

Alocação de recursos em redes LTE utilizando bandas não-licenciadas

Henrique V. Lima¹, Elivelton F. Bueno², Kleber V. Cardoso¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal de Goiás (UFG)
Goiânia – GO – Brazil

²Escola de Matemática Aplicada (EMAp) – Fundação Getulio Vargas
Rio de Janeiro – RJ – Brasil

henriquevalle@inf.ufg.br, bueno@impa.br, kleber@inf.ufg.br

Abstract. *Long Term Evolution (LTE) in unlicensed bands (U-LTE) has emerged as a promising solution to address the growth of mobile data traffic. U-LTE extends the benefits of LTE with unused portions of the unlicensed 5 GHz spectrum, which is primarily used by Wi-Fi users. However, uncertainty about the availability of bandwidth makes the adoption of U-LTE a challenging new task for operators. In this work, we propose a stochastic programming approach for the allocation of U-LTE resources to expand bandwidth and coverage while controlling the risk of conflict with Wi-Fi demand. Three models from the literature for this demand are used in our computational experiments. The results show the importance of prior knowledge about the distribution of Wi-Fi demand.*

Resumo. *A LTE (Long Term Evolution) em banda não-licenciada (U-LTE) surgiu como uma solução promissora para o problema do enorme crescimento no tráfego de dados móveis. Ela amplia os benefícios da LTE com bandas do espectro não-licenciado de 5 GHz, usado principalmente em Wi-Fi. Mas incertezas quanto à disponibilidade dessas bandas tornam a adoção da U-LTE um grande desafio. Neste trabalho, propomos uma abordagem de programação estocástica para alocação de recursos a fim de expandir o atendimento por U-LTE sob um certo controle no risco de conflito com o Wi-Fi. Usamos três modelos da literatura para a demanda por Wi-Fi em nossos testes. Os resultados destacam a importância do conhecimento prévio sobre a distribuição dessa demanda.*

1. Introdução

Nos últimos anos, as redes de comunicação sem fio passaram por grandes avanços. Nas redes de telefonia móvel, por exemplo, a evolução para os sistemas 1G, 2G, 2.5G, 3G e 4G trouxe consigo novas técnicas de modulações, algoritmos de gerenciamento de recursos, além do aumento da largura de banda de transmissão [Dahlman et al. 2007]. Como consequência, atualmente, os usuários de redes 4G são capazes de executar diferentes tipos de aplicações a taxas de transmissões cada vez mais elevadas. Ao mesmo tempo, é crescente também o número de usuários de redes de comunicação sem fio. Segundo dados de Cisco Systems, Inc. [Cisco Systems, Inc. 2017], existiam mais de 4 bilhões de usuários de redes móveis em junho de 2017, apresentando ainda uma estimativa de mais de 22 bilhões de dispositivos conectados em 2021. Essa estimativa de crescimento aplicada às redes atuais resultaria na falta de recurso para servir à demanda de dados gerada pelos usuários [Hazas et al. 2016].

Uma das propostas da indústria para atender a essa nova demanda consiste na U-LTE (*Long Term Evolution in Unlicensed Spectrum*), uma tecnologia que permite maior eficiência espectral a custos reduzidos [Ratasuk et al. 2014]. Na U-LTE, a tecnologia LTE é implantada em bandas não-licenciadas e pode coexistir com tecnologias *Wi-Fi*. Além disso, a U-LTE foi proposta para atuar na frequência de 5 GHz. Nessa banda, há uma disponibilidade de 12 portadoras (canais de 36 a 112) distribuídas em 200 MHz de largura, todos com espaçamento de 20 MHz entre eles, sem sobreposição de canais adjacentes. Contudo, a implantação de LTE em bandas não-licenciadas traz diversos desafios, uma vez que sua operação pode degradar significativamente o desempenho dos sistemas *Wi-Fi*, que operam na mesma banda. Estudos de Cavalcante et al [Cavalcante et al. 2013] mostram que a degradação pode chegar a 90% em alguns casos específicos. Com isso, e diante da grande variação na disponibilidade de banda não-licenciada, a alocação de recursos em redes U-LTE exige a adoção de métodos avançados de otimização.

Neste trabalho, abordamos esse problema com um método de alocação estocástica de recursos que conta com dois objetivos conflitantes entre si: a maximização do valor esperado de retorno pelos usuários atendidos e a minimização do custo total de implantação da tecnologia U-LTE. Em particular, a otimização estocástica permite modelar incertezas em relação às variáveis que definem o problema, o que constitui uma forma mais realística de lidar com aleatoriedades intrínsecas a muitas aplicações estratégicas e também operacionais. A abordagem que aqui propomos consiste em um modelo de programação estocástica com restrições probabilísticas usualmente denominadas *chance constraints* [Charnes and Cooper 1959]. A fim de tratar esse modelo computacionalmente, construímos então um problema determinístico equivalente através de uma reformulação sem variáveis aleatórias que preserva uma certa equivalência prática com o modelo original [Charnes and Cooper 1963]. Com essa reformulação, e com o CPLEX, um dos softwares de otimização determinística mais avançados atualmente, resolvemos instâncias de dimensões práticas com experimentos computacionais para diferentes parâmetros de configuração do modelo e dos dados do problema.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, apresentamos conceitos básicos sobre a tecnologia U-LTE e discutimos trabalhos relacionados. Na Seção 3, descrevemos e reformulamos nosso modelo estocástico de alocação de recursos. Na Seção 4, apresentamos os modelos de distribuição de carga utilizados para representar a ocupação da banda da tecnologia *Wi-Fi*. O modelo de alocação de recursos proposto é avaliado numericamente na Seção 5. Finalmente, na Seção 6, apresentamos as considerações finais.

2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

Com taxas de transmissão de dados cada vez maiores, com o surgimento de aplicativos que entregam conteúdo na mão dos usuários, e ofertando maior qualidade de serviço, as redes móveis têm conquistado um grande número de usuários. Esse cenário tem resultado na escassez de recursos de banda para atendimento da demanda gerada. Em grandes centros de concentração populacional, por exemplo, a demanda gerada em alguns pontos é muito maior do que a capacidade de atendimento das redes de dados móveis. O resultado dessa superlotação é a interrupção, parcial ou total, do serviço para alguns usuários até que haja a liberação de recurso [Osseiran et al. 2014].

Uma das propostas de solução para esse problema foi operar a LTE em bandas não licenciadas, permitindo que as operadoras de redes móveis aumentem a cobertura de suas redes e a vazão de dados. Fundamentalmente, uma das exigências para qualquer utilizador da banda não licenciada, é que a tecnologia que utiliza o recurso, não gere perturbações sobre as demais [Chen et al. 2016]. Estudos de Cavalcante et al. [Cavalcante et al. 2013] demonstram que a U-LTE pode ser extremamente agressiva ao *Wi-Fi*. Para solucionar esse problema, técnicas de coexistência começaram a ser desenvolvidas, e hoje encontram-se disponíveis na literatura [Sagari et al. 2015] [Ko et al. 2016] [Cano and Leith 2015]. Além disso, em algumas regiões, como Europa e Japão, é obrigatório a utilização, na banda não licenciada, de técnicas que monitoram o meio antes de transmitir (LBT - *listen before talking*), ao contrário de países, como por exemplo Estados Unidos e China, onde o emprego de técnicas LBT não é necessário [Zhao et al. 2007]. Ainda, para que a LTE opere em banda não licenciada, devemos considerar a característica de transmissão de dados baseada em blocos de recursos físicos (PRB - *Physical Resource Block*). Em LTE, um PRB consiste no menor elemento possível de alocação de recurso em um agendador de uma BS/SC, dividido em 12 subportadoras por 7 símbolos OFDM (*orthogonal frequency-division multiplexing*), ocupando um *slot* de 0,5 ms [Nwamadi 2011].

Todas essas exigências, fizeram com que a implementação da U-LTE se tornasse desafiadora. No trabalho de Al-Dulaimi et al. [Al-Dulaimi et al. 2015], os autores apresentam uma proposta de utilização da U-LTE como um canal complementar a LTE (*supplemental downlink - SD*), provendo maior vazão de dados aos usuários atendidos. Como motivação, os autores apresentam a livre disponibilidade da banda de 5 GHz, mas também ressaltam a dificuldade da implantação da tecnologia em regiões que demandem a utilização de técnicas LBTs. Os resultados dos experimentos demonstram um aumento de 30% na vazão de dados, quando comparado ao mesmo cenário com LTE pura. Contudo, os autores não exploram a possibilidade do *upload* de dados pela banda não-licenciada.

Em Qualcomm [Qualcomm 2016], os autores propõem a utilização da U-LTE sem um link de comunicação em banda licenciada. Desse modo, a U-LTE funcionará de forma independente, utilizando apenas o recurso de banda não-licenciada que lhe for cedido. No protótipo denominado *MulteFire*, a transmissão de dados é realizada utilizando a divisão de dados em PRBs. Os resultados demonstram que, em ambientes livres de interferências do sinal *Wi-Fi*, a vazão efetiva de dados pode ser maximizada em torno de 70% quando comparada à tecnologia LTE, e também que a vazão efetiva pode ser maximizada em até 45% em ambientes com poucos pontos de acesso *Wi-Fi*. Contudo, a proposta não considera as exigências de disponibilidade de banda que usuários LTE apresentam, e descartam a necessidade de utilização de BSs LTE operando em conjunto com a U-LTE.

Em Mackenzie et al. [Abdel-Rahman et al. 2016], os autores levantam uma discussão ainda mais profunda acerca da disponibilidade não determinística de canais no espectro não-licenciado e como otimizar a utilização dos recursos disponíveis na presença de incertezas. No trabalho, os autores tratam o problema por meio de otimização estocástica, propondo a utilização de uma rede Heterogênea Multi-Celular composta por vários nós U-LTE e nós *Wi-Fi*. O ambiente resulta em um esquema de alocação em redes estocásticas e heterogêneas. Os resultados apresentados demonstram que a rede U-LTE atende todas as exigências dos usuários somente quando não houver disputa de banda. À medida que o número de dispositivos que utilizam o mesmo canal aumenta, o número de

usuários satisfeitos tende a diminuir consideravelmente. Os resultados demonstram ainda que a abordagem de restrição de oportunidades de transmissão em redes homogêneas, desenvolvida com programação estocástica, apresenta uma capacidade de assegurar, com uma certa probabilidade, que determinadas garantias de QoS sejam cumpridas, mesmo em ambientes com disputas pelo canal. Nesse trabalho, os autores concentram seus esforços em garantir, com uma certa probabilidade, que usuários tenham suas demandas atendidas, diferentemente de nosso trabalho, onde nos focamos em garantir, probabilisticamente, que a banda não-licenciada não seja violada em comunicações U-LTE.

3. Modelo de Sistema e Formulação do Problema

Nessa seção, formulamos um problema original, sem similares disponíveis na literatura, do atendimento de usuários em banda cuja disponibilidade é incerta, mas com alguma garantia probabilística de viabilidade. Consideramos um cenário onde uma BS (*base station*) recebe demandas de dados maior que a capacidade de atendimento. Com o objetivo de maximizar o número de usuários atendidos nessa região, consideramos ainda, possíveis pontos de implantação de SCs (*small cell*) que utilizam tecnologia U-LTE. Essas SCs poderão prover dados móveis aos usuários não-atendidos nessa região ou prover maior vazão de dados para usuários já atendidos e que necessitam de uma taxa de transmissão de dados maior. Consideramos ainda a presença de pontos de acesso *Wi-Fi*, que consomem recurso de banda não-licenciada. A Figura 1 apresenta uma esquematização desse cenário.

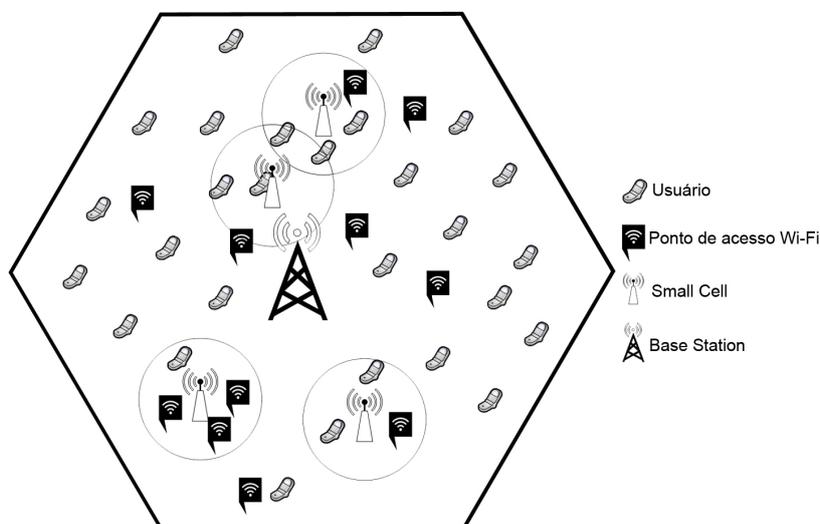


Figura 1. Rede LTE com SCs U-LTE operando em conjunto

Nosso objetivo principal é decidir onde ativar SCs que operem a tecnologia U-LTE de forma a maximizar o valor de retorno total pelos usuários atendidos. A justificativa para utilização de SCs com U-LTE baseia-se no raio de alcance do sinal desse tipo de torre. Como sua área de cobertura é menor, também será menor a quantidade de pontos de acesso *Wi-Fi* com os quais uma SC deverá compartilhar banda não-licenciada, aumentando assim as chances de disponibilidade dessa banda para o consumo dos usuários U-LTE.

3.1. Formulação do Problema

Consideremos I , J e K , conjuntos de índices associados, respectivamente, aos usuários, às BSs e às potenciais SCs em uma dada região geográfica. Para cada usuário $i \in \{1, 2, \dots, |I|\}$, consideremos dados: d_i , a demanda de transmissão por ele solicitada; \underline{d}_i , a demanda mínima aceitável para que ele seja servido; e v_i , o valor de retorno, para a operadora, por cada largura de banda a ele disponibilizada. Para cada BS $j \in \{1, 2, \dots, |J|\}$, consideremos dado: b'_j , sua capacidade máxima de fornecimento de banda de transmissão (via LTE). Para cada SC $k \in \{1, 2, \dots, |K|\}$, consideremos dados: c_k , seu custo fixo de ativação; e ξ_k , a variável aleatória para a capacidade de banda de transmissão (via U-LTE). Além disso, seja c'' o orçamento total disponibilizado para as possíveis ativações de SCs.

Apesar de um usuário não estar necessariamente sob a área coberta por uma (ou mais) possível SC, vamos considerar que ele sempre estará geograficamente ao alcance de ao menos uma BS. A fim de representarmos essa relação de cobertura entre usuários, BSs e potenciais SCs, usaremos a seguinte notação: $I'_j \subset I$, o subconjunto dos usuários que estão sob a área de cobertura da BS $j \in J$; $I''_k \subset I$, o subconjunto dos usuários que estão sob a área de cobertura da possível SC $k \in K$; $J_i \subset J$, o subconjunto das BSs que cobrem o local do usuário $i \in I$; e $K_i \subset K$, o subconjunto das possíveis SCs que podem cobrir o local do usuário $i \in I$. No modelo matemático, também consideramos um fator para a perda de sinal que ocorre em função da distância entre um usuário e a base e/ou a SC que o serve. Mais especificamente, denotamos por $\tau'_{i,j}$ o fator dessa perda entre o usuário $i \in I$ e a BS $j \in J_i$; e por $\tau''_{i,k}$ o fator de perda entre o usuário $i \in I$ e a SC $k \in K_i$.

Tabela 1. Dados para o modelo matemático

I	Conjunto dos índices representando os usuários.
J	Conjunto dos índices das <i>base stations</i> (BSs).
K	Conjunto dos índices das possíveis <i>small cells</i> (SCs).
I'_j	Conjunto dos usuários na área de cobertura da BS $j \in J$.
I''_k	Conjunto dos usuários na área de cobertura da possível SC $k \in K$.
J_i	Conjunto das BSs que cobrem o local do usuário $i \in I$.
K_i	Conjunto das potenciais SCs que cobrem o local do usuário $i \in I$.
d_i	Demanda de transmissão solicitada pelo usuário $i \in I$.
\underline{d}_i	Fornecimento mínimo aceitável para servir ao usuário $i \in I$.
v_i	Valor de retorno por largura de banda ofertada para $i \in I$.
b'_j	Capacidade máxima de banda de transmissão pela BS $j \in J_i$.
c_k	Custo fixo de ativação da SC $k \in K$.
$\tau'_{i,j}$	Fator de atenuação de sinal devido à distância de $i \in I$ até $j \in J$
$\tau''_{i,k}$	Fator de atenuação de sinal devido à distância de $i \in I$ até $k \in K$
c''	Orçamento total disponível para ativações de SCs.
ξ_k	Variável aleatória para a capacidade da SC $k \in K_i$.
α_k	Probabilidade mínima aceitável de respeito à capacidade da SC $k \in K$.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados de entrada do modelo determinístico que aqui estamos propondo. Definamos, para todo usuário $i \in I$, toda BS $j \in J_i$, e toda SC potencial $k \in K_i$, as seguintes variáveis de decisão:

- $x'_{i,j} \in Z$, a largura de banda servida pela BS j ao usuário i ;
- $x''_{i,k} \in Z$, a largura de banda servida pela SC k ao usuário i ;
- $y'_{i,j} \in \{0, 1\}$, indicador que assume valor 1 quando i for servido pela BS j ;
- $y''_k \in \{0, 1\}$, indicador que assume valor 1 quando a SC k for ativada;
- $z_i \in \{0, 1\}$, indicador que assume valor 1 quando o usuário i não é atendido.

Usando essa definição de variáveis e a notação apresentada na Tabela 1, propomos então, em (1) - (14), um modelo de programação estocástica baseada em *chance constraints* para o problema introduzido na seção anterior.

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i \in I} v_i \left(d_i z_i - \sum_{j \in J_i} x'_{i,j} - \sum_{k \in K_i} x''_{i,k} \right) + \sum_{k \in K} c_k y''_k \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J_i} \tau'_{i,j} x'_{i,j} + \sum_{k \in K_i} \tau''_{i,k} x''_{i,k} + d_i z_i \geq \underline{d}_i, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J_i} \tau'_{i,j} x'_{i,j} + \sum_{k \in K_i} \tau''_{i,k} x''_{i,k} + d_i z_i \leq \bar{d}_i, \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I'_j} x'_{i,j} \leq b'_j, \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$Pr \left\{ \sum_{i \in I''_k} x''_{i,k} \leq y''_k \xi_k \right\} \geq \alpha_k, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} c_k y''_k \leq c'' \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J_i} y'_{i,j} + z_i \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\tau'_{i,j} x'_{i,j} - d_i y'_{i,j} \leq 0, \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (8)$$

$$\tau''_{i,k} x''_{i,k} - d_i y''_k \leq 0, \quad \forall i \in I, k \in K_i \quad (9)$$

$$x'_{i,j} \geq 0, x'_{i,j} \in Z, \quad \forall i \in I, j \in J'_i \quad (10)$$

$$x''_{i,k} \geq 0, x''_{i,k} \in Z, \quad \forall i \in I, k \in K_i \quad (11)$$

$$y'_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (12)$$

$$y''_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (14)$$

A função objetivo (1) é composta por três partes principais: a primeira penaliza a operadora (em $v_i d_i$) o eventual não-atendimento, de pelo menos a demanda mínima, a um usuário (digamos, i); a segunda parte, incentiva o atendimento às demandas dos usuários, tanto a partir de uma BS quanto de uma SC, priorizando aqueles com maior valor de retorno para a operadora; e a terceira parte considera os custos das SCs que forem

eventualmente ativadas. As restrições em (2) impõem a quantidade mínima (\underline{d}_i) de banda servida ao usuário (digamos, i) para que seja considerado atendido. Em (3) limitamos a quantidade máxima (d_i) de banda servida a esse usuário. Tanto em (2) quanto em (3), consideramos o efeito de atenuação do sinal devido à distância entre BS ou SC e usuário. As restrições (4) limitam a quantidade de banda servida a no máximo a capacidade da BS (b'_j). Cada *chance constraint* em (5) garante, com uma certa probabilidade (α_k) que a banda não-licenciada utilizada por uma SC $k \in \{1, 2, \dots, |K|\}$ não exceda a banda disponível (ξ_k). A restrição em (6) limita o custo máximo de investimento para ativação de SCs. As restrições em (7) limitam o atendimento de um usuário a apenas uma BS. Em (8) limitamos a demanda máxima servida ao usuário (digamos, i). As restrições em (9) impõem que somente SCs ativas possam servir usuários. Em (10) e (11) garantimos a integralidade e não negatividade das variáveis de decisão, servindo ao usuário demandas não-negativas e inteiras. Por fim, em (12), (13) e (14), estabelecemos as variáveis binárias de decisão. De uma forma geral, nosso modelo busca por soluções que dêem maior 'retorno' para a operadora, priorizando usuários de maior 'valor' por unidade de demanda. No entanto, esse 'retorno' não precisa ser um valor monetário. Ele pode representar outras métricas, e.g., algum fator de satisfação do usuário, caracterizando sua fidelização.

É NP-Completo o problema (1)-(14) em sua versão como problema de decisão: determinar se existe uma solução viável para a qual o valor da função objetivo, (1), é menor que um dado valor constante arbitrário. De fato, inicialmente, para verificarmos que o ele é NP-difícil, podemos fazer uma redução do problema das múltiplas mochilas com variáveis binárias [Magazine and Chern 1984], que consiste na minimização da soma de um valor $p_i x_{ji}$ para cada item i , de tamanho w_i , que for colocado numa mochila j de capacidade W_j . A redução, que é polinomial, pode ser feita substituindo-se cada variável $x'_{i,j}$ do problema (1)-(14) por $w_i x_{ji}$ e fixando-se $d_i = \underline{d}_i = w_i$, $\tau'_{i,j} = \tau''_{i,k} = 1$, $\xi_k = 0$, $\alpha_k = 1$, $b'_j = W_j$, $c_k = 0$ e $v_i = p_i/w_i$. Além disso, o problema de decisão está na classe NP, pois dada uma solução, sua viabilidade e seu valor correspondente podem, naturalmente, ser verificados em tempo polinomial.

3.2. Reformulação do problema

Nossa proposta para a resolução do problema consiste em transformar o modelo de otimização estocástica da seção anterior em um problema determinístico equivalente que não mais contenha variáveis aleatórias. Para isto, devemos reformular as restrições probabilísticas, em (5), de forma a eliminar do modelo as variáveis aleatórias ξ_k , para $k = 1, 2, \dots, |K|$. Consideremos um $k \in K$ arbitrário e suponhamos que a SC k seja ativada. Neste caso, o modelo exige que a probabilidade de violação da capacidade da SC k seja limitada inferiormente por α_k :

$$Pr \{ \xi_k \geq \tilde{x} \} = 1 - F_k(\tilde{x}) \geq \alpha_k, \quad (15)$$

onde $F_k(\tilde{x})$ é o valor da CDF (função distribuição acumulada) da variável aleatória ξ_k e \tilde{x} denota a banda servida pela SC k , $\sum_{i \in I''_k} x''_{i,k}$. Reposicionando seus termos e aplicando a inversa da CDF em ambos os lados da última desigualdade em (15), obtemos $\tilde{x} \leq F_k^{-1}(1 - \alpha_k)$. Logo, substituindo as restrições não-lineares em (5) por

$$\sum_{i \in I''_k} x''_{i,k} \leq 1 - F_k^{-1}(1 - \alpha_k) y''_k, \quad (16)$$

podemos resolver o problema resultante através de métodos de programação linear inteira.

4. Modelo para redes 802.11

Neste trabalho, APs (*access point*) *Wi-Fi* são posicionados utilizando o modelo de distribuição PPP (*spatial Poisson point process*). Em termos de probabilidade, estatística e campos relacionados, um processo PPP consiste na localização de objetos matemáticos em um espaço de forma aleatória [Stoyan and Stoyan 1985].

A ocupação do *Wi-Fi* em determinado canal consiste em uma variável aleatória, que torna tanto utilização, quanto disponibilidade de recurso (banda de transmissão), variáveis não determinísticas. Para descrever essa aleatoriedade utilizaremos três modelos de temporais, o (1) modelo baseado na distribuição de Weibull [Lino and Carvalho 2008]; o (2) modelo baseado em Log-normal [Wellens 2010]; e também o (3) modelo baseado na Generalizada de Pareto [Benítez and Casadevall 2012].

4.1. Modelo baseado em Weibull (WB)

Em Lino et al. [Lino and Carvalho 2008], o autor apresenta uma análise estatística, através de medições práticas, com a utilização de um robô móvel que gera solicitações de dados a APs *Wi-Fi* ao longo do tempo. Os resultados das medições são transformados em uma curva de distribuição empírica, e submetido a comparações com as distribuições de Weibull e Rayleigh. Os autores concluem que a ocupação do *Wi-Fi*, pode ser melhor representado como uma distribuição de Weibull com parâmetros de forma e escala, para uma ocupação média, iguais a $\alpha = 4.3724$ e $\beta = 1.0885$, respectivamente. Em nossos experimentos computacionais, utilizamos esses parâmetros para representar a distribuição de Weibull e, na restrição (16) do modelo, temos então

$$F_k^{-1}(1 - \alpha_k) = \beta (-\ln(\alpha_k))^{\frac{1}{\alpha}} = 1.0885(-\ln(\alpha_k))^{0.2287}, \quad (17)$$

para cada SC $k \in K$.

4.2. Modelo baseado em Log-normal (LN)

Em Wellens et al. [Wellens 2010], os autores avaliam várias propriedades do uso de espectro em domínios de tempo e frequência. E, dentre as propriedades analisadas, está a ocupação que o *Wi-Fi* gera em um canal de 20 MHz de largura. Os autores comparam as curvas de distribuição de modelos matemáticos com a curva de distribuição de um modelo real extraído a partir de simulações. Eles concluem que a distribuição Log-normal é a que melhor representa a ocupação do *Wi-Fi*, com parâmetros de forma e escala, para uma ocupação média iguais a $\mu = 1.6$ e $\sigma = 1.3$. Neste caso, para a restrição (16), usamos então

$$F_k^{-1}(1 - \alpha_k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\alpha_k} \frac{e^{-\frac{(\ln(\alpha_k) - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\alpha_k} d\alpha_k = \frac{1}{3.25} \int_0^{\alpha_k} \frac{e^{-\frac{(\ln(\alpha_k) - 1.6)^2}{3.38}}}{\alpha_k} d\alpha_k, \quad (18)$$

para cada SC $k \in K$.

4.3. Modelo baseado na Generalizada de Pareto (GP)

Em Benítez et al. [Benítez and Casadevall 2012], o autor identifica, por meio de comparações de curvas de distribuição, com uma curva gerada a partir da coleta de dados reais, a curva de distribuição matemática que mais se aproxima da curva de referência. No

estudo, o autor considera 7 diferentes distribuições matemáticas: *exponential* (E), *generalized exponential* (EG), Pareto (P), *generalized pareto* (GP), *Log-normal* (LN), *Gamma* (G) e *Weibull* (W), e conclui que, para o experimento, a curva de uma GP compõe a distribuição de demanda do *Wi-Fi* que mais se aproxima do modelo real avaliado, com cerca de 94% de precisão.

No trabalho, o autor ainda apresenta 5 conjuntos de configurações da GP que modelam o nível de ocupação gerado pelo *Wi-Fi*. Em nossos experimentos, utilizaremos o conjunto de parâmetros que fornecem uma ocupação média do canal, onde $\mu = 3.5150$, $\lambda = 5.1483$ e $\gamma = 0.1978$. Consideramos ainda o problema determinístico equivalente que apresentamos na seção 3.2. Note que quando $\gamma \leq 0$, a GP é equivalente a uma distribuição de Pareto [Hosking and Wallis 1987]. Neste caso, para a restrição 16, usamos então

$$F_k^{-1}(1 - \alpha_k) = \frac{\mu}{(\alpha_k)^{\frac{1}{\lambda}}} = \frac{3.5150}{(\alpha_k)^{0.1942}}, \quad (19)$$

para cada SC $k \in K$.

4.4. Configuração do cenário 802.11

A banda de 5 GHz dispõe de 12 canais não sobrepostos de 20 MHz cada. Assumamos que a ocupação do *Wi-Fi* em determinado canal $c \in C$ é dada pelo somatório da carga Ψ_w gerada por todo AP $w \in W_k''$ que esteja geograficamente posicionado na área de cobertura de uma SC $k \in K$, e transmitindo no mesmo canal. A banda ocupada será dada pelo somatório de banda consumida por APs *Wi-Fi* em todos os 12 canais. E a banda disponível para transmissões U-LTE será dada pela diferença entre a banda disponível, t'' , e o total consumido pelo *Wi-Fi*, isto é:

$$\xi_k = t'' - \sum_{c \in C} \sum_{w \in W_k''} \Psi_w. \quad (20)$$

5. Avaliação de Desempenho

Nesta seção, avaliamos os resultados obtidos com o modelo de alocação estocástico proposto na Seção 3. Todos os cenários de dados do problema foram gerados utilizando o MATLAB a partir dos parâmetros fornecidos na Tabela 2, e com modelo implementado em OPL e resolvido no software de otimização determinística CPLEX.

Tabela 2. Valores de entrada utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
A	10000 m^2	K^R	2000 m^2	d_i	5-20 PRBs
J	1	K^D	1000 m^2	b'_j	20 PRBs
J^R	7000 m^2	I	35	c_k	20
j^D	7000 m^2	W	80	v_i	3
K	10	\underline{d}_i	5 PRBs		

5.1. Configuração de Avaliação

Em nosso modelo, consideramos usuários distribuídos segundo o modelo PPP em uma área geográfica de tamanho A , e que apresentam uma demanda numérica (d_i) em PRBs. A distribuição da localização de BSs e SCs é feita utilizando-se o processo de HCPP (*Hard Core Point Process*) [Stoyan and Stoyan 1985], com raio de cobertura (J^R, K^R) e também distância mínima (J^D, K^D) definidos conforme apresentado na Tabela 2. Consideramos ainda que o custo de atenuação de sinal devido a distância entre o transmissor (SC), e o receptor (usuário) utilize o modelo *cost231* [Abhayawardhana et al. 2005], que fornece o melhor cálculo da atenuação para distâncias de até 3 kms. Para calcular a atenuação entre uma BS e um usuário, que estão em distâncias maiores que 3 kms, e menores que 20 kms, utilizamos o modelo Hata Model [Abhayawardhana et al. 2005].

5.2. Alocação e Satisfação de Usuários

Inicialmente, estudamos a porcentagem de usuários satisfeitos sob o esquema de alocação estocástico proposto. Nas Figura 2(a) e 2(b), traçamos o número de usuários atendidos e a demanda em PRBs servida, como uma função de α_k . O número de usuários satisfeitos diminui a medida que a garantia de não violação da banda disponível é aumentada. Podemos observar que a rede virtual U-LTE terá melhor desempenho, atendendo todos os usuários do modelo quando $\alpha_k = 10\%$. Em particular, a Figura 2(b) indica que o maior impacto do aumento de α_k ocorre em regiões onde a ocupação *Wi-Fi* se equipare a uma distribuição LN. Para as demais distribuições, o número de PRBs servidos diminui consideravelmente quando aumentamos α_k até 60%, mas tende a se estabilizar para valores maiores.

Comparamos ainda o número de usuários satisfeitos na U-LTE quando APs *Wi-Fi* tem ocupação similares aos dos modelos baseados em GP, WB e LN, para valores de α_k iguais a 70% e 90%, como uma função de c'' . Conforme demonstrado na figura 3(a), o número de usuários atendidos cresce significativamente a medida que aumentamos o recurso c'' disponibilizado pela operadora. Os melhores resultados são obtidos para um comportamento de ocupação do *Wi-Fi* regido pela GP. Em WB, o aumento da requisição de α_k de 70% para 90% cria uma redução de 50% no número de usuários atendidos no modelo. Por fim, quando analisamos o modelo baseado em LN, podemos observar uma queda de 67% no número de usuários atendidos. Os resultados podem ser justificados pelas características das curvas de distribuição, por exemplo, a LN tem um comportamento de cauda longa, com forte pico de valores em curto espaço. Esse comportamento tende a deixar mais banda livre para utilização U-LTE para valores menores de α_k .

5.3. Custo da Rede Virtual U-LTE

Aqui, consideramos o custo da rede U-LTE como função de α_k . Como mostra a Figura 2(c), o número de SCs ativadas diminui consideravelmente a medida que as requisições de α_k aumentam. Para o caso onde APs *Wi-Fi* tenham uma ocupação do canal regida pela LN, o modelo não encontra justificativa monetária para ativação de SCs nessa região com valores de $\alpha_k \geq 90\%$. A função objetivo em 2(d) demonstra o rápido crescimento do custo diante do não atendimento de usuários do modelo, o que pode ser lido como a perda de chance de ganho financeiro para a operadora. Comprovamos esse comportamento nas figuras 3(c) e 3(d), que demonstram as decisões de ativação de SCs como função de c'' para valores fixos de α_k . Essa característica evidencia a grande

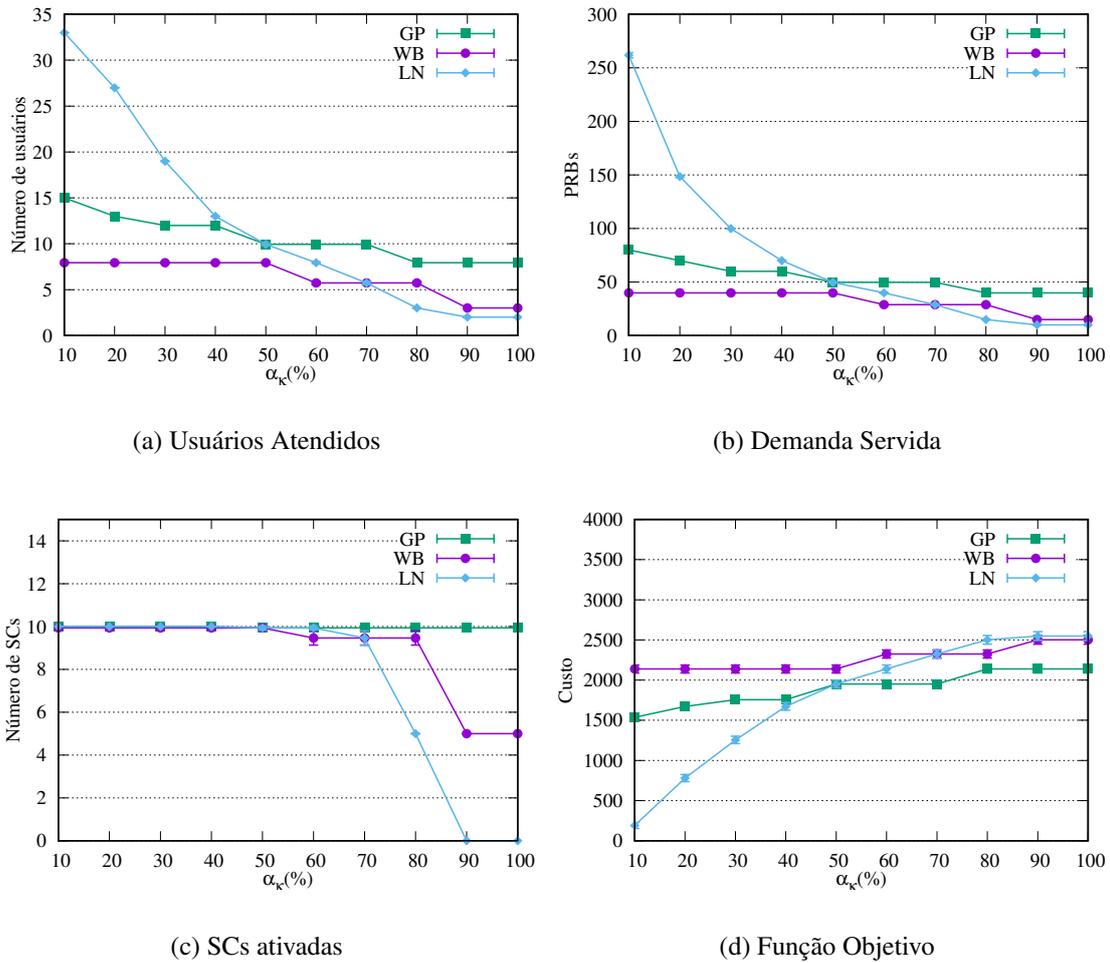


Figura 2. Impacto de α_k no modelo de alocação estocástico.

importância de se investir na análise do comportamento da ocupação *Wi-Fi* na área de possível implantação de SCs, afinal, o impacto desse fator na solução é grande.

O parâmetro α_k nesse modelo atua como um ajuste da solução no cenário analisado, podendo fornecer ao tomador de decisões, dados mais precisos, considerando configurações de rede que capturem situações mais próximas do mundo real, e levando em consideração a possibilidade ou não de invasão de banda da rede *Wi-Fi* para atendimento de usuários da rede móvel.

6. Conclusão

Neste artigo, propusemos uma estrutura de alocação de recursos estocástica para explorar a capacidade das redes U-LTE. Consideramos o fator de disputa pela banda com APs *Wi-Fi*, modelando a demanda como distribuições de Weibull, Log-normal e Generalizada de Pareto. A rede virtual U-LTE foi proposta para fornecer garantias probabilísticas, pré-especificadas, de que não haja invasão de banda e geração de perturbação em usuários *Wi-Fi*. Consideramos uma rede LTE tradicional suportada pela possível implantação de diversas SCs para aumentar o número de usuários atendidos pela operadora. Adotamos uma abordagem de programação baseada em restrições probabilísticas em nossa formulação.

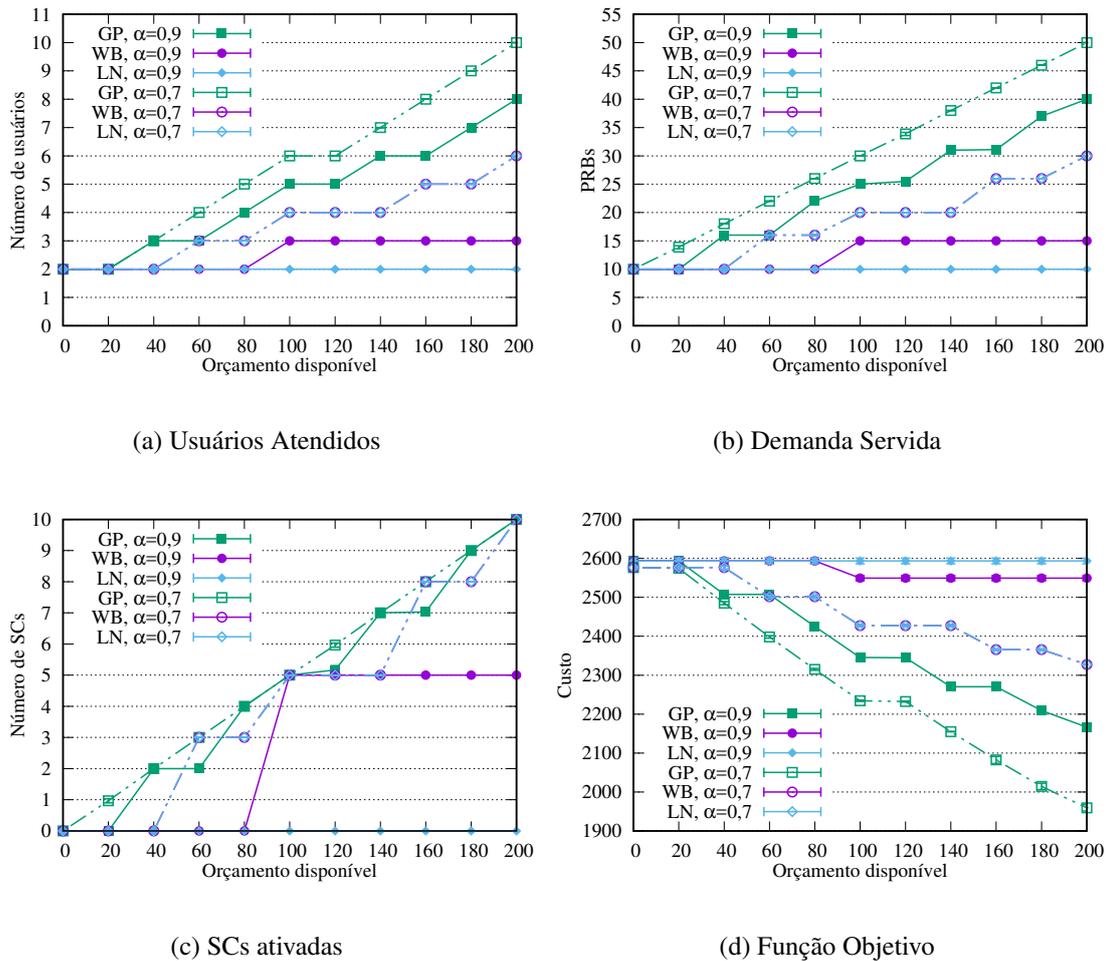


Figura 3. Alguns resultados para $\alpha = 70\%$ e $\alpha = 90\%$.

Nossos resultados numéricos demonstraram que a capacidade de maximização do número de usuários atendidos depende grandemente do tipo de comportamento dos usuários *Wi-Fi* na área de cobertura considerada. Estudamos os impactos desse tipo de comportamento dos APs *Wi-Fi* no número de usuários atendidos, na viabilidade e no número de SCs ativadas, na quantidade de banda servida e no custo e valor de retorno em relação a diferentes níveis de risco de invasão à banda solicitada por usuários *Wi-Fi*.

Apesar de termos aqui assumido que, por exemplo, a demanda de cada usuário seja um valor fixo, na prática ela pode variar bastante e, no modelo, poderia ser também representada por variáveis aleatórias. Além disso, tratamos de um problema cujo contexto operacional é constituído por usuários que estão em constante mobilidade, muitos deles frequentemente saindo da área de alcance de uma possível SC e, até mesmo, entrando e saindo da área de cobertura de possíveis BSs. A abordagem desse estudo, no entanto, se aplica além dessa aparente limitação, pois o problema é sobretudo de natureza estratégica, e o que temos nos referido como usuário, no modelo, pode representar um cenário de usuários, agrupados tanto por critérios geográficos quanto categóricos, e os respectivos valores de retorno e de demanda podem representar medidas estatísticas apropriadas, incluindo algum cenário de interesse particular para análise de decisões.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) na chamada No. 05/2016, processo No. 201610267001193. O trabalho também foi parcialmente financiado pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP).

Referências

- Abdel-Rahman, M. J., AbdelRaheem, M., MacKenzie, A., Cardoso, K., and Krunz, M. (2016). On the orchestration of robust virtual lte-u networks from hybrid half/full-duplex wi-fi aps. In *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1–6.
- Abhayawardhana, V. S., Wassell, I. J., Crosby, D., Sellars, M. P., and Brown, M. G. (2005). Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems. In *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, volume 1, pages 73–77 Vol. 1.
- Al-Dulaimi, A., Al-Rubaye, S., Ni, Q., and Sousa, E. (2015). 5g communications race: Pursuit of more capacity triggers lte in unlicensed band. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 10(1):43–51.
- Benítez, López, M. and Casadevall, F. (2012). *Spectrum Usage Models for the Analysis, Design and Simulation of Cognitive Radio Networks*, pages 27–73. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Cano, C. and Leith, D. J. (2015). Coexistence of wifi and lte in unlicensed bands: A proportional fair allocation scheme. In *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, pages 2288–2293.
- Cavalcante, A. M., Almeida, E., Vieira, R. D., Choudhury, S., Tuomaala, E., Doppler, K., Chaves, F., Paiva, R. C. D., and Abinader, F. (2013). Performance evaluation of lte and wi-fi coexistence in unlicensed bands. In *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–6.
- Charnes, A. and Cooper, W. W. (1959). Chance-constrained programming. *Management Science*, 6(1):73–79.
- Charnes, A. and Cooper, W. W. (1963). Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints. *Operations Research*, 11(1):18–39.
- Chen, Q., Yu, G., and Ding, Z. (2016). Optimizing unlicensed spectrum sharing for lte-u and wifi network coexistence. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(10):2562–2574.
- Cisco Systems, Inc. (2017). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper.
- Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J., and Beming, P. (2007). *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*.
- Hazas, M., Morley, J., Bates, O., and Friday, A. (2016). Are there limits to growth in data traffic?: On time use, data generation and speed. In *Proceedings of the Second*

- Workshop on Computing Within Limits*, LIMITS '16, pages 14:1–14:5, New York, NY, USA. ACM.
- Hosking, J. R. and Wallis, J. R. (1987). Parameter and quantile estimation for the generalized pareto distribution. *Technometrics*, 29(3):339–349.
- Ko, H., Lee, J., and Pack, S. (2016). A fair listen-before-talk algorithm for coexistence of lte-u and wlan. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(12):10116–10120.
- Lino, F. and Carvalho, O. (2008). *Caracterização da Distribuição de Weibull em Ambientes Indoor*. Dissertação (Mestrado profissional em Gestão de redes Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas.
- Magazine, M. J. and Chern, M. (1984). A note on approximation schemes for multidimensional knapsack problems. *Mathematics of Operations Research*, 9(2):244–247.
- Nwamadi, O. (2011). Dynamic physical resource block allocation algorithms for uplink long term evolution. *IET Communications*, 5:1020–1027(7).
- Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., Kusume, K., Marsch, P., Maternia, M., Queseth, O., Schellmann, M., Schotten, H., Taoka, H., Tullberg, H., Uusitalo, M. A., Timus, B., and Fallgren, M. (2014). Scenarios for 5g mobile and wireless communications: the vision of the metis project. *IEEE Communications Magazine*, 52(5):26–35.
- Qualcomm (2016). MulteFire: LTE-like performance with Wi-Fi-like deployment simplicity. <https://www.qualcomm.com/invention/technologies/lte/multefire>. [Último acesso em: 12/08/2017].
- Ratasuk, R., Mangalvedhe, N., and Ghosh, A. (2014). Lte in unlicensed spectrum using licensed-assisted access. In *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 746–751.
- Sagari, S., Baysting, S., Saha, D., Seskar, I., Trappe, W., and Raychaudhuri, D. (2015). Coordinated dynamic spectrum management of lte-u and wi-fi networks. In *2015 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 209–220.
- Stoyan, D. and Stoyan, H. (1985). On one of matérn’s hard-core point process models. *Mathematische Nachrichten*, 122(1):205–214.
- Wellens, M. (2010). *Empirical modelling of spectrum use and evaluation of adaptive spectrum sensing in dynamic spectrum access networks*. PhD thesis, Aachen. Zsfassung in dt. u. engl. Sprache; Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010.
- Zhao, Q., Ren, W., and Swami, A. (2007). Spectrum opportunity detection: How good is listen-before-talk? In *2007 Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pages 767–771.