

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE INFORMÁTICA

HENRIQUE VALLE DE LIMA

**Alocação de recursos para redes LTE
(Long Term Evolution) em bandas
não-licenciadas**

Goiânia
2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS
DE TESES E
DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Henrique Valle de Lima

Título do trabalho: Alocação de recursos para redes LTE (Long Term Evolution) em bandas não-licenciadas

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente
- Submissão de artigo em revista científica
- Publicação como capítulo de livro
- Publicação da dissertação/tese em livro

²A assinatura deve ser escaneada.

HENRIQUE VALLE DE LIMA

Alocação de recursos para redes LTE (Long Term Evolution) em bandas não-licenciadas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de concentração: Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Kleber Vieira Cardoso

Co-Orientador: Prof. Elivelton Ferreira Bueno

Co-Orientador: Prof. Abdallah S. Abdallah Abousheisha

Goiânia
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Valle de Lima, Henrique

Alocação de recursos para redes LTE (Long Term Evolution) em
bandas não-licenciadas [manuscrito] / Henrique Valle de Lima. - 2018.
LXV, 65 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Vieira Cardoso; co-orientador Dr.
Elivelton Ferreira Bueno; co-orientador Abdallah S. Abdallah.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto
de Informática (INF), Programa de Pós-Graduação em Ciência da
Computação, Goiânia, 2018.

Bibliografia.

Inclui siglas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. LTE. 2. LTE-U. 3. IEEE 802.11. 4. recurso. 5. alocação. I. Vieira
Cardoso, Kleber, orient. II. Título.

CDU 004



ATA Nº 07/2018

**ATA DA SESSÃO DE JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO
DE MESTRADO DE HENRIQUE VALLE DE LIMA**

Aos vinte e oito dias do mês de setembro de dois mil e dezoito, às catorze horas, na sala 150 do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, Campus Samambaia, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Curso para julgar a dissertação de mestrado intitulada “**Alocação de recursos para redes LTE (Long Term Evolution) em bandas não-licenciadas**”, apresentada pelo aluno Henrique Valle de Lima como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação, área de concentração Ciência da Computação. A banca examinadora foi presidida pelo orientador do trabalho de dissertação, Professor Doutor Kleber Vieira Cardoso (INF/UFG), tendo como membros os Professores Doutores Elivelton Ferreira Bueno (EMA/FGV – coorientador), Abdallah S. Abdallah Abousheisha (ECE/PSU - coorientador), Leizer de Lima Pinto (INF/UFG) e Flávio Henrique Teles Vieira (EMC/UFG). O professor Abdallah S. Abdallah Abousheisha participou à distância por webconferência. Aberta a sessão, o candidato expôs seu trabalho. Em seguida, o aluno foi arguido pelos membros da banca e:

() tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização do tema de sua dissertação, a banca concluiu pela **aprovação** do candidato, sem restrições.

() não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização do tema de sua dissertação, a banca concluiu pela **reprovação** do candidato.

Os trabalhos foram encerrados às 16:10 horas. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-Graduação desta Universidade, lavrou-se a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da banca examinadora.

Prof. Dr. Kleber Vieira Cardoso Kleber Vieira Cardoso
Prof. Dr. Elivelton Ferreira Bueno Elivelton Bueno
Prof. PhD. Abdallah S. Abdallah Abousheisha Abdallah Abdallah Abdallah
Prof. Dr. Leizer de Lima Pinto Leizer
Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira Flávio

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador(a).

Henrique Valle de Lima

Bacharel em Engenharia de Computação pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (2011). Durante a graduação foi bolsista de Iniciação Científica pelo CNPQ, no projeto "Estudos de Segregação Residencial na Região Metropolitana de Goiânia: Cruzamento de Dados da Produção Mobiliária com a Tipologia Sócio-Espacial do Observatório das Metrôpoles". É Pós-Graduado pela Faculdade de Tecnologia Senai de Desenvolvimento Gerencial em Segurança em Redes de Computadores (2015), e também Pós-Graduado pela Faculdade Apogeu em Docência no Ensino Superior (2017). Durante o mestrado participou do Projeto ATER, desenvolvido no grupo de pesquisa LABORA, do Instituto de Informática (INF) da Universidade Federal de Goiás (UFG) em parceria com a Rede Nacional de Pesquisa (RNP).

Dedico esta dissertação a Deus, que me sustenta e me guia todos os dias da minha vida. Aos meus pais, que me amam incondicionalmente. À minha família e aos meus amigos, por todo apoio e carinho que sempre me dedicam.

Agradecimentos

A Deus pela graça da vida e por tudo que me proporciona. Meu centro e meu alvo. Nele encontro minhas forças diárias, e sempre buscarei primeiro o teu reino, assim, todas as demais coisas me serão acrescentadas.

Ao meu pai, Gilson, meu espelho, imagem e exemplo. Palavras nunca serão capazes de descrever todo amor que sinto por você. E a sua esposa Zileide, um presente de Deus para ele e para toda nossa família, verdadeiramente uma grande mulher por trás de um grande homem.

A minha mãe Regimar, por todo seu amor, carinho, orientação e paciência durante toda minha vida. Obrigado pela oportunidade de ser seu filho.

As minhas avós Ivone, Maria e minha Bisa Lia. Meu avô Itamar e meu biso Ovídio, em memória, que me ensinaram grande parte de tudo o que sei, principalmente, a ser amável, respeitoso e gentil. Tudo o que sei sobre dedicar amor ao próximo sem receber nada em troca, aprendi com esses meus grandes exemplos.

Ao meu companheiro, amigo e confidente, Raffael. Obrigado por me entender e todos os momentos difíceis da minha vida, por estar ao meu lado e nunca me abandonar. Obrigado por me incentivar a crescer e por dedicar sua vida a mim.

Aos meus irmãos Andressa, Gilson Júnior e Amanda, por todo seu amor, carinho e apoio.

Ao Prof. Kleber Vieira Cardoso, por sua orientação, amizade, paciência e confiança. Obrigado por me ensinar a ser forte, e persistir em meu objetivo, por mais difíceis que possam parecer.

Ao Prof. Elivelton F. Bueno, por sua orientação, contribuição e confiança.

Ao Prof. Abdallah S. Abdallah, por sua orientação e contribuição.

Aos Profs. Leizer de Lima Pinto e Flávio Teles, por aceitarem o convite, pela presença na banca e contribuições à dissertação.

Aos meus amigos Davidson, Lilian, Armando, Elisvaldo, Marcelo, Christiane, Renata e todos os demais; por todos esses anos de amizade. Vocês me ajudam a ser forte quando preciso, me incentivam, me trazem alegria, oram e profetizam dias melhores e de realizações sobre a minha vida.

Aos meus amigos do Grupo de Pesquisa LABORA: Bruno, Vinicius N., Vinicius B., Marcelo, Geovana, Pablo e todos os demais; pela amizade, apoio e incentivo. Em especial ao Phelipe, que contribuiu de maneira significativa durante todo meu mestrado. Os caminhos da pesquisa se tornaram mais fáceis de trilhar com a sua ajuda.

À equipe da secretaria acadêmica: Mariana, e a Diretora do programa de pós graduação do INF, Professora Telma e todos os demais; pela atenção, paciência e suporte operacional.

Ao INF/UFG, por proporcionar a realização desse passo de crescimento em minha vida.

Agradeço a coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Rede Nacional de Pesquisa (RNP) pelo suporte financeiro.

“O Senhor Deus firma os passos de um homem, quando a conduta deste o agrada; ainda que eu tropece, não cairei, pois o Senhor meu Deus me toma pela mão.”

Salmos, 37:23-24,
<Bíblia Sagrada>.

Resumo

de Lima, Henrique. **Alocação de recursos para redes LTE (Long Term Evolution) em bandas não-licenciadas**. Goiânia, 2018. 65p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

A LTE (Long Term Evolution) em banda não-licenciada (LTE-U) 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 IEEE 802.11. Mas incertezas quanto à disponibilidade dessas bandas tornam a adoção da LTE-U um grande desafio. Nesta dissertação, propomos uma abordagem de programação linear mista, para alocação de recursos a fim de expandir o atendimento por LTE-U. Posteriormente, propomos uma abordagem de programação estocástica, levando em consideração a aleatoriedade da banda não-licenciada, alocando recursos sob um certo controle no risco de conflito com o IEEE 802.11. Usamos três modelos da literatura para a demanda por IEEE 802.11 em nossos testes. Os resultados destacam a importância do conhecimento prévio sobre a distribuição dessa demanda.

Palavras-chave

LTE, LTE-U, IEEE 802.11, redes, redes sem fio, banda não-licenciada, alocação de recursos, programação linear, programação estocástica, otimização.

Abstract

de Lima, Henrique. **Resource allocation in unlicensed bands**. Goiânia, 2018. 65p. MSc. Dissertation. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

LTE (Long Term Evolution) in unlicensed band (LTE-U) has emerged as a promising solution to the problem of the huge growth in mobile data traffic. It extends the benefits of LTE to bands of the unlicensed 5 GHz spectrum which is, mainly used in IEEE 802.11. But uncertainties as the availability of these bands make the adoption of LTE-U a great challenge. In this master's thesis, we propose a mixed linear programming approach for allocating resources in order to expand service by LTE-U. Subsequently, we propose a stochastic programming approach, taking into account the randomness of the unlicensed band, allocating resources under a certain control in the risk of conflict with IEEE 802.11. We used three models from the literature for the demand for IEEE 802.11 in our tests. The results highlight the importance of prior knowledge about the distribution of this demand.

Keywords

LTE, LTE-U, IEEE 802.11, networks, wireless networks, unlicensed band, resource allocation, linear programming, stochastic programming, optimization

Lista de Acrônimos

16-QAM	16 Quadrature Amplitude Modulation
256-QAM	256 Quadrature Amplitude Modulation
64-QAM	64 Quadrature Amplitude Modulation
AC_BE	Access categories best effort
AC_BK	Access categories background
AC_VO	Access categories voice
AC-VI	Access categories video
ACK	Acknowledgment
APs	Access point
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSs	Basestation
CCA	Cooperative Collision Avoidance
CDF	Cumulative distribution function
CDMA	Code Division Multiple Access
cost231	COST Hata model
CSAT	Carrier Sense Adaptive Transmission
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Clear to Send
CW	Contention Window
DC	Duty-cycle
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed Inter Frame Spacing
DwPTS	Downlink Pilot Time Slot
FCC	Federal Communications Commission
FCs	Femtocells
FDM	Frequency Division Multiplexing
GP	Generalized Pareto distribution
HCPP	Hard core point process
IMT	International Mobile Telecommunications
IMT-A	International Mobile Telecommunications - Advanced

IoTs	Internet of Things
ISM	Industrial, scientific and medical radio bands
ISPS	International Ship and Port Facility Security
ITU	International Telecommunication Union
LBT	Listen Before Talk
LN	Lognormal distribution
LTE	Long Term Evolution
LTE-LAA	LTE License Assisted Access
LTE-LWA	LTE-WLAN Aggregation
LTE-U	LTE in unlicensed spectrum
MAC	Medium access control
MCOT	Maximum channel occupancy time
MCs	Macrocells
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
mmWave	Millimeter wave
NAV	Network Allocation Vector
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Multiple Access
PPP	Poisson point process
PRB	Physical resource block
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature phase shift keying
RB	Resource block
RTS	Request to Send
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCs	Small Cells
SIFS	Short Interframe Space
SNIR	Signal-to-interference-plus-noise ratio
TD_SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
TDD	Time division duplex
TXOP	Transmit Opportunity
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot
WB	Weibull Distribution
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WCDMA	Wide-Band Code-Division Multiple Access

Sumário

Lista de Figuras	14
Lista de Tabelas	16
1 Introdução	17
2 Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados	20
2.1 A tecnologia 802.11	20
2.2 A tecnologia LTE	23
2.2.1 LTE e seus componentes	23
2.3 A coexistência entre LTE-U e Wi-Fi	27
2.3.1 LTE-U	27
2.3.2 LTE-LAA	28
2.3.3 LTE-LWA	29
2.3.4 MuLTEfire	29
2.4 Trabalhos Relacionados	30
2.5 Conclusão	32
3 Proposta	33
3.1 Modelo do Sistema	34
3.2 Modelo Estocástico com Chance Constraint	37
3.2.1 Restrição de Invasão de Recurso de Banda Não-Licenciada	39
3.2.2 Disponibilidade de Recurso de Banda Não-Licenciada	39
3.3 Conclusão	39
4 Avaliação	41
4.1 Cenários e experimentos	41
4.2 Modelo para redes 802.11	42
4.2.1 Modelo baseado em Weibull (WB)	42
4.2.2 Modelo baseado em Log-normal (LN)	43
4.2.3 Modelo baseado na Generalizada de Pareto (GP)	43
4.2.4 Configuração do cenário 802.11	45
4.3 Modelo Determinístico	46
4.4 Modelo Estocástico com Chance Constraint	47
4.4.1 Análise da restrição de invasão de recurso de Banda Não-Licenciada	47
Alocação e Satisfação de Usuários	47
Custo da Rede Virtual LTE-U	49
4.4.2 Análise do parâmetro α_k descrevendo a Disponibilidade de Recurso de Banda Não-Licenciada	49

Alocação e Satisfação de Usuários	49
Custo da Rede Virtual LTE-U	52
4.5 Conclusão	52
5 Considerações Finais e Trabalhos Futuros	57
5.0.1 Produções Acadêmicas e Bibliográficas	57
5.0.2 Conclusões e Comentários Gerais	58
Referências Bibliográficas	59

Lista de Figuras

2.1	Representação do DCF em funcionamento com RTS e CTS.	21
2.2	Estrutura física do frame único.	24
2.3	Estrutura física do frame particionado.	24
2.4	Estrutura de um PRB. Adaptado de [28].	25
2.5	Ciclos de DC na comunicação LTE.	28
2.6	Esquema de transmissão em LTE-LAA.	29
3.1	Modelo de Rede LTE e LTE-U em operação conjunta.	34
4.1	CDF da distribuição Weibull com os parâmetros apresentados.	43
4.2	CDF da distribuição Lognormal com os parâmetros apresentados.	44
4.3	CDF da distribuição Generalizada de Pareto com os parâmetros apresentados.	44
4.4	CDF das três distribuições utilizadas para o IEEE 802.11.	45
4.5	CDF normalizada e truncada das três distribuições utilizadas para o IEEE 802.11.	46
4.6	Impacto da variação de C_{max} no modelo determinístico.	48
(a)	Valores da função objetivo.	48
(b)	Número de SCs ativadas.	48
(c)	Número de usuários atendidos.	48
(d)	Total da demanda servida.	48
(e)	Total da demanda mínima servida.	48
(f)	Total da demanda extra servida.	48
4.7	Impacto de α_k no modelo de alocação estocástico.	50
(a)	Valores da função objetivo.	50
(b)	Número de SCs ativadas.	50
(c)	Número de usuários atendidos.	50
(d)	Total da demanda servida.	50
4.8	Resultados para vários valores de α_k no modelo de programação estocástica.	51
(a)	Valores da função objetivo.	51
(b)	Número de SCs ativadas.	51
(c)	Número de usuários atendidos.	51
(d)	Total da demanda servida.	51
4.9	Resultados para vários valores de α_k no modelo de programação estocástica.	54
(a)	Valores da função objetivo.	54
(b)	Número de SCs ativadas.	54
(c)	Número de usuários atendidos.	54

(d)	Percentual de usuários atendidos.	54
(e)	Demanda servida maior que a mínima.	54
(f)	Total da mínima servida.	54
(g)	Total da demanda servida.	54
4.10	Resultados para alguns números de usuários LTE-U para três proporções mínimas de disponibilidade de largura de banda não-licenciada.	55
(a)	Custo total.	55
(b)	Número usuários atendidos.	55
(c)	Total da demanda servida.	55
4.11	Resultados para $\alpha_k = 30\%$, $\alpha_k = 50\%$ e $\alpha_k = 70\%$ no modelo de programação estocástica.	56
(a)	Valores da função objetivo.	56
(b)	Número de SCs ativadas.	56
(c)	Número de usuários atendidos.	56
(d)	Percentual de usuários atendidos.	56
(e)	Demanda servida maior que a mínima.	56
(f)	Total da mínima servida.	56
(g)	Total da demanda servida.	56

Lista de Tabelas

3.1	Dados para o modelo matemático	35
4.1	Valores de entrada utilizados nas simulações	41

Introdução

Nos últimos anos, as redes de comunicação sem fio passaram por grandes avanços. A disseminação global de dispositivos móveis, como *smartphones*, *laptops* e sensores de redes sem fio, juntamente com o surgimento das IOTs (*Internet of Things*) introduziram novos padrões de consumo de recurso de banda. Nas redes de telefonia móvel, por exemplo, a evolução para os sistemas 1G, 2G, 2.5G, 3G e 4G trouxeram consigo novas técnicas de modulações, algoritmos de gerenciamento de recursos, além do aumento do recurso de banda de transmissão [24].

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. [21], 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, responsáveis por 33% do tráfego de IP total no mundo. Essa estimativa de crescimento aplicada às redes atuais resultaria na falta de recurso para servir à demanda de dados gerada pelos usuários [29].

Nessas redes, os dados são transmitidos pelos diferentes dispositivos por meio do uso de várias tecnologias sem fio, como LTE (Long Term Evolution), IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (WPAN - *Wireless Personal Area Network*) e *Bluetooth*. Hoje, a integração entre os tipos de redes disponíveis permite que os usuários executem uma grande variedade de aplicativos onde quer que estejam.

Na busca por soluções para o problema da escassez de recursos para transmissão de dados móveis, pesquisadores têm, entre outras coisas, se concentrado no desenvolvimento de tecnologias para operar em bandas de baixa frequência, como LoRaWAN (*Low Power Wireless Area Network for long range IoT connectivity*) [57] e SIGFOX [48], que podem fornecer transmissões de pequenas quantidades de dados em uma ampla área de cobertura.

Além disso, as forças de trabalho estão concentradas em bandas de alta frequência, como o IEEE 802.11ad (mmWave) [49], usado principalmente para fornecer velocidades de transmissão em torno de vários gigabits em uma região relativamente pequena.

No entanto, mesmo diante de todos os novos esforços, a escassez de recurso de banda licenciada usada pelas operadoras móveis, combinada com o alto custo de aquisição de direitos de transmissão, continua motivando a pesquisa de novas soluções.

Até o momento, a indústria e a comunidade de pesquisa têm apresentado ao menos três propostas alternativas para operar o LTE em bandas não licenciadas, como o *Licensed Spectrum Access (LAA)*, o *MulteFire* e o LTE-U. O último tem como objetivo implantar *small cells (SCs)* para executar uma pilha de protocolos LTE em bandas não-licenciadas em vez de descarregar o tráfego através de uma ampla implantação de pontos de acesso IEEE 802.11. Esse cenário de implantação é preferido pelos operadores de rede, porque a LTE-U cria uma oportunidade de transmissão de dados por um meio de transmissão disponível gratuitamente. Essa alternativa é, portanto, muito mais barata que a LTE convencional, e permite o uso eficiente dos recursos disponíveis, em uma área de cobertura mais ampla para os usuários, com segurança aprimorada, mobilidade contínua e com taxas consistentes em toda a rede. Além disso, a LTE-U simplifica o processo de orquestração entre diferentes tecnologias pelo uso de uma estrutura unificada de design e implementação para novas implantações em bandas licenciadas e não-licenciadas.

Aliado a isso, temos o fato de que a LTE-U 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, o que pode representar uma faixa de recursos potencialmente interessante para operação de LTE em modo secundário [37]. Contudo, a utilização da banda não-licenciada só é permitida por redes que implementem mecanismos capazes de manter a interoperabilidade entre todos os sistemas que utilizem tal faixa. A FCC (*Federal Communications Commission*) determina normatizações específicas de acesso a banda não-licenciada, e.g., densidade espectral de potência máxima, tempo limite de ocupação do canal, processo de validação e certificação de produtos, entre outros [45].

Desse modo, a implantação de LTE em bandas não-licenciadas traz consigo diversos desafios, uma vez que sua operação pode degradar significativamente o desempenho dos sistemas IEEE 802.11. Estudos de Cavalcante et al [14] 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 LTE-U exige a adoção de métodos avançados de otimização.

Nesta dissertação, abordamos o problema da alocação de recursos utilizando programação linear. Considerando a aleatoriedade, referente a disponibilidade, que a banda não-licenciada está sujeita, evoluímos o modelo linear para um modelo estocástico, 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 LTE-U. 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* [16]. Para tornar o modelo proposto computacionalmente viável reformulamos as restrições com *chance constraint* usando o método descrito em [17], que preserva a equivalência prática ao problema original. Com essa reformulação, e com o CPLEX, um software de otimização determinística, resolvemos instâncias de dimensões práticas com experimentos computacionais para diferentes parâmetros de configuração do modelo e dos dados do problema.

O restante desta dissertação está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2, apresentamos os fundamentos envolvidos no desenvolvimento desta dissertação e trabalhos relacionados; no Capítulo 3, descrevemos formalmente o problema de alocação de recursos para redes LTE em banda não-licenciada; no Capítulo 4, apresentamos e discutimos a avaliação de desempenho realizada; no Capítulo 5, apresentamos as considerações finais e as perspectivas de trabalhos futuros.

Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

Neste capítulo apresentamos características de algumas redes móveis, que na proposta do trabalho, devem coexistir, i.e. LTE-U e IEEE 802.11.

2.1 A tecnologia 802.11

A tecnologia IEEE 802.11 (ou Wi-Fi) surgiu como uma promissora opção de mobilidade para as tradicionais, e fixas redes *ethernet* [55]. O acrônimo Wi-Fi significa *wireless fidelity*, e é utilizada por produtos que pertencem a classe de dispositivos de rede locais sem fios (WLAN) que sejam baseados no padrão IEEE 802.11 [23].

O padrão IEEE 802.11 opera, em sua grande maioria, em banda não licenciada, ou seja, o usuário não necessita de autorização de algum órgão fiscalizador para instalar e manter uma rede. No entanto, no Brasil, os fabricantes de APs (*Access Point*) IEEE 802.11 devem homologar seus equipamentos, para garantir que eles trabalhem dentro das medidas de potência e frequência permitidas pela Agência Nacional de Telecomunicações [9].

O IEEE 802.11 opera mais comumente no modo infraestruturado, onde cada usuário que deseje utilizar o serviço, deve se conectar a um AP utilizando uma conexão sem fios [55]. O IEEE 802.11 utiliza um protocolo de acesso ao meio denominado CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), que pode ser visto como uma evolução do protocolo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), utilizando tradicionalmente em redes locais tipo *ethernet* [40].

O protocolo CSMA/CA, por sua vez, utiliza uma função de coordenação denominada DCF (*Distributed Coordination Function*) que faz com que usuários que desejem transmitir, "escutem" o meio por um período de tempo composto por um *timer* fixo denominado DIFS (*DCF Interframe Space*) mais um *timer* aleatório denominado CW (*Contention Window*), antes de iniciar a transmissão. A cada vez que o protocolo identifica transmissões em andamento na banda, ele recua a transmissão por um período aleatório

exponencialmente incrementado de acordo com o número de tentativas. Quando a banda é identificada como disponível, os dados são transmitidos em formas de quadros, que carregam, além das informações, dados que identificam a frequência utilizada e o espaço de tempo alocado à transmissão. No fim da transmissão de cada quadro, o DCF verifica possíveis erros de transmissão por meio de uma mensagem de confirmação (ACK), que é transmitida pelo receptor, depois de um intervalo de tempo denominado SIFS (*Short Interframe Space*), indicando a recepção correta do quadro [8].

Este processo de verificação pode incorrer em falhas, devido a um problema clássico existente na transmissão de dados utilizando a tecnologia IEEE 802.11, conhecido como nó oculto. O problema do nó oculto ocorre quando um usuário é visível, em termos de sinal, a um AP, mas não pode ser visto por outros usuários que por ventura se comuniquem, ao mesmo tempo, com o mesmo AP. Ao tentar acessar o canal, o procedimento de CCA (*Cooperative Collision Avoidance*) será liberado para todos os usuários que não se "escutam" entre si, podendo causar colisões entre as transmissões [8].

Visando tratar esse problema, o IEEE 802.11 definiu um mecanismo adicional que utiliza dois sinais de controle: RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) [47]. Após aguardar, e ter recuado por mais de uma vez, para iniciar uma transmissão, o emissor transmite um RTS, que inclui o destinatário e uma estimativa de tempo de utilização do canal. A estimativa inclui o tempo necessário para transmitir o quadro de dados, mais o tempo de retorno do sinal ACK enviado pelo receptor. Todo AP que recebe um RTS deve inserir em seu NAV (*Network Allocation Vector*) uma janela de tempo de acordo com a estimativa solicitada no RTS. O AP informada a todos os usuários dentro do raio de cobertura a janela de tempo alocada, e então, o emissor poderá enviar a mensagem após receber o SIFS do AP. Quando a transmissão for concluída, e o NAV de todos os APs indicarem que o meio de transmissão não é mais utilizado, o ciclo pode então recomeçar [35]. A Figura 2.1 representa esse esquema de funcionamento.

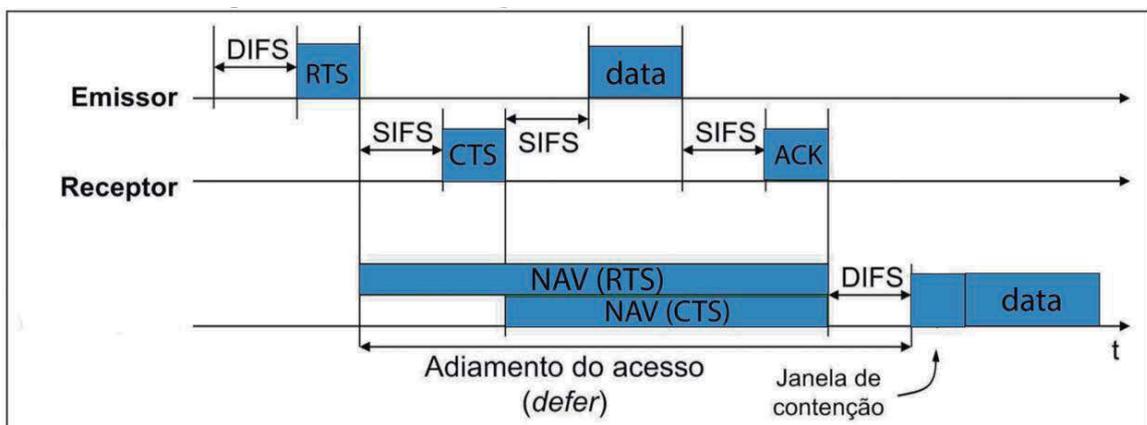


Figura 2.1: Representação do DCF em funcionamento com RTS e CTS.

O padrão IEEE 802.11 teve mais um avanço no ano de 2005, especificando um novo modelo de acesso ao meio, capaz de implementar estratégias de QoS (*Quality of Service*). O IEEE 802.11e passou a definir novas categorias de tráfego de dados: AC_BK (*Background*), AC_BE (*Best Effort*), AC_VI (*Video*) e AC_VO (*Voice*) [44]. Foram necessárias alterações no CCA para inserir o suporte a QoS. O valor máximo de CW passou a ser definido de acordo com a aplicação em questão, priorizando, estatisticamente, as transmissões de aplicações mais críticas. No novo padrão, também foi introduzido um tempo em que cada usuário pode enviar quadros após ganhar acesso ao canal, denominado TXOP (*Transmission Opportunity*). Por meio do TXOP, um usuário poderá transmitir mais de um quadro quando obtiver acesso ao canal [20].

O processo de evolução continuou, e em 2009 o IEEE apresentou o novo padrão, IEEE 802.11n. Os avanços incluíram aumentos nas taxas de transmissão, que passaram a estar na ordem de 600 Mbps. Isto foi possível graças a algumas melhorias na camada MAC, e.g., agregação de pacotes pequenos para diminuição do *overhead*, e a confirmação de recebimento passou a ser enviada para múltiplos pacotes, ao invés do tradicional envio pacote a pacote. Houver ainda melhorias na camada física, e.g., expansão dos canais para 40 MHz por meio da junção de dois canais de 20 MHz, redução do intervalo de guarda de 800 ns para 400 ns e a implementação do MIMO 4X4 [64].

Os padrões continuaram a evoluir, passando por IEEE 802.11ac [54] e evoluindo para o IEEE 802.11ad [53], onde as velocidades iam de 1.3 Gbps a 7 Gbps. O aumento significativo da velocidade de transmissão se deve a algumas alterações importantes na tecnologia, e.g, inserção do MIMO 8x8 com antenas *beam forming* que possibilitaram o atendimento a múltiplos usuários, considerando a diversidade espacial. A comunicação passou a ser altamente diretiva, permitindo que múltiplos usuários operem lado a lado com mínimos efeitos de interferência. Outro ponto importante foi a inserção de novas bandas de transmissão. O padrão 802.11ac pode operar na banda de 5 GHz, utilizando canais de 20, 40, 80 e 160 MHz, quatro vezes maior que o 802.11n [50]. O padrão 802.11ad introduz mais uma possibilidade de funcionamento, utilizando canais de ISM de 60 GHz, com larguras de banda que podem chegar a 2160 MHz. Por fim, foram adotados ainda a utilização de técnicas de modulação mais robustas, como o 256-QAM, que consegue entregar uma eficiência espectral quatro vezes maior quando comparado às técnicas utilizadas no 802.11n [52] [19].

Por fim, algumas pesquisas, como em [3], [25] e [36], apontam uma expectativa de um novo padrão, denominado IEEE 802.11ax, que tem a promessa de aumentar, em quatro vezes, a taxa média de transmissão de dados de usuários centrados em ambientes altamente densos. O novo padrão ainda deve apresentar um fluxo de dados consistente e confiável, mesmo em ambientes adversos. O conjunto de melhorias aplicadas ao padrão 802.11 ao longo dos anos objetiva sempre prover a melhor utilização dos recursos dispo-

níveis em serviço ao usuário, contudo, nenhuma norma ou especificação já estabelecida garante que não existirão interferências entre redes IEEE 802.11, ou até mesmo entre redes heterogêneas que utilizem a banda não licenciada, e.g., IEEE 802.11 e LTE-U.

2.2 A tecnologia LTE

A tecnologia *Long Term Evolution* (LTE) surgiu da necessidade de garantia de competitividade das redes móveis, a partir de uma evolução das redes anteriores (e.g. 1G, 2G, 2,5G e 3G) [24]. A ITU (*International Telecommunication Union*), órgão regulador global do setor de telecomunicações, define a família de tecnologias a ser utilizada em cada parte do espectro, considerando as potenciais interferências entre elas [22]. Para tecnologias móveis, o IMT (*International Mobile Telecommunications*) compreende as definições e normas desde a terceira geração de redes móveis (3G) [10]. A quarta geração de redes (4G), ou LTE, desenvolveu avanços consideráveis em relação a sua predecessora, permitindo atingir os níveis de eficiência espectral requeridos pelo *IMT-Advanced* [42]. Com a utilização de técnicas como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexed*) e MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) é possível garantir baixa latência ao utilizador e aumentar a capacidade de dados em cada célula, garantindo uma qualidade de serviço superior em relação às gerações de redes anteriores [26].

2.2.1 LTE e seus componentes

Tipicamente, transmissões em LTE são organizadas em sequências de *frames*, ou quadros, medidos por tamanho, através do tempo que marcam o início e fim de um lote de transmissão. O conjunto de *frames*, que orquestram transmissões do tipo *downlink* e *uplink*, são chamados de *radio frame*, compostos por uma duração temporal total de 10 ms. As transmissões são compostas basicamente por dois tipos: *frame* único e *frame* particionado [60].

Em transmissões de dados que se utilizam do *frame* único, os *radio frames* atendem a comunicações do tipo *full duplex* e *half duplex*, ou FDD (*Frequency Division Duplex*), sendo composto por 20 *timeslots*, com duração de 0,5 ms cada. Além disso, podemos definir como *subframe* um conjunto de dois *timeslots* consecutivos, que juntos, totalizam uma duração total de 1 ms. Transmissões de dados que utilizam o *frame* particionado por sua vez, são aplicáveis a TDD (*Time Division Duplexing*). Nesse caso, cada *radio frame* pode dividir-se em duas *half-frames*, com duração temporal de 5 ms, e ainda, em 5 *subframes* de 1 ms cada. A comutação entre os modos *uplink* e *downlink* pode ser então realizada com uma periodicidade de 5 ou 10 ms, dependendo da configuração utilizada. No *frame* particionado existem ainda *subframes* especiais com campos de

DwPTS (*Downlink Pilot Time Slots*), GP (*Guard Period*) e UpPTS (*Uplink Pilot Time Slot*) que facilitam a implementação do TD-SCDMA (*Time Division Synchronous CDMA*) [60]. As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam uma representação dos *frames* único e particionado, respectivamente.

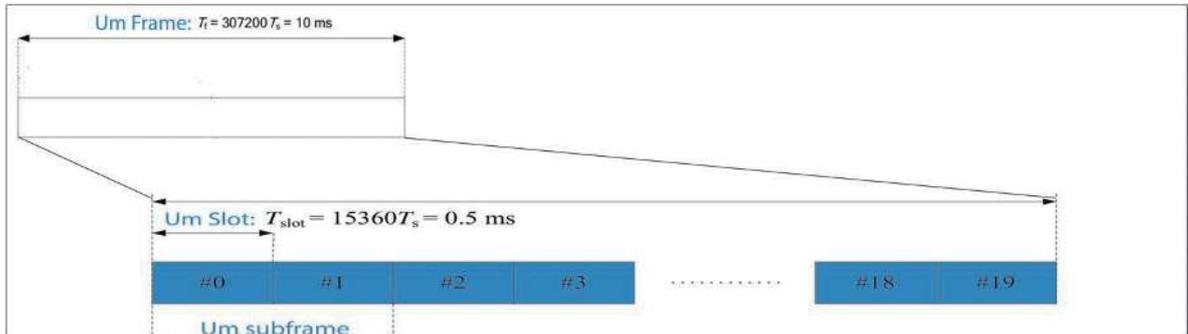


Figura 2.2: Estrutura física do frame único.

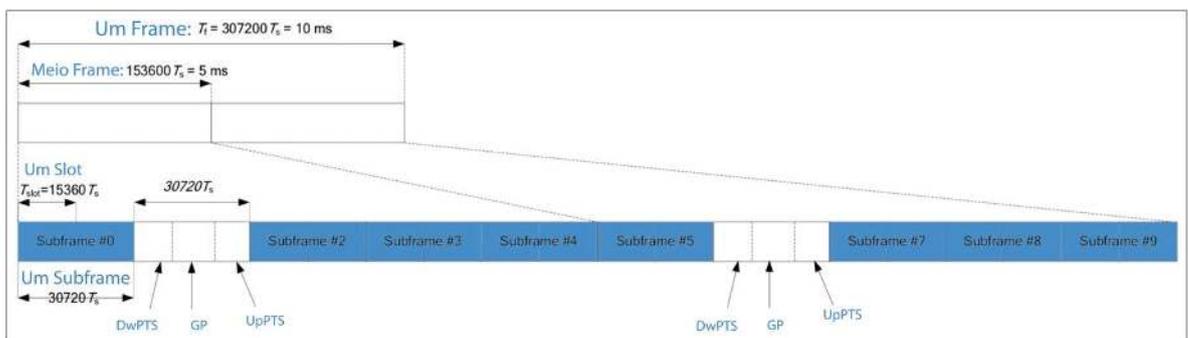


Figura 2.3: Estrutura física do frame particionado.

Em LTE, um bloco de recurso físico, ou *physical resource block (PRB)*, é composto pelo número de símbolos OFDM, juntamente com o número de subportadoras presentes no domínio da frequência. Nesse modelo, o tempo é limitado pela extensão cíclica e pelo espaço alocado entre as portadoras, já o número de subportadoras depende diretamente da largura de banda alocada para a transmissão. Dessa maneira, o modo de configuração do sistema implicará diretamente na quantidade final de dados que poderão ser entregues aos usuários [28].

Cada bloco de recurso em uma transmissão é composto por uma subportadora e por um símbolo OFDM, denominado elemento de recurso, e é identificado por seus índices no domínio da frequência (k) e no tempo (i) [28]. A figura 2.4 apresenta uma representação desse comportamento. Em LTE, largura de banda é vista como o número de PRBs disponíveis para transmissão de dados. Por exemplo, um canal com 1,4 MHz de largura de banda terá uma capacidade de transmissão de 6 PRBs em cada slot de tempo. Já um canal com 20 MHz de largura transmitirá 100 PRBs por slot de tempo; e assim por diante [65].

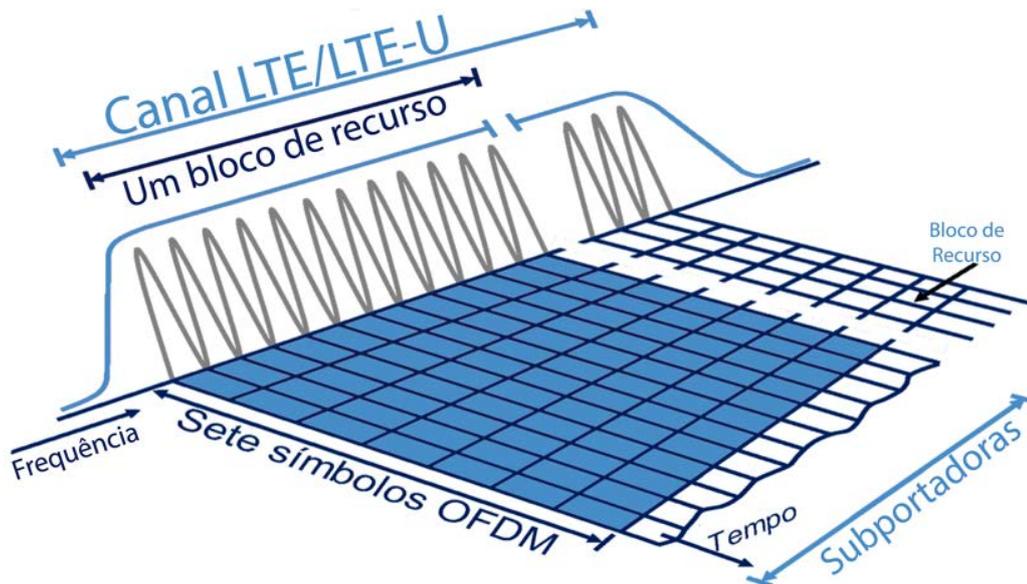


Figura 2.4: Estrutura de um PRB. Adaptado de [28].

Os órgãos reguladores da utilização da banda licenciada [46] definem as potências máximas de transmissão que uma operadora de telefonia móvel poderá utilizar. Em equipamentos móveis, a potência máxima permitida é de 23 dBm e para equipamentos fixos (e.g., Base Stations (BSs), Small Cells (SCs)) é de 46 dBm [27].

A vazão efetiva de dados dependerá portanto da largura de banda utilizada, das potências máximas aplicadas ao canal, do espaço temporal da transmissão, além do tipo de modulação aplicada ao sinal. Algumas modulações típicas de sinais LTE são QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16 QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*), 64 QAM (*64 Quadrature Amplitude Modulation*) e BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Modulações que utilizam mais símbolos por transmissão são capazes de enviar mais informações, o que não necessariamente implica em maior robustez, uma vez que podem resultar em uma relação ruído/interferência (*Signal to Interference to Noise Ratio - SNIR*) cada vez menor [27].

No processo de padronização da tecnologia LTE, algumas técnicas de acesso múltiplo para *downlink* de dados foram propostas, e.g., OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) e WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) [28]. Adotada como técnica padrão de acesso múltiplo, o OFDM mantém uma ortogonalidade das subportadoras quando variamos a banda em que está inserido. Serão necessários apenas algumas compensações de amplitudes e de desvio de fase para adaptação, o que faz com que o OFDMA permita a utilização de diferentes larguras de banda simultaneamente em um mesmo sistema [11].

O OFDMA apresenta ainda um espaçamento menor entre as subportadoras quando comparado por exemplo com FDM. A redução do espaçamento resulta em uma ocupação menor de banda e, conseqüentemente, aumenta a eficiência espectral

durante a transmissão. A utilização de uma técnica de acesso múltiplo permite ainda o escalonamento da transmissão no domínio da frequência, elemento dispendioso de ser realizado com o CDMA, por exemplo, onde todos os sinais estão distribuídos ao longo de toda a largura de banda. Dessa maneira, a técnica de escalonamento no domínio da frequência possibilita uma alocação de recursos a diversos utilizadores em concordância com a condição de transmissão de cada canal, aumentando a capacidade de transmissão da célula e reduzindo a probabilidade de retransmissão de dados devido a colisões [11].

O processo de *uplink* dados em LTE utiliza, por sua vez, SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*) para acesso a banda, que é uma tecnologia semelhante ao OFDMA, mas que utiliza somente uma portadora, com extensão cíclica para transmissão de dados [31].

Uma das tecnologias que agregaram grande valor ao LTE é o MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Essa tecnologia permite multiplexar a informação com a utilização de duas ou mais antenas. Em cada uma das antenas são enviados dados distintos e, ao mesmo tempo, serão desmultiplexados na receptora, aumentando consideravelmente a capacidade de transmissão de dados [60]. Atualmente, existem sete modos de transmissão multiplexada utilizando MIMO definidas pela 3GPP com objetivos diferentes, e.g., efetuar transmissão de dados por uma antena e receber por uma ou mais antenas, ou transmitir informações redundantes, para melhoria da qualidade da conexão, ou ainda aumentam a capacidade de transmissão de uma célula, enviando informações completamente distintas entre diferentes antenas no mesmo espaço de tempo [51].

O MIMO pode possibilitar uma grande diversidade na maneira com que se utiliza a banda de transmissão de dados [60]. Em condições adversas, a tecnologia pode melhorar a qualidade da ligação entre os rádios por meio do ganho obtido pela recepção redundante do sinal. A pré-codificação aplicada no canal considera as condições da banda, e visa contrair o efeito da interferência durante a transmissão, monitorando constantemente o sinal em busca da maximização da SINR no receptor. Essa estratégia de maximização da qualidade do sinal durante a transmissão é eficaz em meio sem competição por recurso. Quando existem mais utilizadores, que geram competição pela banda, um algoritmo de decisões que priorizará qual ou quais conexões terão o desempenho maximizado será aplicado [34].

O LTE é composto por canais de transporte partilhados, que se tornam responsáveis por realizar a interface entre a camada MAC (*Medium Access Control*) e a camada física. A camada física necessitará alocar recursos para diferentes utilizadores de banda e, também, para variações de retransmissão de dados [30].

2.3 A coexistência entre LTE-U e Wi-Fi

Como discutido na seção 2.1, o ISM é considerado uma banda não-licenciada, que está disponível para livre utilização. Contudo, existem normas regulatórias que gerenciam a utilização desse recurso. Uma das premissas, para todos os dispositivos que utilizam a banda não-licenciada para transmissões é que a tecnologia que utiliza o meio não deve gerar perturbações às demais, tanto quanto as perturbações geradas por uma tecnologia semelhante, que já se utiliza da banda não-licenciada. Por outro lado, a LTE foi concebida para operar em banda licenciada, sem a exigência de mecanismos de acesso ao meio como o CCA do IEEE 802.11[56].

Dessa maneira, como demonstrado em [14], operar LTE da maneira como foi concebida em uma banda onde se compete por recursos degradaria fortemente qualquer tipo de comunicação do IEEE 802.11. Visando resolver esse problema, diversas instituições de pesquisa propuseram soluções visando modificações no tipo de acesso ao meio utilizado pela LTE. As propostas visavam preservar um desempenho considerável na transmissão de dados LTE e, ao mesmo tempo, possibilitar a coexistência entre as tecnologias heterogêneas. Nesta Seção apresentaremos algumas das soluções propostas.

2.3.1 LTE-U

Em 2013, a Qualcomm apresentou a proposta de um novo padrão de comunicação em banda não-licenciada utilizando redes LTE, denominado LTE-U. A proposta inicial era prover maior vazão de dados aos usuários de redes móveis sem fio, ampliando a cobertura das redes, aliada a um baixo custo de implementação [26]. Visto o grande potencial apresentado pela tecnologia, o 3GPP deu início no processo de padronização, e nos dias atuais, podemos encontrar produtos comerciais da Qualcomm, Verizon e T-Mobile que utilizam esse tipo de tecnologia [66].

O LTE-U opera definindo ciclos de duração (*duty-cycle* - DC) de transmissão, ocupando o canal por um certo período de tempo, e silenciamento, liberando o recurso para outras tecnologias, possibilitando, assim, a coexistência entre LTE e as demais, i.e., IEEE 802.11[58]. A Figura 2.5 apresenta uma representação desse comportamento. Algumas propostas mais avançadas sugerem novas maneiras de ampliar o desempenho da tecnologia, e.g, [6]. Na publicação os autores propõem a utilização de um algoritmo, denominado CSAT (*Carrier Sense Adaptive Transmission*), que realiza alterações adaptativas do DC com base em medições de potência realizadas no canal de transmissão. Em períodos de baixa utilização e competição por recurso, a duração de DC pode ser aumentada, ampliando o desempenho da tecnologia. O inverso ocorre quando são identificadas altas taxas de competição pelo recurso, reduzindo o período de duração de DC [58].

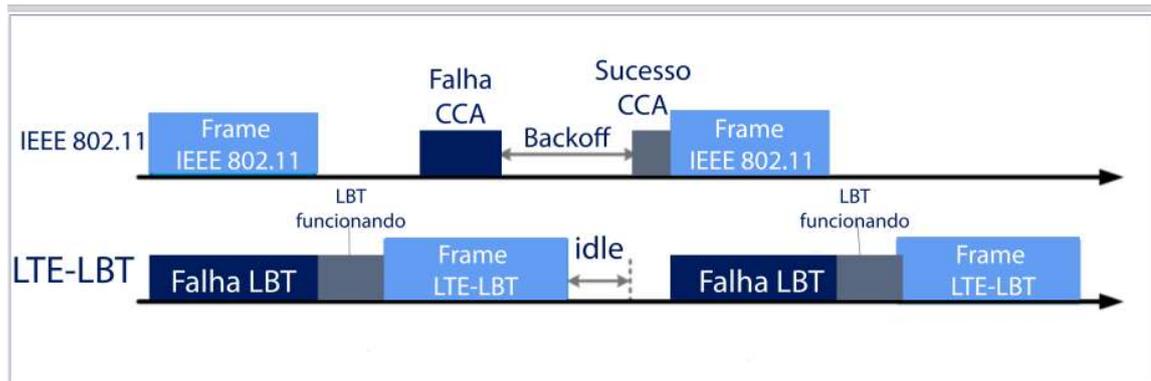


Figura 2.6: Esquema de transmissão em LTE-LAA.

2.3.3 LTE-LWA

O LTE-LWA (*LTE-WLAN Aggregation*) surgiu como uma proposta cooperativa e, ao mesmo tempo, mais agressiva comercialmente ao IEEE 802.11. Essa solução busca a utilização coordenada e simultânea da banda não-licenciada tanto por LTE, quanto por IEEE 802.11, para complementar, exclusivamente, a capacidade de *downlink* das aplicações. Nesse modelo, o controle e o gerenciamento de todos os recursos de ambas as redes (LTE e IEEE 802.11) são feitos exclusivamente pelos controladores LTE [59]. A proposta do LTE-LWA é criar um *link aggregation* LTE/IEEE 802.11, objetivando a criação de um aumento na capacidade de transmissão da rede licenciada. Dados com volumes maiores, e de baixa criticidade, serão descarregados a partir da rede IEEE 802.11, onde não existe garantia da disponibilidade de banda, e o tráfego de aplicações críticas é realizado pela rede LTE, que apresenta garantia da disponibilidade de recurso, [66].

Neste modo de funcionamento, como o gerenciamento dos recursos de ambas as tecnologias é centrado em um único gerenciador, assume-se que não exista degradação entre as tecnologias, dispensando a necessidade de coordenação entre LTE e IEEE 802.11 [66]. O padrão 802.11 tem apresentado ainda disposição para aprimoração do IEEE 802.11 como um componente de funcionalidade dentro do sistema 3GPP, apresentando o *enhanced LWA*. Essa evolução poderia proporcionar uma agregação mais harmônica entre o LWA e o IEEE 802.11, expandindo os benefícios recebidos pelas tecnologias envolvidas [13].

2.3.4 MuLTEfire

Proposto pela Qualcomm em 2017, essa tecnologia diferencia-se das demais, pois utiliza unicamente a banda não-licenciada para transmissão de dados [4]. Por não possuir ponto de ancoragem na banda licenciada, o MuLTEfire pode ser considerado uma das tecnologias, em termos comerciais, mais agressivas ao IEEE 802.11. A tecnologia funciona com um roteador comercial, que transmite dados utilizando os padrões e proto-

colos LTE, podendo se conectar diretamente a usuários, ou até mesmo a ISPs (*Internet Service Provider*) convencionais [15]. A grande proposta para a indústria é que as operadoras possam implantar e/ou estender os sinais de suas redes móveis sem fio, em ambientes *indoor*, com alta densidade de utilizadores. O conceito de utilização de SC *small cells* está altamente ligado a essa tecnologia, atendendo pequenas áreas, utilizando um recurso disponível. Segundo os fabricantes, esse tipo de utilização apresenta benefícios consideráveis no envio e recebimento de dados móveis, tanto em empresas locais, quanto em companhias fornecedoras de ISP. Até mesmo o usuário final pode ser impactado, pois receberá uma melhor qualidade de serviço [4].

Em resumo, cada uma das tecnologias citadas nessa Seção contam com grandes vantagens de utilização e também desafios de implantação. Na LTE-U, assim como com o IEEE 802.11, por trabalhar em uma banda sem regulamentação e de livre acesso, não existirão garantias de que sejam mitigadas as perturbações entre as tecnologias heterogêneas, mas a indústria de pesquisa continuará trabalhando para evolução dos padrões adotados, em busca da melhor utilização dos recursos disponíveis [13].

2.4 Trabalhos Relacionados

Com o inevitável crescimento no número de assinantes de serviços de telefonia celular, a demanda por mais largura de banda aumenta continuamente em locais geográficos com alta densidade populacional, como centros urbanos ou locais de grandes eventos (por exemplo, Copa do Mundo, Olimpíadas de Verão e Inverno). O resultado dessa superlotação é uma negação parcial ou total do serviço para os usuários, até que recursos adicionais suficientes sejam disponibilizados ou até que a demanda fique abaixo do nível máximo atingível [51]. Como o LTE-U é proposto para abordar tais cenários, uma alocação ótima (distribuição) de recursos é necessária para maximizar a disponibilidade do serviço. Nesta seção, destacamos algumas propostas relevantes que abordam a alocação de recursos para LTE-U.

Encontramos na literatura vários trabalhos que investigam os ganhos, e também os desafios da operação LTE em banda não licenciada. Em [12], os autores destacam alguns benefícios, como o acesso a largura de banda adicional e, portanto, maior capacidade de transmissão de dados; e gerenciamento de rede eficaz, que pode ser unificado usando LTE em bandas licenciadas e não-licenciadas, acelerando o processo de autenticação, transferência de dados e alocação de recursos. Os autores também destacam o comportamento agressivo da tecnologia sobre as demais, especialmente no IEEE 802.11, que, devido às suas características operacionais, posterga a transmissão de dados enquanto identifica as transmissões em andamento no canal. Por fim, eles discutem técnicas de coexistência adaptadas às necessidades de regiões geográficas específicas. Outros exemplos

de trabalho que visam garantir a coexistência justa entre a tecnologia LTE-U e IEEE 802.11 estão disponíveis em [11, 58, 39].

Em [1] os autores discutem a disponibilidade estocástica de canais em bandas não licenciadas e como otimizar o uso de canais disponíveis usando otimização estocástica. Eles propõem uma rede heterogênea multicelular composta de vários nós LTE-U e IEEE 802.11. Isso resulta em um esquema de alocação em redes estocásticas e heterogêneas. Os resultados mostram que a rede LTE-U atende a todos os requisitos do usuário apenas quando não há concorrência para a banda não-licenciada. À medida que o número de dispositivos que usam o mesmo canal aumenta, o número de usuários satisfeitos diminui consideravelmente. Os autores em [1] visam garantir probabilisticamente que os usuários tenham suas demandas atendidas.

Em [33], os autores tentam otimizar o uso de recursos disponíveis para o operador com o uso de redes hiper-densas. Eles apresentam duas abordagens: a implementação maciça de antenas LTE de longo alcance e, também, a densificação de SCs LTE. O objetivo é aumentar a área de cobertura e, ao mesmo tempo, fornecer melhor uso do recurso disponível. As principais contribuições incluem a mitigação de interferência entre torres, fornecimento de redes inteligentes que são capazes de auto-gerenciamento, e algumas técnicas de gerenciamento de mobilidade. Os autores introduzem técnicas complementares que, combinadas com redes hiper-densas, produzem uma rede mais eficiente com mais fluxo de dados. No entanto, a análise é realizada considerando-se apenas a faixa licenciada para o operador. Em nosso trabalho, não restringimos o uso alternativo da banda licenciada, em conjunto com a banda não-licenciada.

Até onde sabemos, estudos disponíveis na literatura que visam otimizar o uso de banda não-licenciada através da localização geográfica de transmissores LTE-U lida apenas com decisões para ambientes internos e para transmissores de alcance de baixo raio, i.g., *femto cells* - FCs. Em um trabalho recente, os autores em [5] combinaram modelos lineares e não-lineares de programação inteira mista para otimizar o processo de posicionamento das FCs LTE a fim de aumentar as taxas de dados internas usando SINR mínimo em bandas licenciadas e não-licenciadas, para cada sub-região dentro de um edifício. Eles descobriram que o número necessário de FCs é sempre igual ou maior que o número de APs instalados. Pelo menos uma célula Femto é necessária para cada AP IEEE 802.11 por sub-região. Neste trabalho, não fazemos suposições que limitem nosso modelo proposto a cenários de instalações internas.

Na seção seguinte, propomos uma formulação para alocação de recursos em banda não-licenciada como uma ferramenta de otimização para escolha entre possíveis locais de ativação de SCs para provisão de banda para usuários LTE. Consideramos a demanda de usuários móveis, os custos de instalação das torres e a quantidade de banda não-licenciada que está sendo tomada pelo IEEE 802.11.

2.5 Conclusão

Apresentamos neste capítulo os principais fundamentos envolvidos com o tema desta dissertação. Descrevemos uma visão geral dos principais conceitos e fundamentos sobre a tecnologia LTE. Discutimos as principais abordagens, envolvendo técnicas de coexistência entre o IEEE 802.11 e LTE-U, que influenciam diretamente a vazão de dados na banda não-licenciada.

No próximo capítulo, apresentamos o modelo de rede e a formulação do problema de alocação de recursos em banda não-licenciada. Apresentamos também, a proposta desenvolvida para resolver o problema com o uso de modelos estocásticos.

Proposta

Neste capítulo, formulamos modelos originais para um problema, de atendimento de usuários em banda não-licenciada. Consideramos um cenário onde uma BS (*base station*) recebe demandas de dados maiores que sua capacidade de atendimento em uma região espacialmente coberta por sinal LTE. Os usuários presentes no modelo são considerados atendidos apenas se eles receberem o número mínimo, pré-determinado, de PRBs para transmissão de dados da aplicação, considerando atrasos, atenuação e perdas. Consideramos três tipos de demanda de usuários LTE: (1) elástica, onde usuários podem ser atendidos com qualquer quantidade de PRBs entre a demanda solicitada e a demanda mínima aceitável; (2) demanda não-elástica, onde o usuário pode ser atendido somente pelo número de PRBs solicitados; e (3) demanda mista, onde um grupo aleatório de usuários tem demanda elástica e o outro grupo tem demanda não-elástica.

Com o objetivo de maximizar o número de usuários atendidos em uma dada região, consideramos ainda possíveis pontos de implantação de SCs (*small cells*) que utilizam tecnologia LTE-U. Essas SCs recebem os mesmos tipos de demanda que uma BS recebe, e poderão prover dados móveis aos usuários não-atendidos nessa região ou prover maior vazão de dados para usuários já atendidos, como por exemplo, usuários de demanda elástica atendidos pela BS somente com a demanda mínima de dados. Consideramos ainda que, para cada PRB servido a um usuário, a operadora receba um valor de retorno que, no modelo, pode ser visto como valor monetário, índice de satisfação ou até mesmo como um indicador de fidelização do usuário junto a operadora.

Inicialmente, apresentamos um modelo determinístico de alocação de recursos, considerando a presença de pontos de acesso IEEE 802.11 que consomem uma dada quantidade de recurso da banda não-licenciada. Nosso objetivo principal é decidir onde ativar SCs que operem a tecnologia LTE-U de forma a maximizar o valor de retorno total pelos usuários atendidos. A fim de inserirmos o fator aleatório de disponibilidade ao qual a banda não-licenciada está sujeita, reformulamos o problema determinístico como um problema estocástico. Utilizamos uma abordagem baseada em *chance constraint* [16], considerando a disponibilidade incerta do recurso, de forma a manter uma certa garantia probabilística de viabilidade da solução.

3.1 Modelo do Sistema

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, o qual é proporcional à capacidade efetivamente ofertada. 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 capacidade de banda de transmissão (via U-LTE). Além disso, seja c'' o orçamento total disponibilizado para as possíveis ativações de SCs. A Figura 3.1 apresenta uma representação desse cenário.

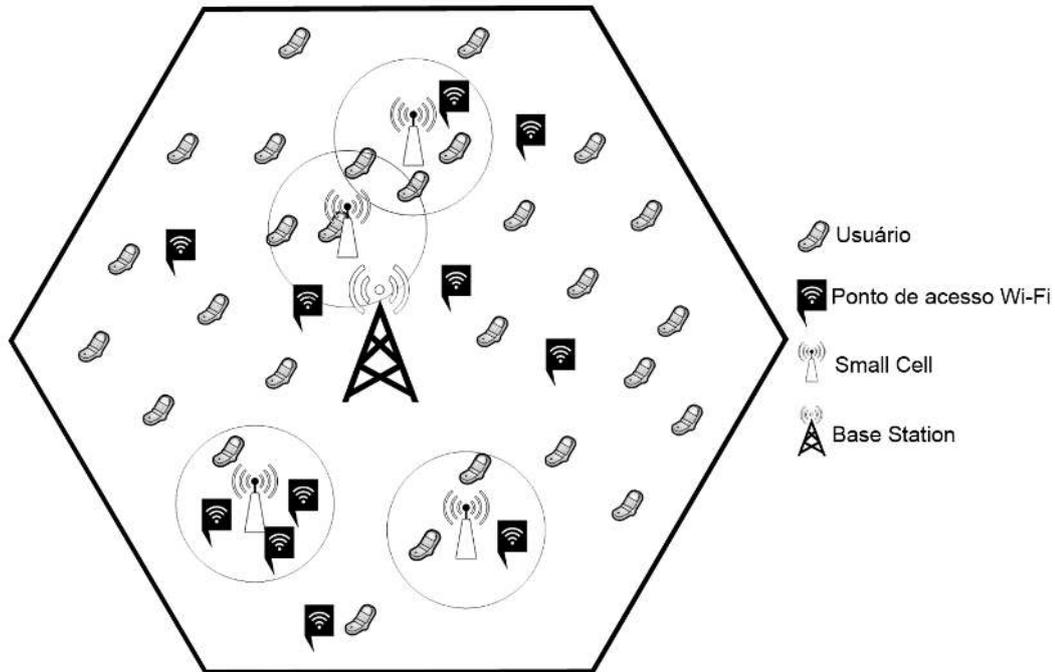


Figura 3.1: Modelo de Rede LTE e LTE-U em operação conjunta.

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 atenuação de sinal que ocorre em função da distância entre um usuário e a BS e/ou a SC que eventualmente o atenda. Mais especificamente, denotamos por $\tau'_{i,j}$ o fator dessa atenuação entre o usuário $i \in I$ e a BS $j \in J_i$; e por $\tau''_{i,k}$ o fator de atenuação entre o usuário $i \in I$ e a SC $k \in K_i$.

Tabela 3.1: 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	Uma realização para a capacidade da SC $k \in K_i$.

A Tabela 3.1 apresenta os dados de entrada do modelo determinístico proposto. Definimos, para todo usuário $i \in I$, BS $j \in J_i$, e SC $k \in K_i$, as seguintes variáveis de decisão:

- $x'_{i,j} \in \mathbb{Z}$, a quantidade de PRBs servidos pela BS j ao usuário i ;
- $x''_{i,k} \in \mathbb{Z}$, a quantidade de PRBs servidos 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 3.1, propomos então, em (3-1) - (3-14), um modelo de programação linear inteira para o problema de alocação de recursos em banda não-licenciada.

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i \in I} v_i \left(d_i z_i - \sum_{j \in J_i} x'_{i,j} - \sum_{k \in K_i} x''_{i,k} \right) + \sum_{k \in K} c_k y''_k \quad (3-1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J_i} \tau'_{i,j} x'_{i,j} + \sum_{k \in K_i} \tau''_{i,k} x''_{i,k} + d_i z_i \geq \underline{d}_i, \quad \forall i \in I \quad (3-2)$$

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

$$\sum_{i \in I'_j} x'_{i,j} \leq b'_j, \quad \forall j \in J \quad (3-4)$$

$$\sum_{i \in I''_k} x''_{i,k} \leq y''_k \xi_k, \quad \forall k \in K \quad (3-5)$$

$$\sum_{k \in K} c_k y''_k \leq c'' \quad (3-6)$$

$$\sum_{j \in J_i} y'_{i,j} + z_i \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (3-7)$$

$$\tau'_{i,j} x'_{i,j} - d_i y'_{i,j} \leq 0, \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (3-8)$$

$$\tau''_{i,k} x''_{i,k} - d_i y''_k \leq 0, \quad \forall i \in I, k \in K_i \quad (3-9)$$

$$x'_{i,j} \geq 0, x'_{i,j} \in \mathbb{Z}, \quad \forall i \in I, j \in J'_i \quad (3-10)$$

$$x''_{i,k} \geq 0, x''_{i,k} \in \mathbb{Z}, \quad \forall i \in I, k \in K_i \quad (3-11)$$

$$y'_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (3-12)$$

$$y''_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K \quad (3-13)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I. \quad (3-14)$$

A função objetivo (3-1) é composta por três partes principais: a primeira penaliza a operadora (em $v_i d_i$) pelo eventual não-atendimento, de pelo menos a demanda mínima, a um usuário (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 (3-2) impõem a quantidade mínima (\underline{d}_i) de banda servida ao usuário (i) para que seja considerado atendido. Em (3-3), limitamos a quantidade máxima (\bar{d}_i) de banda servida a esse usuário, que corresponde à solicitação do usuário. Tanto em (3-2) quanto em (3-3) consideramos o efeito de atenuação do sinal devido à distância entre BS ou SC e usuários. As restrições (3-4) limitam a quantidade de banda servida a no máximo a capacidade da BS (b'_j). As restrições em (3-5) limitam a quantidade de banda servida a usuários U-LTE a no máximo a banda disponível (ξ_k). A restrição em (3-6) limita o custo máximo de investimento para ativação de SCs. As restrições em (3-7) limitam o atendimento de um usuário a no máximo uma BS. Em (3-8), estabelecemos a relação lógica entre o eventual atendimento ao usuário (i) pela BS (j) e o indicador (y'_{ij}) correspondente. As restrições em (3-9) impõem que somente SCs ativas possam servir usuários. Em (3-10) e (3-11), garantimos a integralidade e não-negatividade das variáveis

de decisão, servindo ao usuário demandas não-negativas e inteiras. Por fim, em (3-12), (3-13) e (3-14), estabelecemos as variáveis binárias de decisão.

É NP-Completo o problema (3-1)-(3-14) em sua versão como problema de decisão: determinar se existe uma solução viável para a qual o valor da função objetivo, (3-1), é menor que um dado valor constante arbitrário. Contudo, podemos fazer uma redução do problema das múltiplas mochilas com variáveis binárias [43], que consiste na minimização da soma de um valor $p_i x_{ij}$ 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 (3-1)-(3-14) por $w_i x_{ij}$ e fixando-se $d_i = \underline{d}_i = w_i$, $\tau'_{i,j} = \tau''_{i,k} = 1$, $\xi_k = 0$, $b'_j = W_j$, $c_k = 0$ e $v_i = p_i/w_i$. Além disso, o problema de decisão está na classe P, pois dada uma solução, sua viabilidade e seu valor correspondente podem, naturalmente, ser verificados em tempo polinomial.

Na seção 4.1 discutimos a avaliação de desempenho realizada no CPLEX para o modelo de sistema apresentado.

3.2 Modelo Estocástico com Chance Constraint

A formulação determinística para o problema de alocação de recursos em banda não-licenciada descrito na Seção 3.1 não se mostrou adequada pois, na prática, a disponibilidade de banda não-licenciada é incerta. Assim, desenvolvemos uma formulação baseada em *chance constraint*, que leva em conta a incerteza da disponibilidade da banda não-licenciada.

Mais precisamente, a fim de incluir uma variável probabilística (ξ_k) que descreve essa incerteza, reformulamos as restrições em 3-5 como a seguinte *chance constraint* para cada SC $k \in K$:

$$Pr \left\{ \sum_{i \in I''_k} x''_{i,k} \leq y''_k \xi_k \right\} \geq \alpha_k. \quad (3-15)$$

Cada *chance constraint* em (3-15) garante, com uma certa probabilidade (α_k) que a banda não-licenciada utilizada por uma SC $k \in \{1, 2, \dots, |K|\}$ não exceda à banda disponível (ξ_k).

No campo da otimização matemática, a programação estocástica desenvolvida com *chance constraint* consiste em uma das ferramentas usuais para a modelagem de problemas que envolvem incertezas [17]. Enquanto os problemas de otimização determinística são formulados com parâmetros conhecidos, os problemas do mundo real quase invariavelmente incluem parâmetros desconhecidos.

Otimizar problemas de tomada de decisões sob incertezas é um grande desafio. Precisamos inicialmente definir se existe alguma metodologia que seja adequada para lidar com o tipo específico de incerteza que estamos trabalhando. Precisamos identificar quais são as vantagens e desvantagens agregadas à metodologia, que refletem direta ou indiretamente na análise do problema, e, em particular, verificar se a metodologia proposta é computacionalmente tratável.

A programação estocástica está entre as técnicas mais utilizadas em problemas de tomada de decisões sob incertezas. Contudo, a modelagem envolvida nessa técnica pode gerar modelos intratáveis devido a uma grande quantidade de restrições geradas pela alta quantidade de pontos a serem analisados no processo de tomada de decisão.

Em nossa proposta, utilizamos do fato de que as distribuições de probabilidade que descrevem os dados relativos à disponibilidade da banda não-licenciada são conhecidas. Dessa maneira, podemos utilizar uma abordagem de reformulação do problema original, substituindo a formulação estocástica por modelos determinísticos equivalentes (DEPs), que capturam a aleatoriedade imposta sem a inclusão explícita do termo de probabilidade ou das variáveis aleatórias (ξ_k).

Para isto, devemos reformular as restrições probabilísticas em (3-5) de forma a eliminar do modelo as variáveis aleatórias ξ_k , para todo $k = 1, 2, \dots, |K|$. 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 :

$$Pr\{\xi_k \geq \tilde{x}\} = 1 - F_k(\tilde{x}) \geq \alpha_k, \quad (3-16)$$

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 (3-16), obtemos $\tilde{x} \leq F_k^{-1}(1 - \alpha_k)$. Logo, substituindo as restrições não-lineares em (3-5) por (3-17), podemos resolver o problema resultante através de métodos de programação linear inteira.

$$\sum_{i \in I''_k} x''_{i,k} \leq 1 - F_k^{-1}(1 - \alpha_k) y''_k, \quad (3-17)$$

Por fim, usamos ainda do fato de que, da maneira como a proposta foi modelada, a incerteza pode ser interpretada por duas visões diferentes: descrevendo probabilisticamente as exigências de não violação da banda não-licenciada e percentualmente a quantidade de recurso disponível para transmissões LTE-U. Discutimos as duas óticas nas Seções 3.2.1 e 3.2.2.

3.2.1 Restrição de Invasão de Recurso de Banda Não-Licenciada

Em nosso modelo estocástico proposto na seção 3.2, consideramos inicialmente que a variável α_k em (3-5) descreva a probabilidade mínima de que as exigências de não violação da banda não-licenciada seja cumprida. Visto desta forma, o modelo representa a alocação de recursos de banda não-licenciada para LTE-U admitindo-se a possibilidade de casos de invasão nos recursos de banda já utilizados pelo IEEE 802.11.

Como discutido na Seção 2.3, devido às suas características de funcionamento, a tecnologia LTE-U pode ser agressiva às demais que compartilham recursos. Diante dessa possibilidade, consideramos cenários onde o LTE-U poderá se sobrepor, em alguns canais, a comunicações IEEE 802.11 já em andamento.

Como ainda não existem normas regulatórias para esse tipo comportamento de invasão, analisamos alguns cenários gerados sinteticamente para simular os benefícios que a utilização dessa técnica traria para a operadora. Os resultados das análises sob essa ótica são apresentados na Seção 4.4 (e foram utilizados para a publicação de dois artigos, listados na Seção 5.0.1).

3.2.2 Disponibilidade de Recurso de Banda Não-Licenciada

Consideramos agora, para o modelo estocástico proposto na Seção 3.2, que a variável α_k presente em (3-5) descreva o percentual de recursos disponíveis para transmissões LTE-U. Nessa ótica, consideramos efetivas e respeitamos completamente as técnicas de coexistências propostas na Seção 2.3.

O modelo resultará então em soluções que utilizam apenas a banda não-licenciada efetivamente disponível, respeitando assim o percentual complementar utilizado por tecnologias IEEE 802.11 para pontos de acesso localizados geograficamente dentro da área de cobertura de uma SC (k).

Apresentamos na Seção 4.4 os resultados das simulações realizadas. Para testar o comportamento do modelo em cada cenário, os valores aleatórios gerados por cada distribuição são utilizados para preencher o lado direito da restrição (3-17).

3.3 Conclusão

Apresentamos neste capítulo o modelo de rede utilizado e a formulação matemática do problema de otimização do número de usuários atendidos na rede LTE. Descrevemos em detalhes o modelo determinístico de alocação de recursos em redes LTE utilizando bandas não licenciadas. Descrevemos a formulação estocástica realizada com o método de *chance constraint* para tratamento da incerteza da disponibilidade de banda não-licenciada sob duas óticas de interpretação do parâmetro probabilístico α_k .

No próximo capítulo, apresentamos a avaliação de desempenho realizada. Discutimos os resultados para os modelos propostos sob diversos cenários de ocupação da rede virtual proposta.

Avaliação

Neste capítulo, apresentamos a avaliação de desempenho realizada para o modelo proposto no Capítulo 3. Realizamos comparações em cada modelo considerando três diferentes tipos de demanda de usuários IEEE 802.11, apresentados na seção 4.2, e também para os diferentes tipos de demanda de usuários LTE/LTE-U apresentados no Capítulo 3. Descrevemos os cenários e experimentos realizados e apresentamos discussões diante dos resultados obtidos.

4.1 Cenários e experimentos

Em nosso modelo, consideramos usuários distribuídos segundo o processo PPP (*spatial Poisson point process*) [61] 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*) [61], com raio de cobertura (J^R, K^R) e também distância mínima (J^D, K^D) definidos conforme apresentado na Tabela 4.1, que resume também outros parâmetros utilizados na avaliação.

Tabela 4.1: Valores de entrada utilizados nas simulações

A : 10 X 10 km	I : $\{1, \dots, 35\}$	d_i : 5-20 PRBs
J^R : 7 X 7 km	J : $\{1\}$	b'_j : 20 PRBs
K^R : 2 X 2 km	K : $\{1, \dots, 10\}$	d_i^{min} : 5 PRBs
J^D : 7 km	v_i : 3	
K^D : 1 km	c_k : 20	

Consideramos ainda que exista um fator de atenuação de sinal devido à distância entre o transmissor (BS) e o receptor (usuário), dado por *Okumura Hata Model* [2]. O modelo *Okumura Hata* foi desenvolvido para calcular os efeitos da difração, reflexão e espalhamento de sinal, causados principalmente pelas estruturas físicas de um ambiente urbano, sendo adequado para aplicações LTE, em transmissões utilizando frequências entre 150 a 1500 MHz, podendo ser aplicado a estações fixas ou móveis, de 1 a 10 metros de altura e com distâncias de 30 metros a 10 km entre transmissor e receptor.

Da mesma forma, consideramos que exista um fator de atenuação de sinal devido à distância entre o transmissor (SC) e o receptor (usuário), dessa vez utilizando banda não-licenciada, dado por *cost231 Hata Model* [2]. O modelo *cost231 Hata Model* consiste em uma variação do modelo urbano de *Okumura Hata*, e tem o objetivo de cobrir uma faixa de frequência diferente do modelo originário, oferecendo cobertura para frequências compreendidas entre 1500 e 2000 MHz. Em nossa formulação, assumimos uma extrapolação da frequência, utilizando o modelo *cost231 Hata Model* para representar a propagação de sinal na banda não-licenciada de 5 GHz. Em termos práticos, assumir uma extrapolação do modelo de atenuação de sinal poderia gerar alterações na quantidade de recurso (PRBs) entregue ao usuário. Contudo, para o modelo proposto, acreditamos fortemente que os impactos da extrapolação não seriam grandes a ponto de inviabilizar o conjunto de soluções obtidas, uma vez que afetam somente os valores relativos a demanda servida.

4.2 Modelo para redes 802.11

No modelo, APs IEEE 802.11 são posicionados utilizando o modelo de distribuição PPP [61]. A ocupação do IEEE 802.11 em determinado canal consiste em uma variável aleatória, que torna tanto utilização quanto disponibilidade de recurso variáveis não-determinísticas. Para descrever essa aleatoriedade, utilizaremos três modelos de temporais: o (1) modelo baseado na distribuição de Weibull [41]; o (2) modelo baseado em Log-normal [63]; e também o (3) modelo baseado na Generalizada de Pareto [7].

4.2.1 Modelo baseado em Weibull (WB)

Em Lino et al. [41], o autor apresenta uma análise estatística, através de medições práticas, com a utilização de um robô móvel que gera solicitações de dados a APs IEEE 802.11 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 IEEE 802.11, pode ser melhor representada 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. A Figura 4.1 apresenta a CDF da distribuição de Weibull para os parâmetros apresentados. Em nossos experimentos computacionais, utilizamos esses parâmetros para representar a distribuição de Weibull e, na restrição (3-17) do modelo, temos então

$$F_k^{-1}(1 - \alpha_k) = \beta (-\ln(\alpha_k))^{\frac{1}{\alpha}} = 1.0885(-\ln(\alpha_k))^{0.2287}, \quad (4-1)$$

para cada SC $k \in K$.

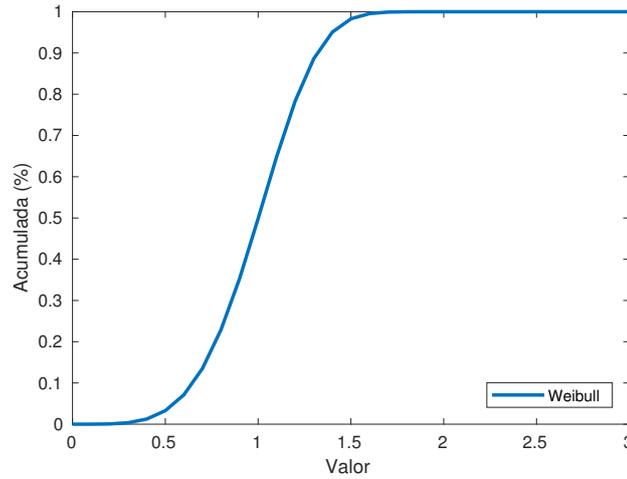


Figura 4.1: CDF da distribuição Weibull com os parâmetros apresentados.

4.2.2 Modelo baseado em Log-normal (LN)

Em Wellens et al. [63], 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 IEEE 802.11 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 IEEE 802.11, com parâmetros de forma e escala, para uma ocupação média, iguais a $\mu = 1.6$ e $\sigma = 1.3$, respectivamente. A Figura 4.2 apresenta a CDF da distribuição de Log-normal para os parâmetros apresentados. Neste caso, para a restrição (3-17), usamos então

$$F_k^{-1}(1 - \alpha_k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\alpha_k} \frac{e^{-\frac{(\ln(\alpha_k) - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\alpha_k} d\alpha_k = \frac{1}{3.25} \int_0^{\alpha_k} \frac{e^{-\frac{(\ln(\alpha_k) - 1.6)^2}{3.38}}}{\alpha_k} d\alpha_k, \quad (4-2)$$

para cada SC $k \in K$.

4.2.3 Modelo baseado na Generalizada de Pareto (GP)

Em Benítez et al. [7], o autor identifica, por meio de comparações de várias curvas de distribuição e uma curva gerada a partir da coleta de dados reais, a curva de distribuição matemática que mais se aproxima da curva de referência. Mais especificamente, o autor considera 7 diferentes distribuições probabilísticas: *exponential* (E), *generalized exponential* (EG), Pareto (P), *generalized pareto* (GP), *Log-normal* (LN), *Gamma* (G) e *Weibull* (W), e conclui que a curva de uma GP é a que mais se aproxima, com cerca de 94% de precisão, da demanda empírica observada no IEEE 802.11.

No trabalho, o autor ainda apresenta 5 conjuntos de configurações da GP que modelam o nível de ocupação gerado pelo IEEE 802.11. 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 $\lambda \leq 0$, a GP é equivalente a uma distribuição de Pareto [32]. A Figura 4.3 apresenta a CDF da distribuição de Log-normal para os parâmetros apresentados. Neste caso, para a restrição (3-17), usamos então

$$F_k^{-1}(1 - \alpha_k) = \frac{\mu}{(\alpha_k)^{\frac{1}{\lambda}}} = \frac{3.5150}{(\alpha_k)^{0.1942}}, \quad (4-3)$$

para cada SC $k \in K$.

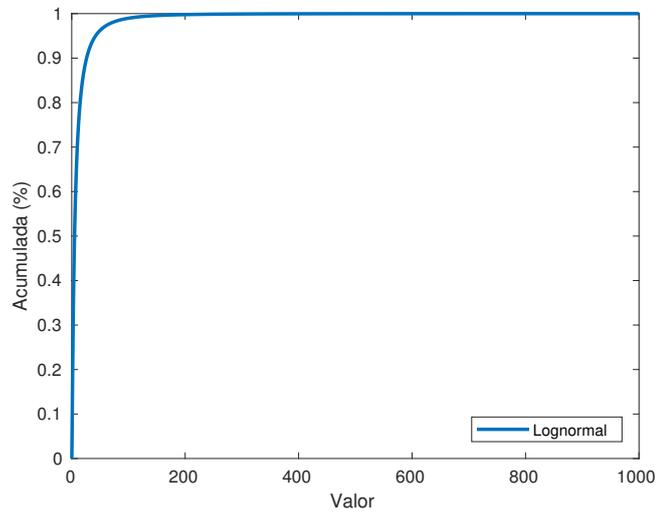


Figura 4.2: CDF da distribuição Lognormal com os parâmetros apresentados.

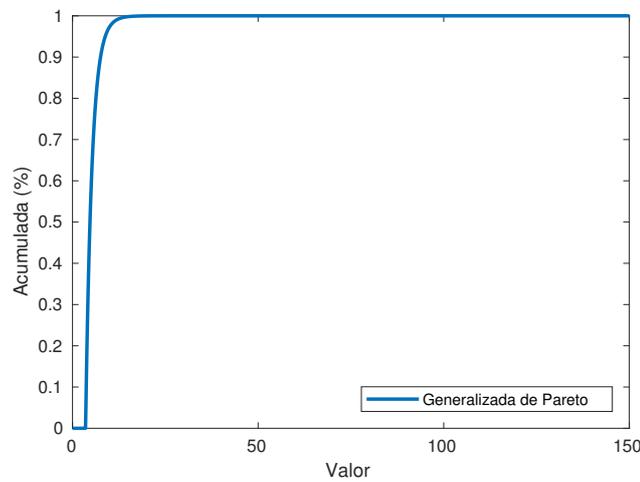


Figura 4.3: CDF da distribuição Generalizada de Pareto com os parâmetros apresentados.

Ao longo dos experimentos computacionais, comparamos o efeito das três distribuições de probabilidade escolhidas para a demanda dos usuários IEEE 802.11. Note, no entanto, que essas distribuições foram identificadas em estudos realizados em diferentes períodos de tempo e em diferentes localizações geográficas. Uma consequência particular é que, quando plotadas juntas, suas curvas não permitem uma comparação muito clara entre elas. A Figura 4.4 apresenta a CDF das três curvas citadas.

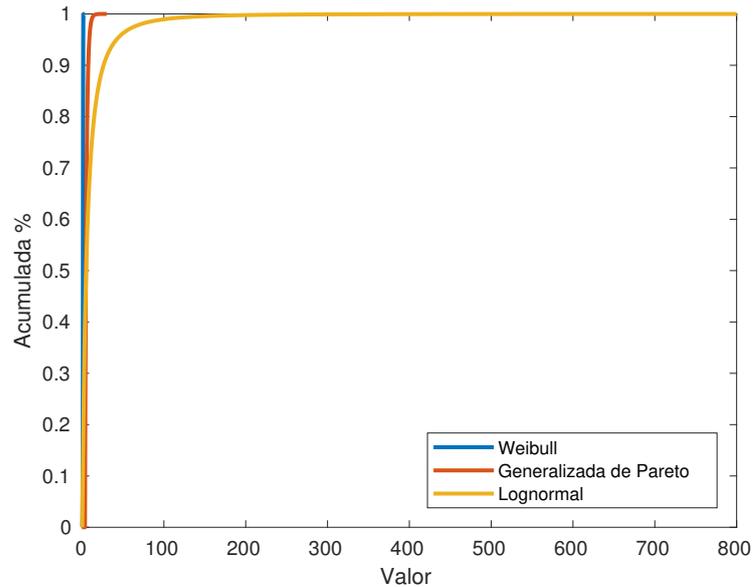


Figura 4.4: CDF das três distribuições utilizadas para o IEEE 802.11.

Para superar essa desvantagem, normalizamos seus valores para o intervalo entre 0 e 1. Além disso, devido ao efeito particular da cauda longa da distribuição Lognormal, na qual valores tão distantes da média podem ser observados para probabilidades muito pequenas, nosso modelo matemático provavelmente gerará a mesma solução ótima para diferentes instâncias do problema. Para evitar esse efeito indesejado, optamos por truncar a curva Lognormal em um ponto que ainda preserva sua forma, mas exclui os pontos mais extremos. Mais precisamente, após algumas análises empíricas, optamos por uma Lognormal truncada no nível de probabilidade de 99%. A curva normalizada resultante de cada CDF usada nos experimentos, incluindo a lognormal truncada em 99%, é mostrada na Fig. 4.5.

4.2.4 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 IEEE 802.11 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 IEEE 802.11 em todos os 12 canais. E a banda disponível para transmissões LTE-U será dada pela diferença entre a banda disponível, t'' , e o total consumido pelo IEEE 802.11, isto é:

$$\xi_k = t'' - \sum_{c \in C} \sum_{w \in W_k''} \Psi_w. \quad (4-4)$$

4.3 Modelo Determinístico

Nesta Seção, analisamos o modelo determinístico proposto no Capítulo 3. Na Figura 4.6, traçamos o número de usuários atendidos, demanda servida, custo e número de SCs ativadas como função de C_{max} .

Conforme evidenciado na Figura 4.6(c), o número de usuários atendidos no modelo, aumenta a medida que aumentamos o recurso c_{max} , chegando a atender todos os usuários do modelo, com a demanda mínima, para $C_{max} = 5$. As Figuras 4.6(e) e 4.6(f) reforçam essa afirmação ao indicar que o número de PRBs de demanda mínima servidos tende a se estabilizar para valores de $C_{max} \geq 5$, e, por consequência, o número de PRBs de demanda extra servido tende a aumentar também para valores de $C_{max} \geq 5$. A rede virtual proposta servirá ao total de demanda solicitada apenas em regiões que usuários IEEE 802.11 tenham o comportamento de uma distribuição WB, o que pode ser justificado pelo formato da curva da distribuição, que deixa relativamente mais oportunidades de transmissão para a tecnologia LTE-U.

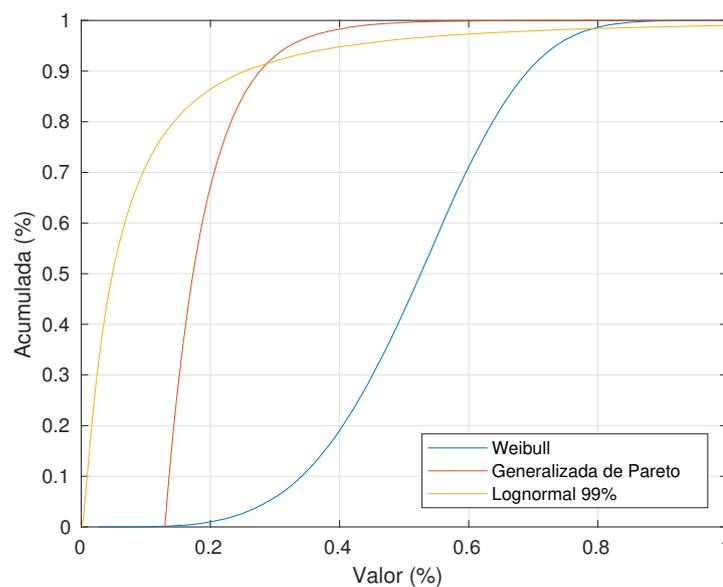


Figura 4.5: CDF normalizada e truncada das três distribuições utilizadas para o IEEE 802.11.

Por fim, analisamos o custo da rede LTE-U como função de C_{max} . Como mostra a Figura 4.6(b), a medida que aumentamos o valor de C_{max} , o número de SCs que são ativadas no modelo aumenta. Para regiões com usuários IEEE 802.11 que sigam o modelo LN, a rede virtual proposta consegue atingir sua eficiência máxima com 9 SCs ativadas, diferente das demais. Comprovamos esse comportamento através do custo da função, demonstrado na figura 4.6(a). Esse comportamento pode ser explicado pela característica da distribuição, de cauda longa, e que pode inviabilizar a ativação de SCs em determinada região, devido ao alto índice de ocupação da banda não-licenciada.

4.4 Modelo Estocástico com Chance Constraint

Nesta Seção, consideramos a aleatoriedade que a banda não-licenciada está sujeita, inserindo uma restrição de probabilidade, baseada em *chance constraint*, e analisada sob duas óticas: (1) restrição probabilística para controle da chance de invasão de recurso de banda e (2) a disponibilidade de recurso de banda disponível para utilização em tecnologia LTE-U.

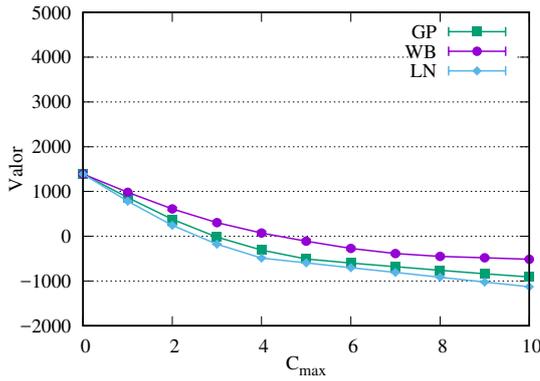
4.4.1 Análise da restrição de invasão de recurso de Banda Não-Licenciada

Nesta Seção, analisamos os resultados do modelo proposto na Seção 3.2.1. Dividimos os resultados em dois grupos: alocação e satisfação de usuários e, também, custo da rede virtual LTE-U.

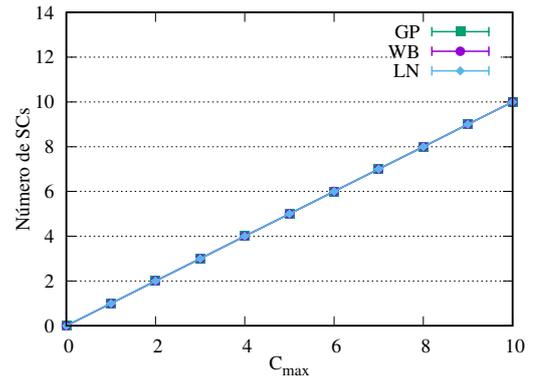
Alocação e Satisfação de Usuários

Inicialmente, estudamos a porcentagem de usuários satisfeitos sob o esquema de alocação estocástico proposto. Nas Figura 4.7(c) e 4.7(d), traçamos, como uma função de α_k , o número de usuários atendidos e a demanda em PRBs servida. 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 LTE-U terá melhor desempenho, atendendo a todos os usuários do modelo, quando $\alpha_k = 10\%$. Em particular, a Figura 4.7(d) indica que o maior impacto do aumento de α_k ocorre em regiões onde a ocupação IEEE 802.11 é aproximada por 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.

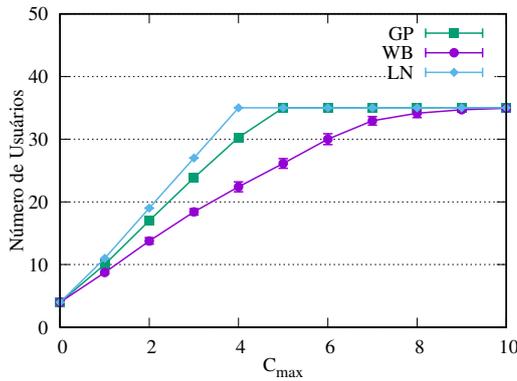
Comparamos ainda o número de usuários satisfeitos na LTE-U quando APs IEEE 802.11 têm ocupação similares aos dos modelos baseados em GP, WB e LN, para valores de α_k iguais a 70% e 90%, como uma função de c'' . Conforme apresentado na



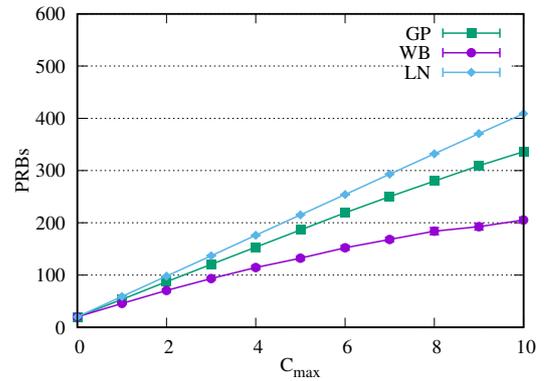
(a) Valores da função objetivo.



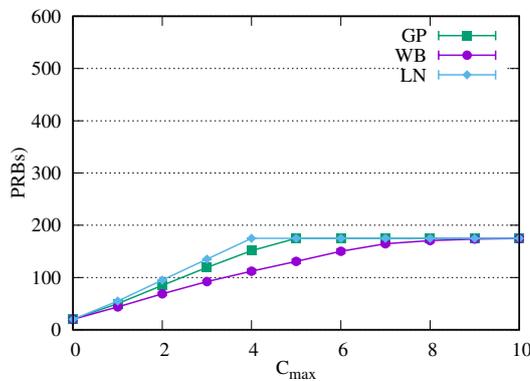
(b) Número de SCs ativadas.



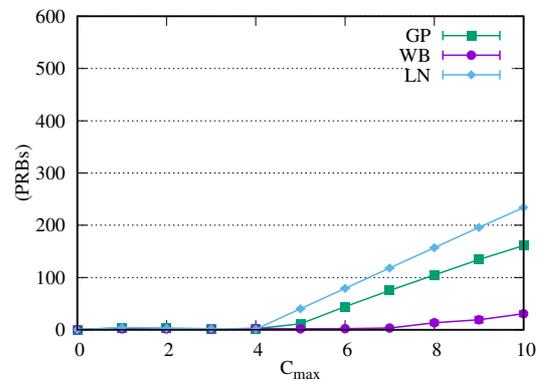
(c) Número de usuários atendidos.



(d) Total da demanda servida.



(e) Total da demanda mínima servida.



(f) Total da demanda extra servida.

Figura 4.6: Impacto da variação de C_{max} no modelo determinístico.

figura 4.8(c), 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 IEEE 802.11 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 LTE-U para valores menores de α_k .

Custo da Rede Virtual LTE-U

Aqui, consideramos o custo da rede LTE-U como função de α_k . Como mostra a Figura 4.7(b), o número de SCs ativadas diminui consideravelmente a medida que as requisições de α_k aumentam. Para o caso onde APs IEEE 802.11 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 4.7(a) mostra 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 4.8(b) e 4.8(a), que demonstram as decisões de ativação de SCs como função de c'' para valores fixos de α_k . Essa característica evidencia a grande importância de se investir na análise do comportamento da ocupação IEEE 802.11 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 responsável pela rede, 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 IEEE 802.11 para atendimento de usuários da rede móvel.

4.4.2 Análise do parâmetro α_k descrevendo a Disponibilidade de Recurso de Banda Não-Licenciada

Nesta Seção, analisamos os resultados do modelo proposto na Seção 3.2.2. Dividimos os resultados em dois grupos: alocação e satisfação de usuários e, também, custo da rede virtual LTE-U.

Alocação e Satisfação de Usuários

Analisamos o percentual de usuários satisfeitos sob o esquema de alocação estocástica proposto. Na Fig. 4.9(c) e na Fig. 4.9(g) plotamos o número de usuários atendidos e a demanda em PRBs como uma função do nível de uso de largura de banda não-licenciada para dois cenários de usuários: pequeno com 10 usuários, e grande, com 100 usuários. O número de usuários satisfeitos diminui à medida que aumentamos a aceitação mínima na proporção de disponibilidade de largura de banda. Podemos ver que a rede virtual LTE-U funcionará melhor, atendendo a todos os usuários, quando $\alpha_k = 10\%$.

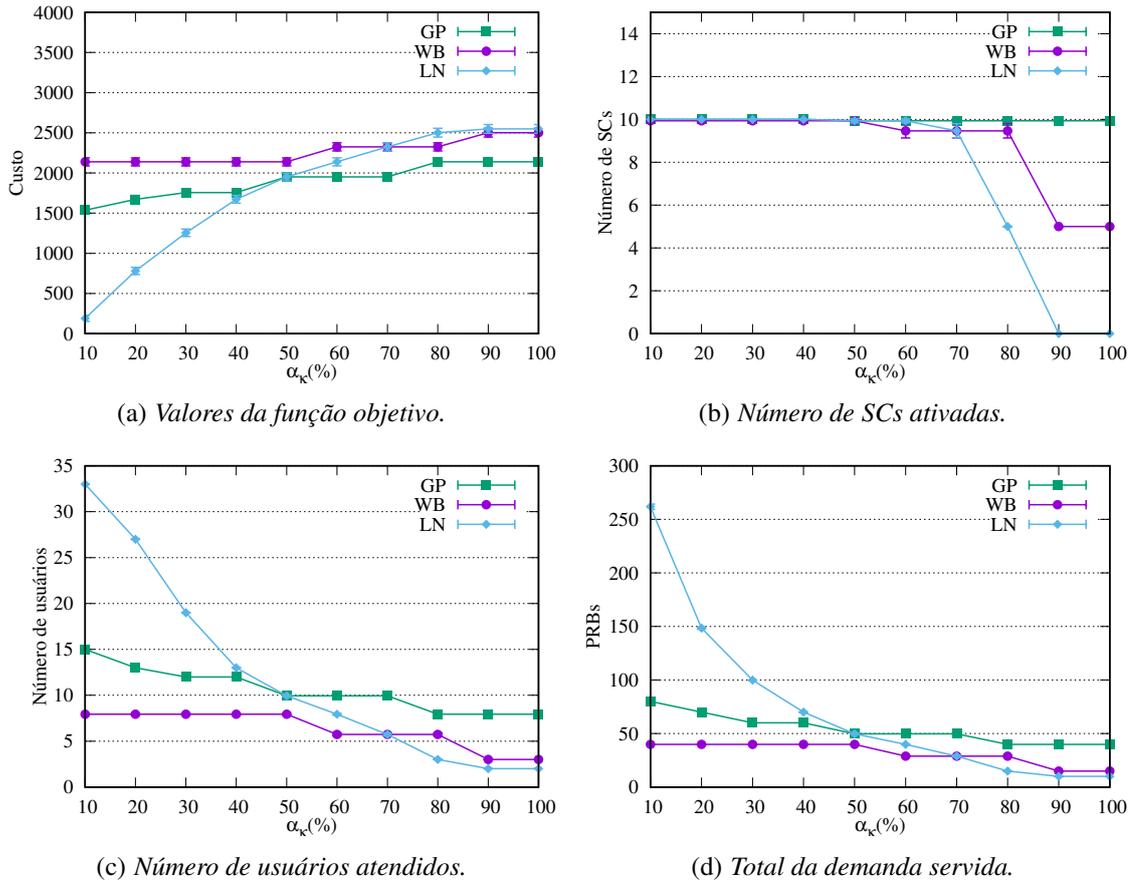


Figura 4.7: Impacto de α_k no modelo de alocação estocástico.

O maior impacto do aumento do valor da aceitação (α_k) ocorre em regiões onde a ocupação por IEEE 802.11 é descrita por uma distribuição Lognormal. Para as outras distribuições, podemos observar uma diminuição bastante consistente no número de usuários atendidos quando a proporção do limite aumenta para 90%.

Também comparamos o número de usuários satisfeitos para os casos particulares da proporção de disponibilidade que está sendo definida para os valores mínimos de aceitação 30%, 50% e 70%, como uma função do orçamento, c^{max} , em redes LTE-U com demandas de pontos de acesso IEEE 802.11, seguindo cada uma das três distribuições em consideração. Conforme mostrado na Fig. 4.11(c), o número de usuários atendidos cresce significativamente à medida que aumentamos o orçamento disponibilizado pela operadora. Os melhores resultados são obtidos quando a demanda IEEE 802.11 segue uma distribuição generalizada de Pareto. No caso de uma distribuição Weibull, o aumento do requisito probabilístico α_k de 70% para 90% cria uma redução de 50% no número de usuários atendidos no modelo. Finalmente, quando analisamos o modelo baseado em Lognormal, podemos observar uma diminuição de 67% no número de usuários atendidos. Os resultados podem ser, mais uma vez, justificados pelas características das curvas de distribuição. Por exemplo, a distribuição Lognormal tem um comportamento de cauda

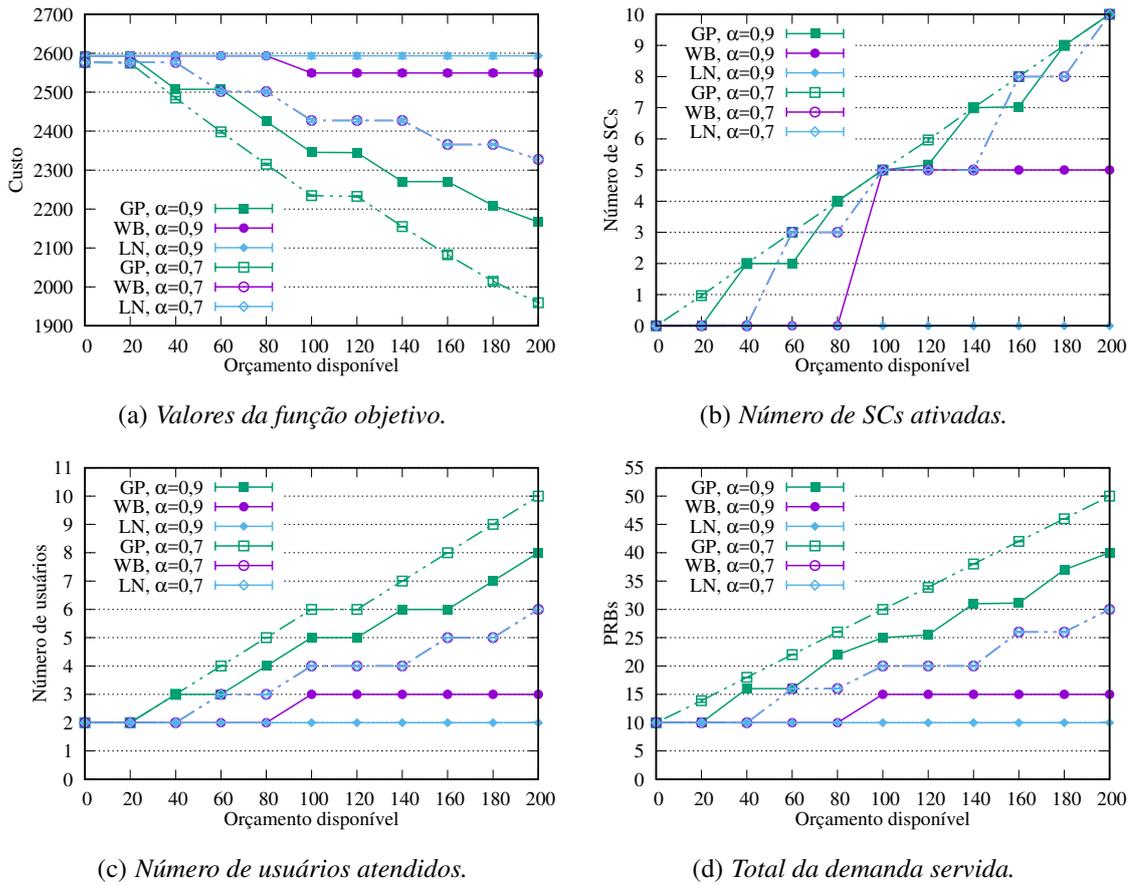


Figura 4.8: Resultados para vários valores de α_k no modelo de programação estocástica.

longa, com um pico agudo de valores em um intervalo curto, o que tende a deixar mais largura de banda livre para uso por uma célula pequena LTE-U, especialmente para valores menores de α_k .

A Fig. 4.10 mostra algumas avaliações sobre o quanto os resultados são afetados por diferentes números de usuários LTE-U combinados com três proporções fixas de disponibilidade de largura de banda não-licenciada. Em particular, Fig. 4.10(b) sugere que o número de usuários totalmente satisfeitos tende a ser relativamente menor para um maior número total de usuários. A mesma figura também mostra que, nesses casos do problema, o único caso em que todas as demandas (d_i) são atendidas é aquele em que o uso do IEEE 802.11 se segue a uma distribuição Weibull e a disponibilidade aceitável não é superior a 50% do tempo. Quanto a um uso de acordo com a distribuição Lognormal, se a disponibilidade requerida não for menor que 70% do tempo, os resultados sugerem que não há vantagem em ativar SCs e, assim o número de usuários atendidos cai significativamente.

Custo da Rede Virtual LTE-U

Agora, analisamos o custo resultante da rede LTE-U em função da disponibilidade de largura de banda não-licenciada. Como mostra a Fig. 4.9(b), o número de SCs ativadas diminui consideravelmente à medida que a proporção mínima aceitável de disponibilidade aumenta. Para o caso em que os pontos de acesso IEEE 802.11 têm um uso de canal seguindo uma distribuição lognormal, o modelo não encontra justificativa monetária para ativar pequenas células naquela região para valores de $\alpha_k \geq 80\%$. Os valores da função objetivo em 4.9(a) demonstra o rápido crescimento do custo para não atender usuários, o que pode ser visto como a perda de chance de ganho financeiro para o operador. Temos mais evidências desse comportamento em figuras 4.11(b) e 4.11(a), que mostram as ativações de SCs como uma função do orçamento, c^{max} , para valores fixos de α_k . Esses resultados ressaltam a importância de se investir na análise do comportamento dos usuários IEEE 802.11 na área de possíveis implantações de SCs, pois a qualidade e o custo das soluções são muito sensíveis a esse comportamento.

O parâmetro α_k , como configurado neste modelo matemático, leva a soluções ajustáveis para cenários específicos de interesse, pois permite que o responsável pela rede lide com diferentes configurações de rede que podem capturar situações mais realistas e especificar trocas arbitrárias entre ganho de receita e risco de conflitos, mesmo sob exigências distintas por sistemas IEEE 802.11.

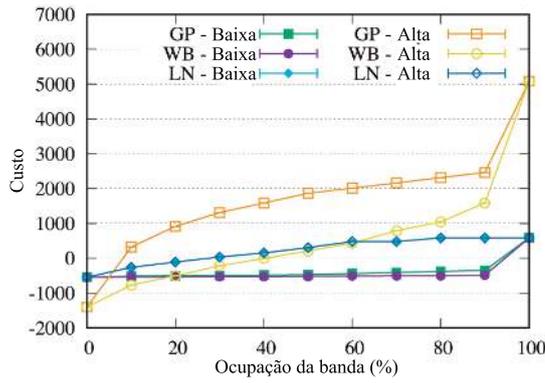
4.5 Conclusão

Neste capítulo, apresentamos a avaliação de desempenho para os modelos propostos no Capítulo 3. Utilizamos um modelo matemático, desenvolvido com programação linear, para realizar a alocação de recursos em banda não licenciada, para redes LTE-U. Os resultados apresentados demonstraram a grande capacidade de aumento do número de PRBs servidos ao usuário LTE-U, mesmo em ambientes onde existem competições por recurso de banda não-licenciada.

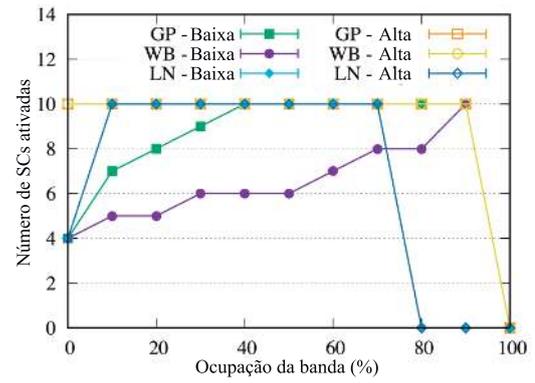
Posteriormente, usamos *chance constraint* para construção de um modelo estocástico, que tinha como objetivo, modelar a aleatoriedade da disponibilidade do recurso de banda não-licenciada. Apresentamos esse modelo interpretado sob duas diferentes óticas: (1) com o parâmetro α_k descrevendo a chance de invasão de recurso já utilizado por IEEE 802.11, e, (2) com o parâmetro α_k descrevendo o percentual de recurso de banda não-licenciada disponível para utilização por tecnologia LTE-U.

Os resultados relatados mostram que a capacidade de maximizar o número de usuários atendidos depende muito da distribuição probabilística de demandas de usuários IEEE 802.11 sob a área de cobertura de interesse.

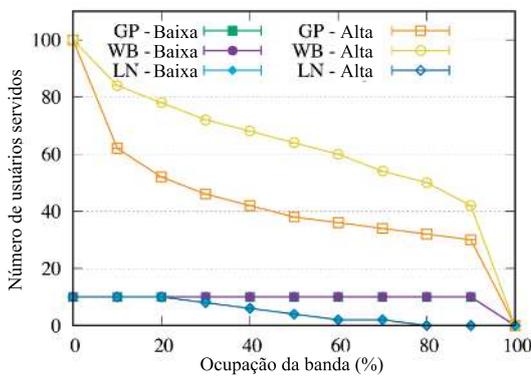
Embora tenhamos assumido, por exemplo, que a demanda de cada usuário é um valor fixo conhecido, na prática ele pode variar amplamente e pode ser representado por uma variável aleatória no modelo. Estamos lidando com um problema em que os cenários operacionais são compostos de muitos usuários, que estão entrando ou saindo dos intervalos de pontos de acesso, estações base ou small cells. No entanto, nosso modelo é facilmente personalizável para atender a novos cenários, uma vez que o problema é principalmente sobre demanda e recursos. O que nos referimos como *user* em nosso modelo, na prática, pode representar sob um novo cenário um cluster de usuários, agrupados geograficamente ou por outros critérios de cluster. O respectivo valor de usuário e demandas podem representar medidas estatísticas apropriadas, incluindo alguns esquemas de interesse particular para análise de decisão.



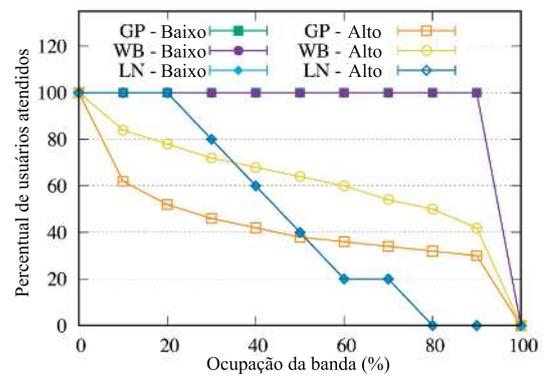
(a) Valores da função objetivo.



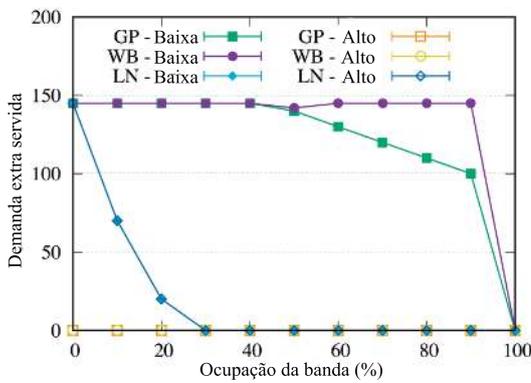
(b) Número de SCs ativadas.



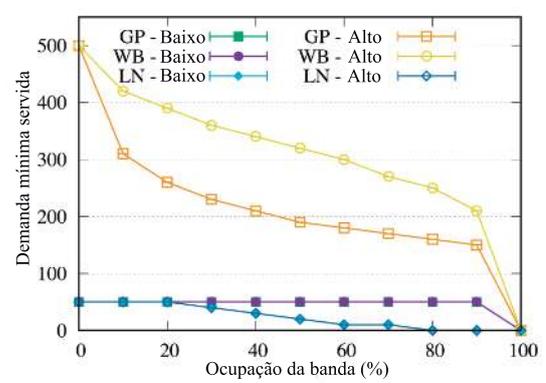
(c) Número de usuários atendidos.



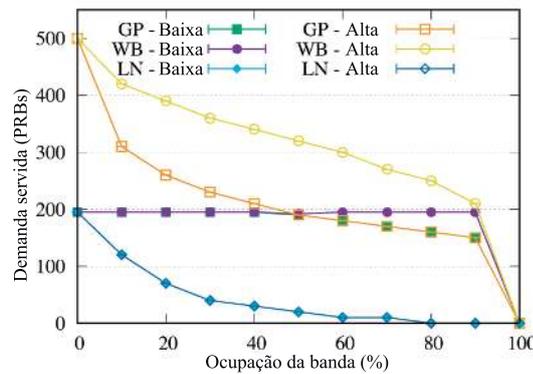
(d) Percentual de usuários atendidos.



(e) Demanda servida maior que a mínima.



(f) Total da mínima servida.



(g) Total da demanda servida.

Figura 4.9: Resultados para vários valores de α_k no modelo de programação estocástica.

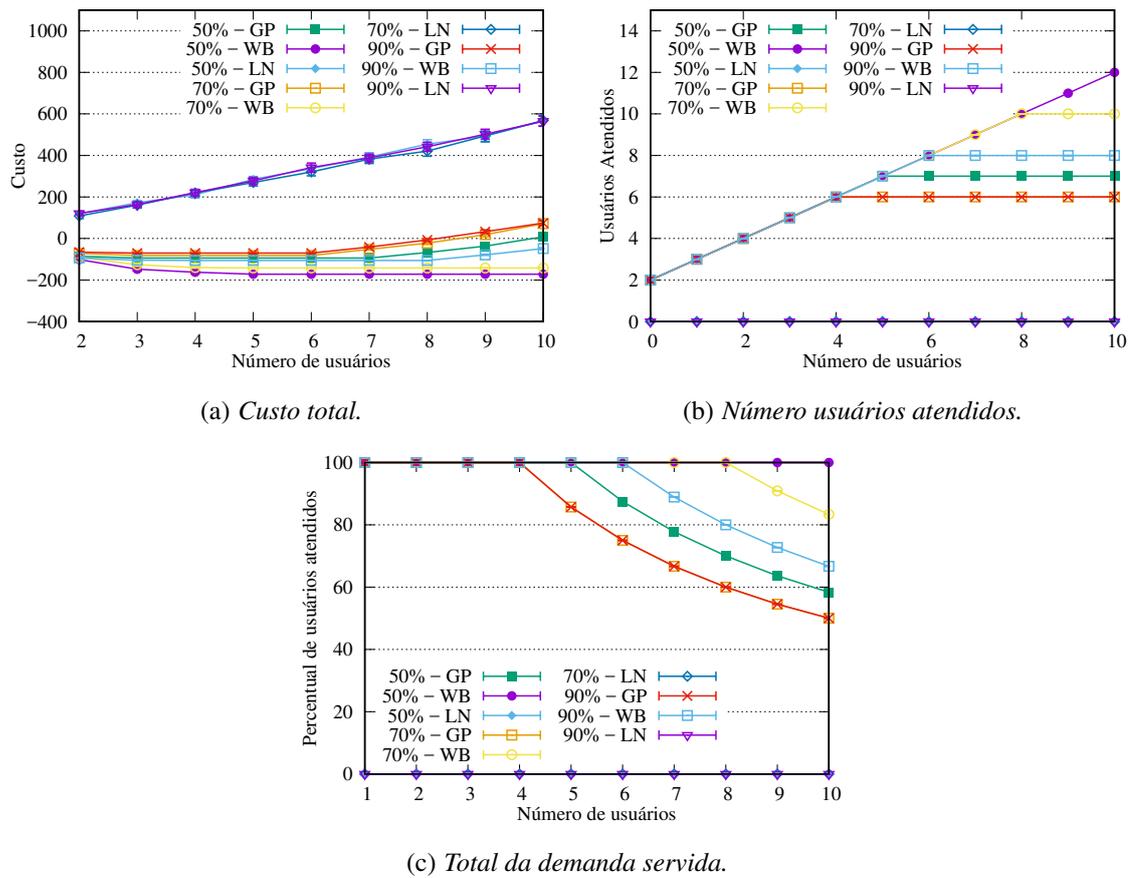
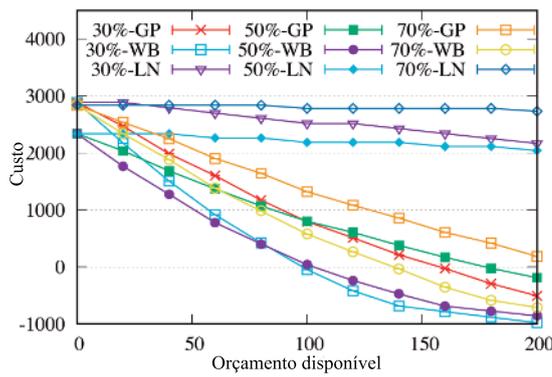
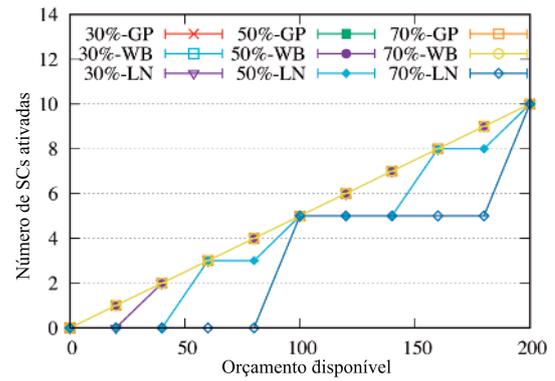


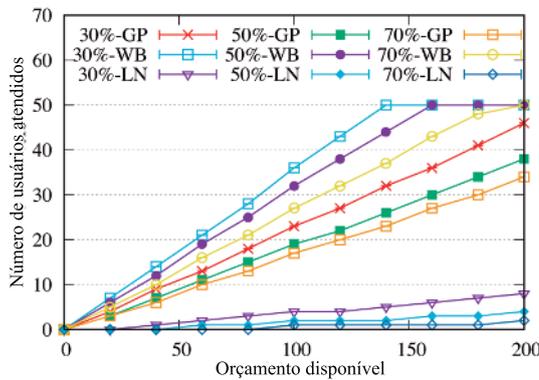
Figura 4.10: Resultados para alguns números de usuários LTE-U para três proporções mínimas de disponibilidade de largura de banda não-licenciada.



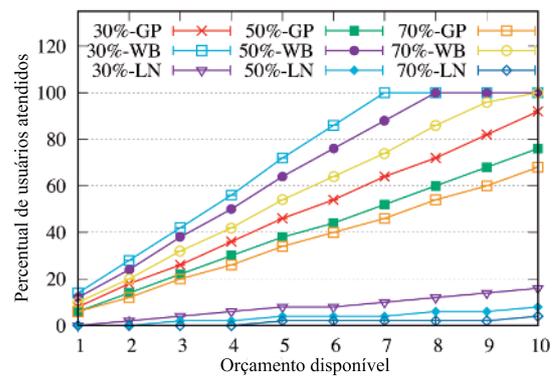
(a) Valores da função objetivo.



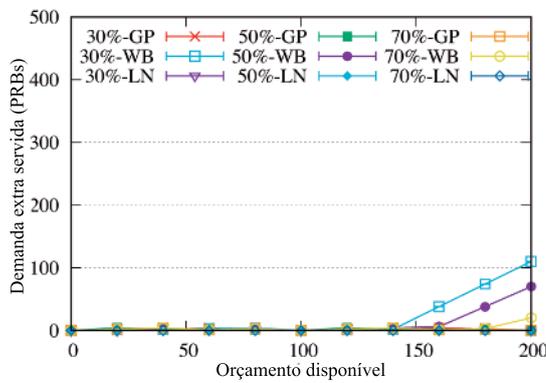
(b) Número de SCs ativadas.



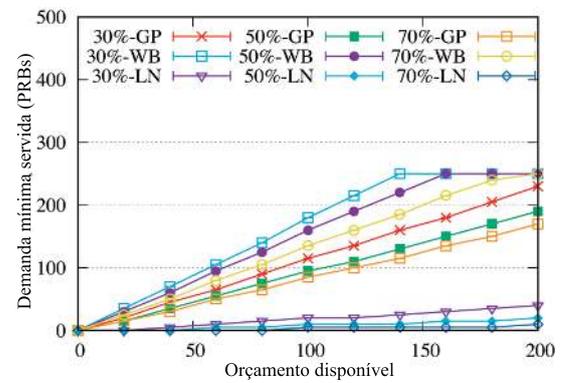
(c) Número de usuários atendidos.



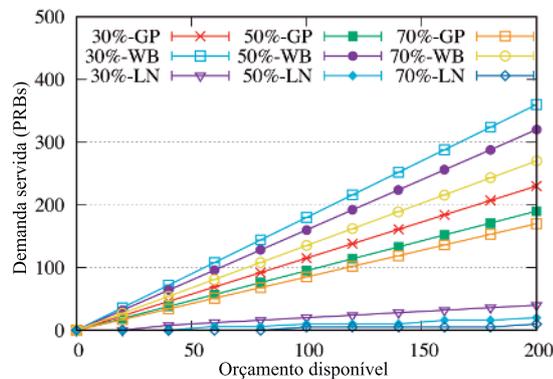
(d) Percentual de usuários atendidos.



(e) Demanda servida maior que a mínima.



(f) Total da mínima servida.



(g) Total da demanda servida.

Figura 4.11: Resultados para $\alpha_k = 30\%$, $\alpha_k = 50\%$ e $\alpha_k = 70\%$ no modelo de programação estocástica.

Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Nesta dissertação apresentamos o problema da alocação de recursos para redes LTE operando em banda não licenciada, considerando a competição por recursos entre LTE-U e IEEE 802.11.

Introduzimos as principais questões relativas ao funcionamento passivo do IEEE 802.11 perante a competição por recursos com LTE-U. Em seguida apresentamos as principais soluções propostas no meio acadêmico e comercial para possibilitar a coexistência entre as duas tecnologias na banda não licenciada.

Realizamos, também, uma análise de desempenho através de um modelo determinístico de alocação de recursos para LTE em banda não licenciada. Utilizamos a ferramenta MATLAB para geração do conjunto de cenários, e posteriormente, a ferramenta CPLEX para simulação. Os resultados alcançados foram ao encontro das conclusões obtidas por trabalhos disponíveis na literatura e evidenciaram o potencial de utilização da tecnologia LTE-U.

Este trabalho apresentou ainda uma nova proposta para alocação de recursos em banda não licenciada, desta vez incluindo como objeto de análise a aleatoriedade à que a banda não-licenciada está sujeita. O modelo desenvolvido com *chance constraint* foi analisado, levando-se em conta três modelos de distribuição da ocupação da banda não-licenciada exercida pelo IEEE 802.11, sob duas perspectivas: restrição probabilística para possível invasão e disponibilidade probabilística da banda não-licenciada. A avaliação de desempenho dessa nova solução foi realizada também por meio de simulações, e apresentaram resultados promissores para a proposta de alocação de recursos em LTE-U.

5.0.1 Produções Acadêmicas e Bibliográficas

Esta dissertação gerou resultados preliminares, que foram publicados em dois congressos, um nacional e outro internacional:

- "*Alocação de recursos em redes LTE utilizando bandas não-licenciadas*", aceito e apresentado no SBRC 2018 (Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos 2018).

- "*A Stochastic Programming Model for Recourse Allocation in LTE-U Networks*", aceito e apresentado no CCECE 2018 (Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering 2018).

5.0.2 Conclusões e Comentários Gerais

Por fim, este trabalho deixa perspectivas de continuidade para a avaliação de desempenho realizada nesta dissertação. Em particular, como sugestão para trabalhos futuros, mencionamos as seguintes possibilidades:

- Reformular o problema de alocação de recursos proposto com a utilização de novas técnicas de programação estocástica, e.g., geração de cenários.
- Utilizar novos modelos de tráfego de usuários LTE/LTE-U.
- Avaliar o desempenho do modelo proposto para alocação de recursos para redes LTE utilizando bandas não-licenciadas com diferentes modelos de ocupação do Wi-Fi.

O conhecimento prévio do modo de funcionamento das ferramentas MATLAB e CPLEX, representam uma facilitação no processo de geração de novos resultados, assim como conhecimentos de técnicas de modelagens de programação, tanto linear, quanto estocástica. As principais barreiras iniciais que foram encontradas neste trabalho poderão ser quebradas mais rapidamente por novos pesquisadores que tenham conhecimentos acerca desse conjunto de ferramentas e das técnicas de programação matemática utilizadas.

Referências Bibliográficas

- [1] ABDEL-RAHMAN, M. J.; ABDELRAHEEM, M.; MACKENZIE, A.; CARDOSO, K.; KRUNZ, M. **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*, p. 1–6, April 2016.
- [2] ABHAYAWARDHANA, V. S.; WASSELL, I. J.; CROSBY, D.; SELLARS, M. P.; BROWN, M. G. **Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems.** In: *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, volume 1, p. 73–77 Vol. 1, May 2005.
- [3] AFAQUI, M. S.; VILLEGAS, E.; AGUILERA, E. **IEEE 802.11 ax: Challenges and requirements for future high efficiency wifi.** *IEEE Wireless Communications*, 99:2–9, 2016.
- [4] ALLIANCE, M. **Multefire release 1.0 technical paper: A new way to wireless.** *white paper, Jan, 2017.*
- [5] ANAND M. BASWADE, SHASHI KIRAN M R, B. R. T.; A., A. F. **On placement of LAA/LTE-U base stations in heterogeneous wireless networks.** In: *International Conference on Distributed Computing and Networking (ICDCN)*, Jan 2018.
- [6] BABAEI, A.; ANDREOLI-FANG, J.; PANG, Y.; HAMZEH, B. **On the impact of LTE-U on Wi-Fi performance.** *International Journal of Wireless Information Networks*, 22(4):336–344, 2015.
- [7] BENÍTEZ, LÓPEZ, M.; CASADEVALL, F. **Spectrum Usage Models for the Analysis, Design and Simulation of Cognitive Radio Networks**, p. 27–73. Springer Netherlands, Dordrecht, 2012.
- [8] BIANCHI, G.; FRATTA, L.; OLIVERI, M. **Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs.** In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1996. PIMRC'96., Seventh IEEE International Symposium on*, volume 2, p. 392–396. IEEE, 1996.

- [9] CABIANCA, L. A. **Redes LAN/MAN Wireless I: Padrões 802.11 a, b, e g**, 2007.
- [10] CALLENDAR, M. H. **International mobile telecommunications-2000 standards efforts of the ITU [guest editorial]**. *IEEE Personal Communications*, 4(4):6–7, 1997.
- [11] CANO, C.; LEITH, D. J. **Coexistence of WiFi and LTE in unlicensed bands: A proportional fair allocation scheme**. In: *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, p. 2288–2293, June 2015.
- [12] CANO, C.; LOPEZ-PEREZ, D.; CLAUSSEN, H.; LEITH, D. J. **Using LTE in unlicensed bands: Potential benefits and coexistence issues**. *IEEE Communications Magazine*, 54(12):116–123, December 2016.
- [13] CASARES-MIRANDA, F. P.; CAMACHO-PEÑALOSA, C.; CALOZ, C. **High-gain active composite right/left-handed leaky-wave antenna**. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 54(8):2292–2300, 2006.
- [14] CAVALCANTE, A. M.; ALMEIDA, E.; VIEIRA, R. D.; CHOUDHURY, S.; TUOMAALA, E.; DOPPLER, K.; CHAVES, F.; PAIVA, R. C. D.; ABINADER, F. **Performance evaluation of LTE and Wi-Fi coexistence in unlicensed bands**. In: *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, p. 1–6, June 2013.
- [15] CHAMBERS, D. **Multefire lights up the path for universal wireless service**. *white paper, ThinkSmallCell and Multe-Fire Alliance*, 2016.
- [16] CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Chance-constrained programming**. *Management Science*, 6(1):73–79, 1959.
- [17] CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints**. *Operations Research*, 11(1):18–39, 1963.
- [18] CHEN, B.; CHEN, J.; GAO, Y.; ZHANG, J. **Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz with corresponding deployment scenarios: A survey**. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1):7–32, 2017.
- [19] CHEN, J.; SHEU, S.-T.; YANG, C.-A. **A new multichannel access protocol for IEEE 802.11 ad hoc wireless LANs**. In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003. 14th IEEE Proceedings on*, volume 3, p. 2291–2296. IEEE, 2003.
- [20] CHOI, S.; DEL PRADO, J.; MANGOLD, S.; OTHERS. **IEEE 802.11 e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation**. In: *Communications, 2003. ICC'03. IEEE International Conference on*, volume 2, p. 1151–1156. IEEE, 2003.

- [21] CISCO SYSTEMS, INC.. **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper**, 2017.
- [22] CODDING, G. A.; RUTKOWSKI, A. M. **The International Telecommunication Union in a changing world**. Artech House on Demand, 1982.
- [23] CROW, B. P.; WIDJAJA, I.; KIM, J. G.; SAKAI, P. T. **IEEE 802.11 wireless local area networks**. *IEEE Communications Magazine*, 35(9):116–126, Sept 1997.
- [24] DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J.; BEMING, P. **3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband**. 01 2007.
- [25] DENG, D.-J.; CHEN, K.-C.; CHENG, R.-S. **IEEE 802.11ax: Next generation wireless local area networks**. In: *Heterogeneous networking for quality, reliability, security and robustness (QShine), 2014 10th international conference on*, p. 77–82. IEEE, 2014.
- [26] FOURNIER, L. **LTE**. 2011.
- [27] GHAFGHAZI, H.; EL MOUGY, A.; MOUFTAH, H. T.; ADAMS, C. **Classification of technological privacy techniques for LTE-based public safety networks**. In: *Proceedings of the 10th ACM symposium on QoS and security for wireless and mobile networks*, p. 41–50. ACM, 2014.
- [28] HARKUSHA, S.; HARKUSHA, O.; OLKHOVSKY, V. **Result research model of scheduling block allocation in downlink LTE**. In: *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2016 Third International Scientific-Practical Conference*, p. 92–95. IEEE, 2016.
- [29] HAZAS, M.; MORLEY, J.; BATES, O.; FRIDAY, A. **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*, p. 14:1–14:5, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [30] HOLMA, H.; TOSKALA, A. **WCDMA for UMTS: HSPA evolution and LTE**. John Wiley & sons, 2007.
- [31] HOLMA, H.; TOSKALA, A. **LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access**. John Wiley & Sons, 2009.
- [32] HOSKING, J. R.; WALLIS, J. R. **Parameter and quantile estimation for the generalized pareto distribution**. *Technometrics*, 29(3):339–349, 1987.

- [33] HWANG, I.; SONG, B.; SOLIMAN, S. S. **A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks.** *IEEE Communications Magazine*, 51(6):20–27, June 2013.
- [34] IKUNO, J. C.; WRULICH, M.; RUPP, M. **System level simulation of LTE networks.** In: *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, 2010 IEEE 71st, p. 1–5. IEEE, 2010.
- [35] JU, H.-J.; RUBIN, I.; KUAN, Y.-C. **An adaptive RTS/CTS control mechanism for IEEE 802.11 MAC protocol.** In: *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual*, volume 2, p. 1469–1473. IEEE, 2003.
- [36] KHOROV, E.; KIRYANOV, A.; LYAKHOV, A. **IEEE 802.11 ax: how to build high efficiency WLANs.** In: *Engineering and Telecommunication (EnT), 2015 International Conference on*, p. 14–19. IEEE, 2015.
- [37] KO, H.; LEE, J.; PACK, S. **A fair listen-before-talk algorithm for coexistence of LTE-U and WLAN.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(12):10116–10120, Dec 2016.
- [38] KWAN, R.; PAZHYANNUR, R.; SEYMOUR, J.; CHANDRASEKHAR, V.; SAUNDERS, S.; BEVAN, D.; OSMAN, H.; BRADFORD, J.; ROBSON, J.; KONSTANTINOU, K. **Fair coexistence of licensed assisted access LTE (LAA-LTE) and Wi-Fi in unlicensed spectrum.** In: *7th Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEECE)*, p. 13–18, 2015.
- [39] LABIB, M.; REED, J. H.; MARTONE, A. F.; ZAGHLOUL, A. I. **Coexistence between radar and LTE-U systems: Survey on the 5 GHz band.** In: *2016 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*, p. 1–2, Jan 2016.
- [40] LEE, J.-S.; SU, Y.-W.; SHEN, C.-C. **A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, zigbee, and Wi-Fi.** In: *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*, p. 46–51. IEEE, 2007.
- [41] LINO, F.; CARVALHO, O. **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, 2008.
- [42] LOA, K.; WU, C.-C.; SHEU, S.-T.; YUAN, Y.; CHION, M.; HUO, D.; XU, L. **IMT-advanced relay standards [WiMAX/LTE update].** *IEEE Communications Magazine*, 48(8), 2010.

- [43] MAGAZINE, M. J.; CHERN, M. **A note on approximation schemes for multidimensional knapsack problems.** *Mathematics of Operations Research*, 9(2):244–247, 1984.
- [44] MANGOLD, S.; CHOI, S.; MAY, P.; KLEIN, O.; HIERTZ, G.; STIBOR, L. **IEEE 802.11 e wireless LAN for quality of service.** In: *Proc. European Wireless*, volume 2, p. 32–39, 2002.
- [45] MARCUS, M. J. **Unlicensed cognitive sharing of TV spectrum: the controversy at the federal communications commission.** *IEEE Communications Magazine*, 43(5):24–25, May 2005.
- [46] MARQUES NETO, F. D. A. **Direito das telecomunicações e ANATEL.** *Direito administrativo econômico. São Paulo: Malheiros*, p. 71, 2000.
- [47] MCKAY, D. N.; NAGHSHINEH, M.; OLSEN, C. M.; REZVANI, B.; KERMANI, P.; HORTENSIUS, P. D. **Extensions to distributed MAC protocols with collision avoidance using RTS/CTS exchange**, Dec. 1 1998. US Patent 5,844,905.
- [48] MCKEOWN, N.; ANDERSON, T.; BALAKRISHNAN, H.; PARULKAR, G.; PETERSON, L.; REXFORD, J.; SHENKER, S.; TURNER, J. **Openflow: Enabling innovation in campus networks.** *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 38(2):69–74, Mar. 2008.
- [49] NIU, Y.; LI, Y.; JIN, D.; SU, L.; VASILAKOS, A. V. **A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges.** *Wireless Networks*, 21(8):2657–2676, Nov 2015.
- [50] ONG, E. H.; KNECKT, J.; ALANEN, O.; CHANG, Z.; HUOVINEN, T.; NIHTILÄ, T. **IEEE 802.11 ac: Enhancements for very high throughput WLANs.** In: *Personal indoor and mobile radio communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd international symposium on*, p. 849–853. IEEE, 2011.
- [51] 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.; FALLGREN, M. **Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the metis project.** *IEEE Communications Magazine*, 52(5):26–35, May 2014.
- [52] PARK, M. **IEEE 802.11ac: Dynamic bandwidth channel access.** In: *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, p. 1–5. IEEE, 2011.
- [53] PERAHIA, E.; CORDEIRO, C.; PARK, M.; YANG, L. L. **IEEE 802.11ad: Defining the next generation multi-Gbps Wi-Fi.** In: *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2010 7th IEEE*, p. 1–5. IEEE, 2010.

- [54] PERAHIA, E.; GONG, M. X. **Gigabit wireless LANs: an overview of IEEE 802.11ac and 802.11ad**. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 15(3):23–33, 2011.
- [55] RANIWALA, A.; CKER CHIUH, T. **Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network**. In: *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, volume 3, p. 2223–2234 vol. 3, March 2005.
- [56] RATASUK, R.; MANGALVEDHE, N.; GHOSH, A. **LTE in unlicensed spectrum using licensed-assisted access**. In: *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, p. 746–751, Dec 2014.
- [57] SAARI, M.; BIN BAHARUDIN, A. M.; SILLBERG, P.; HYRYNSALMI, S.; YAN, W. **LoRa-A survey of recent research trends**, 05 2018.
- [58] SAGARI, S.; BAYSTING, S.; SAHA, D.; SESKAR, I.; TRAPPE, W.; RAYCHAUDHURI, D. **Coordinated dynamic spectrum management of LTE-U and Wi-Fi networks**. In: *2015 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, p. 209–220, Sept 2015.
- [59] SANTANA, P. M. D. **Soluções de coexistência LTE/Wi-Fi em banda não licenciada**. Master's thesis, Brasil, 2017.
- [60] SAWAHASHI, M.; KISHIYAMA, Y.; MORIMOTO, A.; NISHIKAWA, D.; TANNO, M. **Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [coordinated and distributed MIMO]**. *IEEE Wireless Communications*, 17(3), 2010.
- [61] STOYAN, D.; STOYAN, H. **On one of matérn's hard-core point process models**. *Mathematische Nachrichten*, 122(1):205–214, 1985.
- [62] TAO, T.; HAN, F.; LIU, Y. **Enhanced LBT algorithm for LTE-LAA in unlicensed band**. In: *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on*, p. 1907–1911. IEEE, 2015.
- [63] WELLENS, M. **Empirical modelling of spectrum use and evaluation of adaptive spectrum sensing in dynamic spectrum access networks**. PhD thesis, Aachen, 2010. Zsfassung in dt. u. engl. Sprache; Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010.
- [64] XIAO, Y. **IEEE 802.11n: enhancements for higher throughput in wireless LANs**. *IEEE Wireless Communications*, 12(6):82–91, 2005.
- [65] ZHANG, J.; CHO, J. **Methods of assigning resources for the uplink control channel in LTE**, Apr. 3 2012. US Patent 8,149,767.

- [66] ZHANG, N.; ZHANG, S.; WU, S.; REN, J.; MARK, J. W.; SHEN, X. **Beyond coexistence: Traffic steering in LTE networks with unlicensed bands.** *IEEE Wireless Communications*, 23(6):40–46, 2016.