas.

REFERÊNCIAS

[1] ITU, *RESOLUTION 229 (Rev. WRC-12): Use of the bands 5 150-5 250, 5 250-5 350 MHz and 5 470-5 725 MHz by the mobile service for the implementation of wireless access systems including radio local area networks*, ITU Std., 2012.

[2] 3GPP. (2016) Plano de trabalho do 3gpp (3gpp list of work items) - <http://www.3gpp.org/dynareport/wi-list.htm>. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/DynaReport/WI-List.htm>

[3] J. Schiller, *Mobile Communications*. Addison-Wesley, 2003.

[4] IEEE. (2016) Ieee 802.11: Wireless lans - <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>

[5] ETSI , *EN 301 893: Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive*, ETSI Std., 2014.

[6] 3GPP, *TR 36.889: Feasibility Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum (Release 13)*, The 3rd Generation Partnership Project Std., 2015.

[7] H. Koorapaty, "RP-151866: Work item on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum (TSG RAN meeting 70)," 3GPP, Tech. Rep., 2015.

[8] ns-3. (2016) Página principal do projeto ns-3 (<https://www.nsnam.org/>). [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>

[9] —. (2016) Página com repositórios do ns-3 (<http://code.nsnam.org/>). [Online]. Available: <http://code.nsnam.org/>

[10] —. (2016) Página do projeto license-assisted access do ns-3 (<https://www.nsnam.org/wiki/laa-wifi-coexistence>). [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/wiki/LAA-WiFi-Coexistence>

[11] —, "LTE LBT Wi-Fi coexistence module documentation (Release ns-3-lbt rev. b48bfc33132b)," Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/~tomh/ns-3-lbt-documents/lbt-wifi-coexistence.pdf>

[12] E. Almeida, A. M. Cavalcante, R. C. D. Paiva, F. S. Chaves, F. M. Abinader, R. D. Vieira, S. Choudhury, E. Tuomaala, and K. Doppler, "Enabling LTE/WiFi coexistence by LTE blank subframe allocation," in *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, June 2013, pp. 5083–5088.