



UM MECANISMO COOPERATIVO PARA ACESSO DINÂMICO AO  
ESPECTRO EM BANDAS DE RADAR

Carlos de Souza Lima Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: José Ferreira de Rezende  
Luiz Antonio Pereira da Silva

Rio de Janeiro  
Julho de 2015

UM MECANISMO COOPERATIVO PARA ACESSO DINÂMICO AO  
ESPECTRO EM BANDAS DE RADAR

Carlos de Souza Lima Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

---

Prof. Luiz Antonio Pereira da Silva, Ph.D.

---

Prof. Cristiano Bonato Both, Ph.D.

---

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JULHO DE 2015

Lima Junior, Carlos de Souza

Um Mecanismo Cooperativo para Acesso Dinâmico ao Espectro em Bandas de Radar/Carlos de Souza Lima Junior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XVII, 111 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: José Ferreira de Rezende

Luiz Antonio Pereira da Silva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 108 – 111.

1. LTE. 2. Bandas de radar. 3. Acesso dinâmico ao espectro. I. Rezende, José Ferreira de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*"Nascer, morrer, renascer ainda,  
progredir sempre, tal é a Lei."  
Allan Kardec*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, Àquele que é a causa primária de todas as coisas, e sem o qual não estaria presente na vida atual: Deus, Inteligência Suprema. Agradeço pela oportunidade de vida que me foi dada, e pelos obstáculos e barreiras impostos na minha jornada, e que tornaram minhas conquistas uma realidade. Sem elas, não estaríamos comemorando nossas vitórias, e progredindo sempre. Obrigado pela saúde física, mental e espiritual que me foram cruciais para concluir com êxito mais essa conquista.

Agradeço ao meu orientador, professor Rezende, por todo o tempo dedicado em nossas reuniões, pelos seus ensinamentos e por seu companheirismo. Além de orientador, posso considerá-lo como um amigo que tive ao meu lado sempre que precisei. Obrigado pela oportunidade de aprendizado em sua disciplina de "Redes Móveis", sem dúvida fez diferença para a minha escolha na área de redes sem fio. Sua aula e sua didática, a forma como você passa o conhecimento, são verdadeiros exemplos de dedicação, e que estarão comigo durante minhas experiências profissionais. Agradeço também pelos projetos que estive envolvido e que me auxiliaram no profissional que sou hoje. Nos vemos no doutorado! Obrigado por todo apoio, em todos os momentos, professor e amigo, Rezende.

Agradeço também ao meu co-orientador, Luiz DaSilva, pelo seu apoio, e que me abriu as portas para o tema no qual trabalhei. Obrigado pelos momentos de trabalho em conjunto. Agradeço a sua colaboração e a de seu aluno de doutorado, Francisco Paisana, que foi essencial para o meu aprofundamento no tema. Seu período de trabalho aqui no Brasil fez toda a diferença. Boa parte deste trabalho é fruto do arcabouço de conhecimento do Francisco. Obrigado por fazerem parte do processo de desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca, professores Cristiano Bonato e Aloysio de Castro, por terem aceitado o convite e doado o tempo de vocês para me auxiliar durante esta etapa do trabalho. Agradeço, desde já, suas contribuições.

Agradeço aos meus pais, Carlos e Maria, por todo o apoio e amor incondicional que me foi dado, em todos os dias, em cada segundo da minha vida. Obrigado pela base educacional e os recursos necessários que me fizeram chegar até aqui. Além disso, agradeço pela base moral, que foi crucial para meu desempenho acadêmico e

dedicação nos estudos.

Agradeço aos meus irmãos, Saulo e Sandro, por todo estímulo, apoio e motivação que me deram. Foram cruciais desde a escolha do Mestrado até sua conclusão. Sem vocês, a caminhada seria mais pesada e árdua, certamente. Obrigado por tudo, irmãos. Amo vocês.

Agradeço à Andressa Viana, minha namorada, por toda a confiança em mim depositada. Por me motivar nos momentos de desânimo, por me dar forças quando precisei, e por ser minha melhor amiga. Esteve sempre ao meu lado, ajudando a entender minhas dificuldades, para superá-las, e descobrir minhas qualidades, para saber usá-las. Obrigado por ser tão presente na minha vida. Você fez toda a diferença durante estes dois anos de muito estudo e dedicação. Te amo.

Obrigado aos amigos do LAND, que foram imprescindíveis em todos os momentos, durante todas as horas que passei no Fundão. Agradeço por toda ajuda prestada sempre que precisei, pelas caronas, almoços, conversas e auxílio. Obrigado, Carol, pelo seu colo de mãe, que certamente faz toda a diferença, tornando o ambiente de trabalho mais leve e familiar. Obrigado por todos os momentos de apoio psicológico que precisei, para enfrentar as dificuldades do dia a dia. Agradeço aos amigos de jornada, Raphael, Gaspare, Jefferson, André, Marcel, Bruno Rafaeli, Guilherme Domingues, Pedro Eusébio, Thársus, Guilherme Sengès, Gabriel Mendonça, Gustavo e Joanna Manjarres. Obrigado pelo companheirismo e pela amizade de vocês, e que tornaram o trabalho ainda mais leve e prazeroso. Este trabalho possui uma parte de cada um. Estão presentes em cada página, cada linha de código e em cada hora doada para a realização deste trabalho. Obrigado por tudo. Agradeço, também, aos professores Edmundo de Souza e Silva, Daniel Ratton e Rosa Maria pelos seus ensinamentos e apoio a todo instante. Certamente, vocês possuem o diferencial de preocupação e presença ao lado dos alunos. Nós não só precisamos de um apoio profissional com uma extrema bagagem de muitas experiências ao nosso lado, precisamos de um companheiro que confia no nosso trabalho e nos estimula alcançar novos patamares, motivando e mostrando que somos capazes, sim, de atingir todas as metas pretendidas, além de servirem de exemplos de esforço e dedicação por tudo que já conquistaram. Muito obrigado, professores do LAND.

Agradeço também a todos os colegas que me acolheram no tempo que estive no GTA: Vitor Borges, Dayro Augusto, Pedro Henrique Valverde, Alyson de Jesus e Marcus de Lima Braga. Foram minhas referências durante os períodos iniciais do Mestrado, e que me serviram de estímulo a todo tempo. Agradeço por cada momento de apoio recebido de vocês. Agradeço também aos professores do GTA, Miguel Campista, Luís Henrique e Aloysio de Castro, que foram minha porta de entrada para a pós-graduação da COPPE. Agradeço por todo o apoio e atenção a mim concedido durante o período que estive sendo amparado pelo GTA. Agradeço

também à competência e o conhecimento absorvido nas disciplinas de "Redes de Computadores", "Protocolos de Comunicação" e "Roteamento em Redes". Aproveitei cada segundo de aula com vocês. Agradeço por terem me apoiado durante a minha fase inicial do Mestrado.

Por fim, agradeço aos meus amigos, aqueles que alegam o meu dia e que me fazem agradecer por tê-los ao meu redor. Por se tratarem de muitos, e sem querer cometer injustiças, prefiro não citar cada um. Mas, saibam que são essenciais para mim. O fruto de todo o esforço e vontade nasce em vocês, através dos momentos alegres e divertidos. Espero tê-los sempre ao meu lado. E, podem contar sempre comigo. Amigos do Legionárias de Maria, amigos da COMEERJ, amigos da UFF, amigos de pré-vestibular, amigos de ensino médio e/ou fundamental que estão presentes até hoje em minha vida, e amigos de vida, seja ela do plano visível ou invisível. Agradeço de coração por todos vocês fazerem parte da história que hoje escrevo.

Agradeço a todos os Mestres e professores que tive. Vocês, direta e indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento, não só do trabalho que desenvolvi, mas de quem eu sou hoje. Muito obrigado.

E, caso você que esteja lendo esta dissertação não esteja diretamente citado nos agradecimentos acima, sinta-se incluído aqui. Agradeço por doar seu tempo à leitura do trabalho que realizei. Espero que consiga ajudá-lo de alguma forma. Obrigado pela sua atenção.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UM MECANISMO COOPERATIVO PARA ACESSO DINÂMICO AO  
ESPECTRO EM BANDAS DE RADAR

Carlos de Souza Lima Junior

Julho/2015

Orientadores: José Ferreira de Rezende  
Luiz Antonio Pereira da Silva

Programa: Engenharia Elétrica

A popularização dos dispositivos móveis, dada pela ascensão de *smartphones* e *tablets*, vem se tornando uma tendência mundial e de uso indispensável, proporcionando uma grande demanda de acesso ao meio sem fio. Em contrapartida, diante deste cenário, estão os desafios relacionados ao compartilhamento do espectro de frequências que, devido às licenças de uso, mantém as mesmas reservadas para uso exclusivo. Com isso, define-se o acesso dinâmico ao espectro das faixas licenciadas, quando estas permanecem inutilizadas. É o caso das bandas de radar que, atualmente, vem sendo estudadas por agências reguladoras internacionais, dadas as características de operação periódica e bem comportada de utilização do espectro. Tendo em vista o uso oportunista em bandas de radar, esta dissertação é dividida em duas partes: a primeira propõe um mecanismo DSA cooperativo, em que é levado em conta o nível de interferência agregada no radar. Os resultados obtidos mostram que o modelo proposto consegue mitigar o problema da interferência agregada, evitando efeitos nocivos aos serviços do primário. A segunda parte do trabalho implementa o mecanismo proposto inserido do contexto das redes LTE heterogêneas, que são definidas pela implantação de femtocélulas em ambientes *indoor*, que compartilham os recursos do meio físico com a macrocélula. Foi utilizado o simulador de redes ns-3 para a implementação do modelo de ambiente de radiofrequência do radar, dos mecanismos propostos na literatura e do método cooperativo. Os resultados mostram que, para o uso das bandas de radar por HeNBs, o mecanismo cooperativo consegue manter um desempenho satisfatório para os secundários, equiparado com os mecanismos da literatura, e garantindo que o sistema de radar não seja impactado por interferências nocivas geradas pelas transmissões secundárias.



Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## A COOPERATIVE APPROACH FOR DYNAMIC SPECTRUM ACCESS IN RADAR BANDS

Carlos de Souza Lima Junior

July/2015

Advisors: José Ferreira de Rezende  
Luiz Antonio Pereira da Silva

Department: Electrical Engineering

The popularity of mobile devices, given the rise of smartphones and tablets, is becoming a global trend and with an indispensable use, turning into a massive demand for the wireless access medium. However, before this scenario, the challenges are related to the share of the frequency spectrum that due to the use of licenses, maintains the reserved state even in idle periods. Thus, it defines the dynamic spectrum access of licensed frequencies when they remain unused. It's the case of radar bands that, recently, has been studied by regulatory agencies, due to its periodic and well known characteristics of spectrum usage. Given the opportunistic usage of radar bands, this master thesis is divided in two parts: the first proposes a cooperative DSA mechanism that is taken into account the aggregate interference level on the radar. The results shows the mitigation of the aggregate interference problem by the proposed mechanism, avoiding harmful interferences on the primary systems. The second part seeks to implement the proposed mechanism within the context of heterogeneous LTE networks, defined by deploying femtocells in indoor environments, sharing the medium access with a macro cell. It was used the ns-3 simulator for the implementation of the radar's radio frequency environment, the proposed mechanisms in the literature and the cooperative method. The results show that, for the usage of radar bands by HeNBs, the cooperative approach can ensure an adequate performance, equivalent to the proposed approaches in literature, and ensuring that radar systems do not have their services degraded by the secondary transmissions.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Organização do Texto . . . . .	6
<b>2 Trabalhos Relacionados</b>	<b>7</b>
2.1 Acesso Dinâmico ao Espectro em Bandas de Radar . . . . .	7
2.1.1 Método de Sensoriamento do Espectro por Detecção de Energia	10
2.1.2 Cálculo do limiar de referência para sistemas de radar . . . . .	12
2.2 Os Mecanismos DSA em Bandas de Radar . . . . .	15
2.2.1 <i>Dynamic Frequency Selection</i> (DFS) . . . . .	15
2.2.2 Mecanismo DFS-Temporal (DFS-T) . . . . .	17
2.2.3 <i>Main Beam Occupied</i> . . . . .	19
2.3 Os Desafios enfrentados pelo Acesso Dinâmico em Bandas de Radar .	19
<b>3 Cooperação entre UP e USs</b>	<b>22</b>
3.1 Mecanismo Cooperativo: Visão geral . . . . .	22
3.2 Modelo do ambiente de acesso ao meio compartilhado entre Radar e USs . . . . .	24
3.3 Definição e Cálculo do Limiar Dinâmico . . . . .	25
3.4 Comportamento do UP . . . . .	27
3.5 Comportamento do US . . . . .	28
3.6 Avaliação de Desempenho com Simulador Próprio . . . . .	29
3.6.1 Ambiente de simulação . . . . .	30
3.6.2 Resultados . . . . .	31
3.7 Conclusões do Capítulo . . . . .	34
<b>4 Utilização da banda de radar em Redes <i>Long-Term Evolution</i> (LTE) Heterogêneas</b>	<b>37</b>
4.1 Redes LTE . . . . .	38

4.1.1	E-UTRAN e a Tecnologia de acesso ao meio . . . . .	39
4.1.2	Conexão entre E-UTRAN e EPC . . . . .	43
4.1.3	Pilha de protocolos do LTE . . . . .	44
4.1.4	Estrutura do <i>Subframe</i> . . . . .	47
4.2	Redes Heterogêneas de quarta geração . . . . .	48
4.3	Proposta do modelo de ambiente de acesso ao meio em bandas de radar para o simulador de redes ns-3 . . . . .	51
4.3.1	Simulador de redes ns-3 e o módulo LTE . . . . .	51
4.3.2	Acesso ao meio em bandas de radar . . . . .	53
4.3.3	Implementação . . . . .	58
4.3.4	Verificação do modelo proposto . . . . .	61
4.3.5	Vantagens no uso da banda de radar em redes LTE Heterogêneas . . . . .	65
4.4	Conclusões do Capítulo . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Implementação dos mecanismos DSA em dispositivos LTE</b>	<b>79</b>
5.1	Implementação dos mecanismos DSA propostos na literatura . . . . .	79
5.1.1	Resultados . . . . .	80
5.2	Proposta do Mecanismo DSA Cooperativo em Redes LTE . . . . .	85
5.2.1	Arquitetura SAS proposta . . . . .	86
5.2.2	Avaliação de Desempenho com o simulador de redes ns-3 . . . . .	92
5.3	Conclusões do Capítulo . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>103</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	105
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>108</b>

# Lista de Figuras

2.1	Portadora e esquemas de modulação utilizados em sistemas de radar [1].	8
2.2	Padrões de escaneamento existentes em sistemas de radar [1]. . . . .	9
2.3	Ilustração dos pulsos transmitidos na direção do lóbulo principal [1]. .	9
2.4	Oportunidades de uso temporal por rádios cognitivos na faixa do espectro de radar. . . . .	10
2.5	Ilustração das zonas de oportunidades no ambiente de radiofrequência dos sistemas de radar [2]. . . . .	15
2.6	Operação do mecanismo DFS. . . . .	16
2.7	Operação do mecanismo DFS-T. . . . .	18
2.8	Utilização do ambiente de radiofrequência pelo mecanismo <i>MainBeam</i> .	19
2.9	Exemplo do problema de limiar restritivo. . . . .	21
3.1	Operação do mecanismo cooperativo - Visão geral. . . . .	23
3.2	Definição das fatias de operação no ambiente de acesso ao meio do radar. . . . .	24
3.3	Variação no tamanho da zona de exclusão com a variação do limiar de referência. . . . .	26
3.4	Nível de interferência agregada no radar para cada mecanismo avaliado.	33
3.5	Evolução da interferência agregada por USs ativos. . . . .	34
3.6	Histograma da porcentagem de USs inseridos em cada uma das zonas de operação. . . . .	35
4.1	Topologia composta pelos elementos da rede LTE. . . . .	39
4.2	Alocação de recursos entre eNB e UE. . . . .	41
4.3	Ilustração dos RBs inseridos na alocação de recursos LTE. . . . .	42
4.4	Diferença de uso do meio entre as tecnologias FDD e TDD. . . . .	43
4.5	Pilha de protocolos definida no plano de usuário, para cada interface da rede LTE [3]. . . . .	44
4.6	Pilha de protocolos definida no plano de controle, para cada interface da rede LTE [3]. . . . .	46

4.7	Estrutura do <i>subframe</i> ( <i>uplink</i> e <i>downlink</i> ) no envio de mensagens de controle e dados [4]. . . . .	48
4.8	Mapa de calor ilustrado em um ambiente HetNet 4G, gerado com o módulo LTE do ns-3. Eixo <i>x</i> representa a largura da região, em metros. Eixo <i>y</i> define a extensão do mapa de calor, em metros. Ambos se encontram limitadas em 5 km. . . . .	50
4.9	Conjunto de entidades da rede LTE definida no modelo de simulação do ns-3 [4]. . . . .	52
4.10	Modelo do ambiente de acesso ao meio em bandas de radar. . . . .	55
4.11	Mapeamento da localização do US e do lóbulo principal de acordo com seus ângulos de referência . . . . .	56
4.12	Cenário utilizado para a verificação do modelo. . . . .	61
4.13	Comportamento da vazão instantânea no canal de <i>downlink</i> durante o tempo de rotação do radar. . . . .	63
4.14	Vazão instantânea a partir da variação da distância do UE. . . . .	64
4.15	Rede LTE Heterogênea utilizada no ambiente de simulação. . . . .	65
4.16	Ocupação da bandas do sistema FDD-LTE na banda de radar. . . . .	66
4.17	Topologia completa (E-UTRAN + EPC) da rede instanciada no ambiente de simulação. . . . .	68
4.18	Localização da rede LTE Heterogênea em relação à localização do lóbulo principal, no início e fim da simulação. . . . .	69
4.19	Vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas. . . . .	71
4.20	Vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos UEs da macrocélula. . . . .	72
4.21	Vazão agregada dos usuários das femtocélulas - 300m de cobertura. . . . .	74
4.22	Vazão agregada dos usuários da macrocélula - 300m de cobertura. . . . .	75
4.23	Comportamento da vazão agregada com o aumento do raio de cobertura do ambiente de simulação. . . . .	76
5.1	Período de sensoriamento do espectro localizado entre TTIs. . . . .	80
5.2	Vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, abrangendo as zonas 1, 2 e 3 - 100m de cobertura. . . . .	82
5.3	Vazão agregada do tráfego TCP dos usuários da macrocélula nas zonas 1, 2 e 3 - 100m de cobertura. . . . .	83
5.4	Vazão agregada do tráfego TCP dos usuários das femtocélulas nas zonas 1, 2 e 3 - 300m de cobertura. . . . .	84
5.5	Vazão agregada do tráfego TCP dos usuários da macrocélula nas zonas 1, 2 e 3 - 300m de cobertura. . . . .	85

5.6	Arquitetura SAS proposta para as redes LTE. Utilização do mecanismo cooperativo. . . . .	86
5.7	Troca de mensagens RRC no mecanismo SAS Cooperativo. . . . .	88
5.8	Exemplo - problema da atualização do limiar. US $y$ é inserido na zona de exclusão para o novo limiar calculado, a partir do uso do espectro pelo US $x$ . . . . .	89
5.9	Fluxograma esquemático - Operação do controle de admissão pelo US. 91	
5.10	Fluxograma esquemático - Operação do controle de admissão pela GDB. . . . .	92
5.11	Porcentagem de tempo em que a interferência ultrapassa o limiar e vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, para as zonas 1 e 2 - 100m de cobertura. . . . .	95
5.12	Porcentagem de tempo em que a interferência ultrapassa o limiar e vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, para as zonas 2 e 3 - 100m de cobertura. . . . .	96
5.13	Níveis de pico da interferência agregada no sistema de radar para cada densidade de USs - 100m de cobertura. . . . .	97
5.14	Porcentagem de tempo em que a interferência ultrapassa o limiar e vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, para as zonas 1 e 2 - 300m de cobertura. . . . .	98
5.15	Porcentagem de tempo em que a interferência ultrapassa o limiar e vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, para as zonas 2 e 3 - 300m de cobertura. . . . .	99
5.16	Vazão agregada do tráfego TCP de UEs associados a macrocelula, incluindo o mecanismo cooperativo - 300m de cobertura. . . . .	100
5.17	Níveis de pico da interferência agregada no sistema de radar para cada densidade de USs - 300m de cobertura. . . . .	101

# Lista de Abreviaturas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> , p. 38
ARFCN	<i>Absolute Radio-Frequency Channel Number</i> , p. 46
BLER	<i>Block Error Rate</i> , p. 50
CBR	<i>Constant bitrate</i> , p. 31
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i> , p. 41
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> , p. 32
DSA	<i>Dynamic Spectrum Access</i> , p. 2
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> , p. 39
ED	<i>Energy Detection</i> , p. 9
EPC	<i>Evolved Packet Core</i> , p. 39
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , p. 4
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i> , p. 42
GTP	<i>GPRS Tunnelling Protocol</i> , p. 44
HeNB	<i>Home eNodeB</i> , p. 5
HetNet	<i>Heterogeneous Network</i> , p. 5
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , p. 1
LFM	<i>Linear Frequency Modulation</i> , p. 8
LTE	<i>Long-Term Evolution</i> , p. 5
MAC	<i>Medium Access Control</i> , p. 45
MME	<i>Mobility Management Entity</i> , p. 40

MeNB	<i>Macro eNodeB</i> , p. 5
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> , p. 38
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , p. 38
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i> , p. 47
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i> , p. 47
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> , p. 45
PDN	<i>Packet Data Network</i> , p. 38
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> , p. 47
PM	<i>Phase Modulation</i> , p. 8
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i> , p. 47
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i> , p. 47
QoE	<i>Quality of Experience</i> , p. 40
QoS	<i>Quality of Service</i> , p. 44
RB	<i>Resource Block</i> , p. 41
RLC	<i>Radio Link Control</i> , p. 45
RRC	<i>Radio Resource Control</i> , p. 46
SAS	<i>Spectrum Access System</i> , p. 5
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , p. 2
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> , p. 41
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , p. 12
SRS	<i>Sounding Reference Signal</i> , p. 47
TDD	<i>Time Division Duplex</i> , p. 42
Tcl	<i>Tool Command Language</i> , p. 22
UE	<i>User Equipament</i> , p. 6
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , p. 3



UIT	União Internacional de Telecomunicações, p. 6
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> , p. 39
UP	Usuário Primário, p. 2
US	Usuário Secundário, p. 2
VoIP	<i>Voice over IP</i> , p. 40
eNB	<i>Evolved NodeB</i> , p. 5
ns	<i>Network Simulator</i> , p. 6

# Capítulo 1

## Introdução

Através da grande ascensão e popularidade das tecnologias de redes sem fio, as redes celulares de terceira e quarta geração (3G e 4G), assim como redes domésticas do padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi), vêm sendo cada vez mais adotadas por grande parcela da população. Dada a popularização da Internet, o surgimento de *smartphones*, de aplicativos móveis que usam a rede global, e a massificação das redes sociais, a necessidade por se manter conectado à rede global constantemente surge como uma tendência mundial nos dias atuais. Frente a este cenário, estão os desafios ascendentes na área de redes sem fio, dentre eles a escassez de recursos, tendo em vista a grande competitividade de acesso a tais redes que surgem diante da quantidade massiva de dispositivos móveis concentrados em grandes centros urbanos.

A escassez de espectro, diante das várias tecnologias de redes sem fio existentes, é uma realidade que surge diante do aumento na demanda e do modelo atual de uso deste recurso, adotado em âmbito mundial pelas agências reguladoras de telecomunicações, que dividem o espectro em dois tipos: o licenciado e o não-licenciado. São denominados espectro de frequências do tipo licenciado aqueles que são utilizados somente por dispositivos que detêm a licença de uso. Esta determinação é dada pela agência reguladora, que estipula o uso da tecnologia, os parâmetros de operação a serem adotados pelos dispositivos licenciados e o espaço geográfico em que a licença é válida. No entanto, algumas faixas do espectro licenciado permanecem pouco utilizadas, ou até mesmo inutilizadas, em diversas regiões. Muitas já não são utilizadas devido ao desuso de tecnologias que passaram por evoluções, mas que detiveram o uso de partes do espectro, permanecendo com suas licenças de operação exclusiva até os dias atuais. Outros serviços licenciados utilizam suas fatias de espectro de forma temporal, devido às suas características de operação, fazendo com que tais fatias permaneçam ociosas temporalmente. Além dessa disponibilidade temporal, tem-se também a disponibilidade espacial, decorrente da existência de regiões fora da área de cobertura dos serviços disponíveis.

O espectro de frequências do tipo não-licenciado é utilizado por qualquer tipo

de dispositivo sem a necessidade de uso de licença obrigatória que regulamenta sua operação. São apenas definidos limites de potência de transmissão, evitando interferências nocivas entre os diversos dispositivos que operam em uma mesma região. Trata-se do caso do padrão IEEE 802.11 [5], utilizado amplamente para diversos tipos de aplicações. Logo, devido ao aumento na densidade de dispositivos que utilizam a faixa não-licenciada do espectro, e pelo fato desta ser bastante limitada, o desempenho e qualidade dos serviços disponibilizados vem sendo reduzidos drasticamente.

Devido à baixa utilização de determinadas faixas do espectro licenciado, e tendo em vista a escassez de recursos frente à grande demanda de uso das redes sem fio, o conceito de rádios cognitivos surge como possível solução. O compartilhamento oportunista de partes ociosas do espectro de frequências possibilitam o uso eficiente deste recurso. Isto se dá, através da capacidade que os rádios cognitivos possuem em detectar a presença de dispositivos licenciados em suas regiões de operação e verificar quais faixas do espectro licenciado se encontram livres. Sendo assim, o rádio cognitivo adapta seus parâmetros de transmissão para utilizar os espaços em branco (*whitespaces*) do espectro de frequência. Ou seja, os rádios cognitivos utilizam fatias de recursos de maneira oportunista. Este mecanismo também é denominado de acesso dinâmico ao espectro, ou DSA (*Dynamic Spectrum Access*). Com o mecanismo DSA adotado, a premissa principal no uso oportunista do espectro licenciado é evitar a geração de interferências nocivas aos dispositivos licenciados [6–8].

Dentro do contexto de rádios cognitivos, é chamado de usuário primário (UP) o dispositivo que detém a licença de operação, destacando na própria nomenclatura sua prioridade de uso do espectro licenciado. Já um rádio cognitivo, por suas características não-prioritárias no uso do espectro, é denominado de usuário secundário (US). Estes termos serão usualmente empregados no decorrer do trabalho.

Com o mecanismo descrito, os rádios cognitivos possibilitam o uso mais eficiente do espectro, evitando que partes do espectro licenciado permaneçam ociosas. Para as características mencionadas de adaptação dos parâmetros de operação para o uso dinâmico do espectro, são frequentemente usados os rádios definidos por *software* (*Software Defined Radios* - SDR), sendo estes os principais habilitadores para o desenvolvimento da tecnologia de rádios cognitivos. Esta classe de rádios permite que seus parâmetros de operação, como frequência central, potência de transmissão, largura de banda e tipo de modulação, sejam ajustados sem a necessidade de alterações no *hardware* [9, 10], permitindo que estes rádios tenham flexibilidade em suas operações, podendo se adaptar para o uso do canal licenciado disponível.

Diversos trabalhos na área de acesso dinâmico ao espectro desenvolveram estudos sobre a viabilidade no uso oportunista das faixas licenciadas do espectro por USs. Dentre os diversos desafios que surgem nesta área de estudo, estão a procura de fa-

tias do espectro que proporcionem oportunidades temporais e/ou espaciais de acesso dinâmico e o desenvolvimento de mecanismos de acesso ao meio que possibilitem o uso destes recursos pelos USs, evitando a geração de interferências nocivas aos UPs, além de proporcionar o compartilhamento com outros dispositivos secundários. Trabalhos recentes da literatura vêm desenvolvendo estudos acerca do uso oportunista das bandas de TV, denominados de TV *whitespaces*, que buscam explorar os espaços em branco na faixa do espectro de UHF (*Ultra High Frequency*), subutilizado pelas operadoras de TV [11]. Neste sentido, dentre os diversos estudos em TV *whitespaces*, destaca-se o desenvolvimento do padrão IEEE 802.11af, também chamado de *White-Fi*, que viabiliza o uso de redes WiFi na faixa de UHF [12], como forma de explorar partes ociosas deste espectro, melhorando o desempenho e aumentando a área de cobertura das redes IEEE 802.11. Outra faixa do espectro que vem sendo explorada para utilizações oportunistas é a banda de redes celulares de primeira e segunda gerações, que vem se tornando cada vez menos utilizada, dada a adoção pelas tecnologias mais recentes de terceira e quarta gerações. No entanto, as bandas de TV e de redes celulares possuem algumas características que dificultam a operação por secundários sem que estes venham a interferir com os primários. Nas bandas de TV, por exemplo, os receptores possuem uma característica passiva de operação, que dificultam a detecção dos mesmos pelos rádios cognitivos. Nas redes celulares, apesar dos receptores não terem características de operação passiva, os usuários possuem um padrão de mobilidade que torna a operação dos rádios oportunistas mais restritiva, com períodos de sensoreamento maiores, por exemplo, afetando o desempenho dos mesmos.

Diante das dificuldades destacadas, pesquisas recentes mostram um grande potencial no uso oportunista das bandas utilizadas por sistemas de radar que, devido às suas características de uso periódico e bem comportado do espectro, possibilitam o uso temporal e espacial por USs [13–15]. As três bandas de radar mais atrativas para o compartilhamento de espectro são as seguintes: banda L (960 - 1400 MHz), banda S (2.7 - 3.6 GHz) e banda C (5.0 - 5.8 GHz) [16], que, juntas, ocupam mais de 2 GHz do espectro de frequência.

Sistemas de radar são geralmente caracterizados pelos seguintes parâmetros de operação: altas potências de transmissão, transmissores e receptores co-localizados, antenas rotacionais extremamente diretivas, e alguns localizados em plataformas móveis. Enquanto os dois primeiros itens citados facilitam significativamente a detecção e proteção dos sistemas de radar, os dois últimos tornam a ocupação deste espectro mais dinâmica e complexa. No entanto, serão verificadas no decorrer do estudo das bandas de radar que as mesmas possibilitam uma vasta zona de uso temporal do espectro, proporcionadas pela rotação das antenas de radar e pela alta diretividade destas. Tais oportunidades podem ser usufruídas por USs, através de

mecanismos DSA que consideram o uso temporal do espectro. Estudos mostram que, não considerando a capacidade temporal, um grande percentual de USs ficam impossibilitados de utilizarem oportunisticamente esta parte do espectro, especialmente àqueles que se encontram próximos de regiões costeiras e aeroportos [16, 17], onde estão concentrados a maior parte dos sistemas de radar. Levando isso em conta, diversos métodos DSA foram sugeridos na literatura, como mecanismos de adaptação da potência de transmissão, por parte dos USs, ou esquemas de agendamento de transmissão, para uso das oportunidades temporais do espectro [18, 19].

Os trabalhos citados até o momento levam somente em conta o uso de rádios cognitivos que realizam o sensoreamento do espectro (*spectrum sensing*) para verificar se o meio está ocupado por um UP ou disponível para uso por um secundário. Em trabalhos recentes da literatura, vêm sendo exploradas soluções que envolvam o uso de bases de dados para acesso oportunista. Estas bases possuem informações atualizadas acerca da ocupação do espectro em uma dada região [1, 16]. O US, antes de operar na faixa licenciada, consulta uma base de dados, que informa o estado atual do canal em que se deseja operar. A base de dados calcula os níveis de potência do sinal primário através de modelos de propagação empíricos, verificando assim, as condições de acesso ao meio na localidade em que o rádio se encontra, permitindo que o rádio utilize o espectro licenciado quando este não estiver ocupado por um UP. Esta solução vem sendo explorada pelo órgão regulador norte-americano FCC (*Federal Communications Commission*), como fase inicial para uso dinâmico do espectro em bandas de TV [20], inclusive adotado pelo padrão IEEE 802.11af citado anteriormente. Em [1], os autores exploram o uso de uma base de dados que informa aos USs características operacionais acerca dos sistemas de radar, servindo de parâmetros de entrada para os esquemas de sensoreamento. Este mecanismo, denominado *Database-aided Sensing*, possibilita aos USs recursos complementares ao sensoreamento, aumentando a granularidade do grau de confiança do *spectrum sensing*, tornando este mecanismo mais robusto à geração de interferências nocivas aos UPs e mais eficiente no uso das oportunidades temporais do espectro, devido ao conhecimento prévio dos parâmetros reais de operação do radar pelo US.

Com toda a pesquisa voltada para o uso oportunista das bandas de radar, e dada a largura de faixa deste espectro, o FCC enxergou a possibilidade de uso de tais bandas por células de curto alcance, também chamadas de femtocélulas, para a tecnologia de quarta geração (LTE - *Long-Term Evolution*) de redes móveis [21]. As femtocélulas, intituladas tecnicamente como Home eNodeBs (HeNBs) para o 4G, são usualmente empregadas para suprir a demanda de tráfego dos ambientes *indoor*, complementando a oferta de recursos das células de longo alcance, denominadas de Macro eNodeBs (MeNBs). O cenário composto por MeNBs e HeNBs caracteriza uma rede do tipo heterogênea (HetNet), dada a heterogeneidade de células que ope-

ram numa mesma região. As células dos dois tipos citados compartilham a mesma faixa de espectro licenciado do LTE. Logo, potenciais interferências entre MeNBs e HeNBs surgem neste ambiente sem fio, degradando os serviços disponibilizados tanto para usuários *indoor* quanto para usuários *outdoor*. Com a regulamentação do uso oportunista das bandas de radar pelo FCC, usuários *indoor* associados às HeNBs poderão usufruir dos espaços em branco deste espectro, evitando o surgimento de interferência com a MeNB, contribuindo para o aumento na qualidade de serviços disponíveis, na vazão das redes LTE e na eficiência espectral.

No entanto, para que seja possível o uso compartilhado das bandas de radar por femtocélulas LTE, o FCC exige o estudo e a implementação de um sistema de acesso ao espectro, denominado de SAS (*Spectrum Access System*) [21]. O SAS tem a função de prover os recursos necessários para uso oportunista, sem que interferências nocivas sejam geradas nos sistemas de radar em operação.

Na literatura ainda não foi desenvolvido um estudo sobre a viabilidade no uso das bandas de radar por redes LTE e mecanismos que possibilitem o uso oportunista do meio por tais dispositivos. Logo, faz-se necessário um modelo capaz de criar as condições de acesso ao meio em bandas de radar por dispositivos LTE, para análise e avaliação do uso da mesma, e comparação de desempenho com as redes LTE tradicionais. Portanto, este trabalho propõe a implementação de um modelo que define as condições de acesso ao meio sem fio em bandas de radar, simulando o comportamento de uso do espectro por sistemas de radar que afetam as transmissões oportunistas dos secundários. Ou seja, trata-se de um modelo de interferência para as transmissões LTE que ocorrem na banda de radar. Com isto, busca-se avaliar o desempenho no uso deste espectro de frequências para ambientes de redes heterogêneas.

Este trabalho propõe, além do modelo, que cria as condições de acesso ao meio das bandas de radar, um mecanismo DSA cooperativo que leva em conta o nível de interferência agregada nos sistemas de radar provocado por múltiplos secundários. Atualmente, os mecanismos da literatura não levam em conta os efeitos de interferência agregada no uso oportunista, fator relevante na utilização real de tais bandas. São descritas todas as fases de operação do mecanismo de forma genérica, podendo ser aplicado em qualquer tecnologia de redes sem fio. A partir do modelo criado para o mecanismo cooperativo, busca-se avaliar seu desempenho quando comparado com os mecanismos DSA propostos pela literatura. Logo após, o mecanismo proposto é implementado dentro do contexto de redes LTE heterogêneas, assim como os mecanismos propostos na literatura, para avaliação prática no desempenho destas redes.

Para as avaliações experimentais citadas, como a comparação entre o ambiente de acesso ao meio do radar e LTE, assim como a análise de desempenho dos mecanismos

DSA na rede LTE, foi utilizado o simulador de redes ns-3 (*Network Simulator 3*). Tanto o modelo das condições de acesso ao meio, quanto os mecanismos DSA foram devidamente implementados no módulo de redes LTE do simulador. Na avaliação destas soluções, é utilizada a frequência de 5.6 GHz (Banda C) para transmissão de dados entre os usuários móveis (UEs - *User Equipments*) e HeNBs. O UP que opera nessa banda é caracterizado por um radar do tipo meteorológico. Os parâmetros de operação utilizados no comportamento do radar meteorológico foram extraídos de um radar real, a partir da norma da UIT (União Internacional de Telecomunicações) [22], que especifica e padroniza os diversos tipos de sistemas de radar existentes.

## 1.1 Organização do Texto

A organização do texto segue a seguinte estrutura: o Capítulo 2 aborda as características de operação dos sistemas de radar do tipo monostático relevantes ao estudo realizado e os principais conceitos e mecanismos de acesso dinâmico ao espectro em bandas de radar. Já no Capítulo 3, é apresentada a proposta do mecanismo DSA cooperativo, bem como a comparação entre os mecanismos a partir de simulações e análise dos resultados. O Capítulo 4 apresenta os principais conceitos sobre redes LTE, redes LTE Heterogêneas e a implementação do modelo de acesso ao meio em bandas de radar, bem como a verificação do modelo proposto e análise de desempenho no uso da banda de radar por femtocélulas quando comparado com o uso compartilhado da banda LTE. O Capítulo 5 apresenta os detalhes de implementação dos mecanismos DSA propostos na literatura, e o cooperativo proposto neste trabalho, em dispositivos LTE. A análise de desempenho de cada mecanismo é realizada tanto para o tráfego de dados dos USs, quanto para o impacto causado no sistema primário. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais, destacando as principais contribuições da dissertação e elencando possíveis trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Trabalhos Relacionados

Neste capítulo, serão apresentados os principais conceitos sobre o acesso dinâmico ao espectro em bandas de radar, bem como o estado da arte e os principais desafios enfrentados pelos mecanismos DSA desenvolvidos na literatura. Na Seção 2.1, são tratados os principais aspectos sobre a utilização do espectro de frequências por sistemas de radar, e que serviram de motivação para o desenvolvimento de métodos de acesso dinâmico em tais bandas. A Seção 2.2 aborda os principais mecanismos DSA em bandas de radar desenvolvidos na literatura, com suas respectivas características funcionais. Por fim, na Seção 2.3, são apresentados os desafios e problemas enfrentados pelos mecanismos propostos até o momento, e que são atacados pela proposta desenvolvida neste trabalho.

### 2.1 Acesso Dinâmico ao Espectro em Bandas de Radar

Os sistemas de radar, em essência, possuem como principal área de aplicação os serviços de detecção de objetos, localização destes e reconhecimento de ambientes. Estas aplicações são utilizadas, usualmente, em sistemas aeronáuticos e marítimos de radionavegação, de previsão do tempo e em sistemas de radiolocalização. Mesmo possuindo os mesmos princípios de operação, a grande quantidade de aplicações existentes geram uma diversidade extensa de sistemas de radares, mesmo para aqueles que operam nas mesmas bandas [1].

Como visto no Capítulo 1, o espectro de radar é dividido em três bandas distintas: L, S e C. Os tipos mais usuais de sistemas de radar que prevalecem nas bandas citadas são os monostáticos, formados por transmissores e receptores co-localizados, que emitem um trem de pulsos em uma direção específica. A geração destes pulsos é realizada por esquemas de modulação, também chamados de *Intrapulse Modulation schemes*. A modulação é realizada em um sinal de portadora do tipo pulsada



(*Pulsed Carrier*), cuja forma de onda apresenta intervalos entre as oscilações, como mostrada na Figura 2.1. Através da variação de um dos componentes do sinal da portadora (amplitude, frequência ou fase), um sinal de entrada modula a portadora, de acordo com o comportamento do sinal modulante. Os esquemas de modulação utilizados para os sistemas de radar aqui estudados são: LFM (*Linear Frequency Modulation*), decorrente da variação da frequência da portadora, e PM (*Phase Modulation*), derivada da variação da fase do sinal da portadora. O sinal resultante destes dois esquemas de modulação também são ilustrados na Figura 2.1.

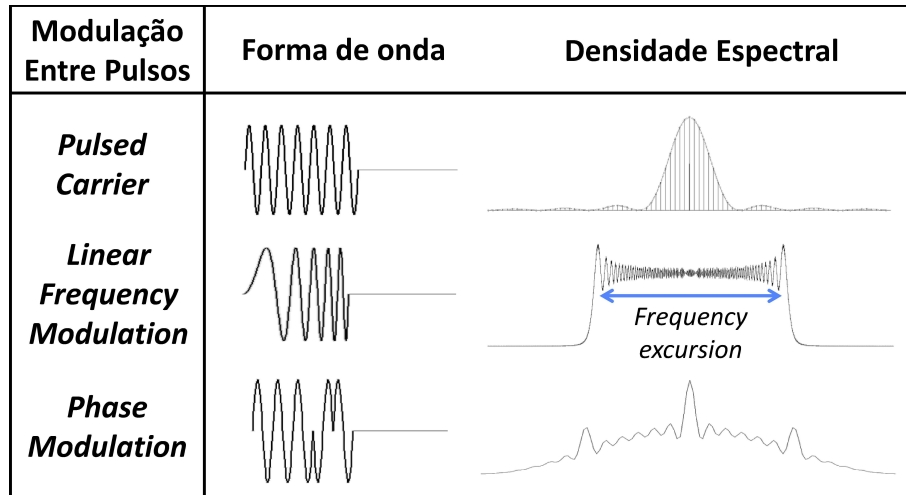


Figura 2.1: Portadora e esquemas de modulação utilizados em sistemas de radar [1].

A partir do sinal resultante da portadora modulada, caracteriza-se o trem de pulsos. A direção de transmissão destes pulsos varia de acordo com o movimento de rotação da antena transceptora, que realiza um escaneamento por toda a região de operação do radar. A colisão do trem de pulsos em obstáculos permite que os mesmos sejam percebidos pelos sistemas de radar, desde que os pulsos refletidos retornem à antena transceptora, detectando assim as posições e movimentos desses obstáculos. Existem diversos tipos de padrão de escaneamento que variam de acordo com o tipo de radar. Cada padrão de escaneamento é caracterizado pela velocidade de rotação, padrão de rotação (circular, setorial, helicoidal, etc.) e o formato do feixe principal das antenas. Tais características são ilustradas nos diferentes padrões de escaneamento da Figura 2.2.

Pode-se verificar nesta mesma figura, a partir da quarta coluna, a variação do sinal recebido por um receptor para cada padrão de escaneamento. Cada pico na variação do sinal recebido identifica que o feixe/lóbulo principal da antena encontra-se direcionado para o receptor, provocando um maior ganho nesta direção. Na direção do lóbulo principal, o trem de pulsos é recebido pelo receptor, conforme ilustrado na Figura 2.3. Logo, pode-se constatar uma periodicidade no nível do

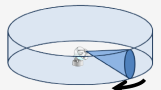
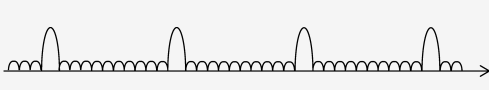
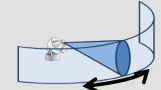
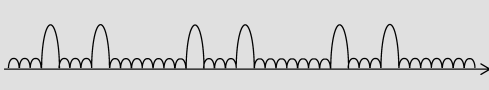
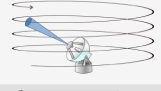
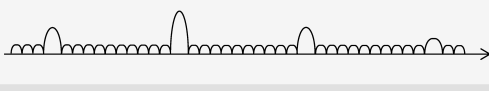

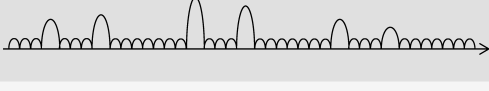
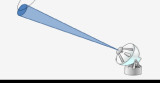
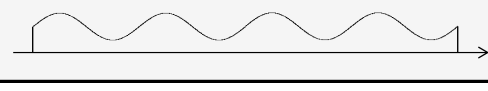
Feixe	Tipo scan	Padrão de rotação	
Fan shape	Circular		
	Setorial		
Pencil-shaped	Helicoidal		
	Raster		
	Cônico		

Figura 2.2: Padrões de escaneamento existentes em sistemas de radar [1].

sinal recebido, o que caracteriza uma utilização bem comportada do espectro por radares monostáticos.

Sob o ponto de vista de um rádio cognitivo, as características de co-localização de transmissores e receptores, a utilização bem comportada do espectro de frequência e a alta potência de transmissão facilitam o processo de detecção dos UPs, crucial para o uso oportunista das faixas licenciadas do espectro. Além disso, a operação periódica possibilita o surgimento de oportunidades temporais de uso, conforme ilustrado na Figura 2.4. Como pode ser visto, o rádio cognitivo realiza um período de sensoreamento do espectro, identificando o tempo em que o radar permanece na direção do secundário, podendo estimar assim o período de rotação da antena. O rádio cognitivo, então, aproveita os períodos de ociosidade no uso do espectro para a utilização oportunista. O tipo de sensoreamento usualmente empregado em bandas de radar é o detecção de energia (ED - *Energy Detection*). Na Subseção 2.1.1, serão tratadas as particularidades deste tipo de sensoreamento e a motivação no uso do mesmo em bandas de radar.

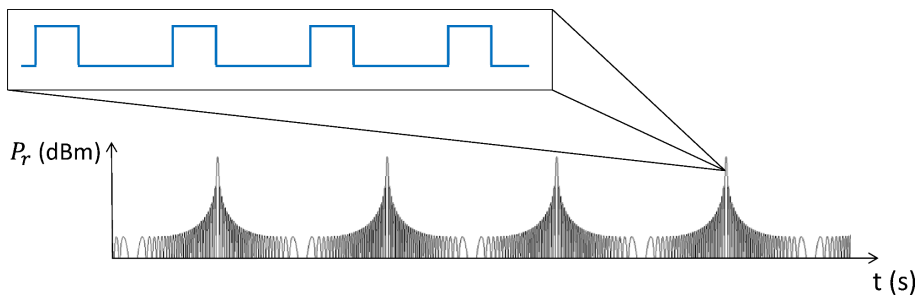


Figura 2.3: Ilustração dos pulsos transmitidos na direção do lóbulo principal [1].

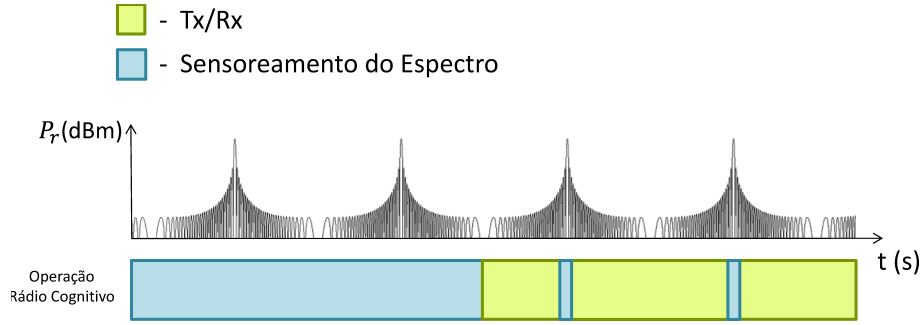


Figura 2.4: Oportunidades de uso temporal por rádios cognitivos na faixa do espectro de radar.

### 2.1.1 Método de Sensoreamento do Espectro por Detecção de Energia

A funcionalidade de sensoreamento do espectro é um dos componentes mais importantes para a operação de um rádio cognitivo. O impacto nos sistemas primários provocado pelos acessos oportunistas ao espectro licenciado, em termos de interferência, precisa se manter em um nível tal que não ultrapasse um máximo requerido. Para que este requisito seja atendido, é necessário que um mecanismo de sensoreamento do espectro detecte com precisão quando o meio se encontra livre para ser utilizado por um US.

O problema central a ser atacado pelo sensoreamento do espectro está em decidir se uma determinada fatia do espectro encontra-se disponível ou não. Este problema é modelado segundo a Equação 2.1 [23].

$$\begin{aligned}
 H_0 : y[n] &= w[n], \quad n = 1, \dots, N \\
 H_1 : y[n] &= x[n] + w[n], \quad n = 1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Os parâmetros da equação possuem as seguintes definições:  $x[n]$  representa o sinal transmitido pelo primário,  $w[n]$  é o ruído provocado pelo meio de propagação, e  $n$  representa o tempo. O nível de sinal recebido  $y[n]$  nos estados  $H_0$  e  $H_1$  modela um problema clássico de detecção. Quando  $y[n]$  é recebido no estado  $H_0$ , o primário não é detectado pelo sensoreamento realizado no instante  $n$ . Ao contrário de  $H_0$ ,  $H_1$  representa o estado de  $y[n]$  em que o primário é detectado, devido à presença de  $x[n]$  no instante  $n$  em que o meio foi sensoreado. Logo,  $H_0$  e  $H_1$  representam hipóteses de estados do meio físico no momento em que o sensoreamento do espectro é realizado [23]. O parâmetro  $w$  é usualmente assumido como um ruído branco, de média zero, com uma distribuição Gaussiana do tipo *symmetric complex Gaussian*. Pode-se representar da seguinte forma:  $w \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2 I)$ , onde  $\sigma^2$  é a variância do

ruído.

Simplificando a análise, pode-se verificar um instante  $n$  de sensoriamento que, de maneira análoga, é representado pela Equação 2.2.

$$\begin{aligned} H_0 : y &= w \\ H_1 : y &= x + w, \end{aligned} \tag{2.2}$$

Modelado o problema de detecção de ocupação do canal a ser solucionado pelo sensoriamento do espectro, define-se o método de sensoriamento ED como sendo a detecção de primários por energia, por meio da medição do sinal recebido em um intervalo de tempo finito de observação do canal. A potência recebida é, então, comparada com um limiar de potência (*threshold*) determinado previamente, para estabelecer se o canal encontra-se ocupado ou não por um UP. Tem-se que  $\Lambda(y)$  representa o nível de sinal recebido, a partir da detecção de  $y$  em um intervalo finito de tempo de observação  $n$ . A partir de um limiar  $\eta$ , o método ED é representado por

$$\Lambda(y) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \eta. \tag{2.3}$$

O desempenho do método ED é medido pela probabilidade de se detectar corretamente a ocupação do canal por um primário ( $H_1$ ) a partir da comparação do limiar de referência e pela probabilidade de se detectar erroneamente o meio como ocupado, enquanto o mesmo encontra-se livre para uso ( $H_0$ ). Tais grandezas são chamadas de probabilidade de detecção e de alarme falso (*false alarm*) e definidas, respectivamente, por  $P_D = Pr(\Lambda(y) > \eta | H_1)$  e  $P_{FA} = Pr(\Lambda(y) > \eta | H_0)$ . Para um bom desempenho de detecção por ED, um valor de  $\eta$  deve ser escolhido, tal que, maximiza-se  $P_D$  e, conseqüentemente, reduz-se  $P_{FA}$  para que atenda a seguinte condição:  $P_{FA} \leq \alpha$ , onde  $\alpha$  é determinado previamente.

O estudo realizado em [23], mostra que o bom desempenho do método ED depende diretamente da relação sinal-ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*) no receptor. Quanto menor a SNR, maior será  $P_{FA}$ , fazendo com que o método ED, para atender ao critério  $P_{FA} \leq \alpha$ , necessite de mais tempo de observação do canal. O ponto em que  $n \rightarrow \infty$  para um bom desempenho é chamado de *SNR wall*, onde o ruído se torna alto o suficiente, dificultando a percepção do meio como livre ou ocupado por um primário. Este caso surge quando sistemas primários se encontram distantes o suficientes para que o nível de potência recebida pelo secundário esteja abaixo do nível de ruído, comprometendo a escolha de um  $\eta$  que satisfaça as condições exigidas. Além disso, outro fator que compromete a escolha do limiar  $\eta$  é a variação do próprio ruído do ambiente de radiofrequência, que por vezes pode encobrir o nível

de potência recebido e gerar casos de erros de detecção do primário. Neste caso, a não detecção do primário gera interferências nocivas, comprometendo os serviços disponibilizados na banda licenciada. Já, a detecção do meio como ocupado em períodos de ociosidade, acarretam em perdas de oportunidades no uso do espectro por USs, degradando o desempenho destes.

Para os sistemas de radar tratados neste trabalho, é usual o alto nível de potência transmitida pelos primários. Este deixa de ser perceptível a partir de grandes distâncias. Além disso, como muitos dos pontos de localização dos radares encontram-se em grandes altitudes, a variação do sinal por desvanecimentos em obstáculos é muito pequena. Neste caso, o limiar estipulado pelo mecanismo ED garante um bom desempenho, minimizando os impactos gerados pela *SNR wall*. Além disso, o comportamento periódico do nível de sinal recebido dos radares possibilitam sua detecção mesmo em baixos níveis de intensidade, em que os picos proporcionados pelo lóbulo principal da antena de surgem periodicamente e de maneira bem comportada, tornando o método ED um bom candidato para o sensoriamento do espectro de radar, além de sua simplicidade de operação e implementação [16]. Dadas estas características, é assumido no decorrer do trabalho, que  $P_{FA}$  e a probabilidade de erros de detecção são desprezíveis, não fazendo parte do escopo o estudo das mesmas.

A Subseção 2.1.2 descreve o cálculo do limiar utilizado no método ED, a partir dos parâmetros utilizados em sistemas de radar.

### 2.1.2 Cálculo do limiar de referência para sistemas de radar

Para determinar se o espectro pode ser utilizado livremente sem causar interferências nocivas ao UP, o US compara o nível de potência recebido com um limiar de referência. Em bandas de radar, o limiar tende a ser relativamente alto, devido aos níveis de potência irradiada pelos sistemas de radar e pela ausência de problemas de terminal escondido, em que a presença do receptor não pode ser identificada por USs, pelo método ED. No caso dos sistemas de radares aqui tratados, transmissores e receptores estão localizados no mesmo ponto geográfico, evitando os problemas enfrentados pela não detecção dos receptores primários. O cálculo do limiar é realizada a partir do nível máximo de interferência com que um sistema de radar pode suportar sem que se degrade a qualidade de serviço [2]. A União Internacional de Telecomunicações (UIT) padroniza esses limiares de interferência para os diversos tipos de radares existentes em [24].

Para o cálculo do limiar utilizado pelo US, considerando-se um limiar de interferência  $I_{thr}$  para um sistema de radar qualquer, é realizado, primeiramente, o cálculo da perda de percurso (*pathloss*) do sinal transmitido pelo US,  $P_t^{US}$ , para que o nível de potência recebido no radar seja igual ao limiar  $I_{thr}$ , como descrito na Equação

2.4.

$$P_t^{US} + G_{US} + G_{radar} + B_{radar} - B_{US} - I_{thr} = L \quad (2.4)$$

onde:

$$G_{US} \rightarrow \text{Ganho da antena do US} \quad [dBi]$$

$$G_{radar} \rightarrow \text{Ganho da antena do radar} \quad [dBi]$$

$$B_{US} \rightarrow \text{Largura de banda do US} = 10 \log_{10}(B_{sec} [\text{MHz}])$$

$$B_{radar} \rightarrow \text{Largura de banda do radar} = 10 \log_{10}(B_r [\text{MHz}])$$

$$L \rightarrow \text{Perda de percurso} \quad [dB]$$

A diferença entre  $B_{US}$  e  $B_{radar}$  é aplicada como um fator de correção, para que seja contabilizado apenas a quantidade de potência distribuída na banda do US que também esteja contida igualmente na banda do radar, caso a banda do US seja a maior. Caso contrário, este fator de correção será igual a 1 sempre.

A partir do resultado da perda de percurso aplicada no sentido de transmissão  $US \rightarrow Radar$ , partindo da premissa que  $L$  seja igual nos dois sentidos, aplica-se  $L$  no sentido oposto de transmissão ( $Radar \rightarrow US$ ), de maneira que, o limiar  $P_{thr}$  seja encontrado como o nível de potência do radar recebido no US, para a perda calculada anteriormente.

$$P_{thr} = P_t^{radar} + G_{radar} + G_{US} - L \quad [dBm] \quad (2.5)$$

onde:

$$P_t^{radar} \rightarrow \text{Potência de transmissão do radar} \quad [dBm]$$

Substituindo na Equação 2.5 a variável  $L$  resultante em 2.4, tem-se que

$$P_{thr} = P_t^{radar} - P_t^{US} + I_{thr} + B_{US} - B_{radar} \quad [dBm]. \quad (2.6)$$

O valor de  $P_{thr}$  encontrado em 2.6 é utilizado em cada US individualmente. Pode-se verificar que o limiar depende de  $I_{thr}$  e das potências de transmissão do US e do radar. Logo, para cada sistema de radar e de USs, tem-se valores de limiar distintos. Este tipo de cálculo considera a reciprocidade do canal, sendo a forma de cálculo do limiar adotado na literatura para todos os mecanismos propostos até o momento [24].

Através da comparação entre o nível de sinal sensorado e  $P_{thr}$ , são definidas três zonas de uso do espectro distintas que surgem mediante a dinâmica de operação dos radares, como definido na Equação 2.7. Define-se como zona 1 a região

que abrange todos os USs em que o nível de sinal do radar vindo dos lóbulos secundários,  $P_r^{radar}(G_{sec})$ , esteja acima do limiar calculado. Neste caso, a operação de USs na banda do radar é proibitiva. Esta área é denominada de zona de exclusão (*exclusion zone*). A zona 2 é onde as oportunidades temporais de uso do espectro surgem, permitindo que USs transmitam na banda de radar sempre que o lóbulo principal da antena do radar não estiver em suas respectivas direções. Neste caso, o nível de sinal sensoreado  $P_r^{radar}(G_{sec})$  será menor que  $P_{thr}$ , e maior que  $P_{thr}$  para  $P_r^{radar}(G_{max})$ , nível de potência proveniente do lóbulo principal do radar. Define-se, então, esta região como zona temporal (*temporal zone*). Por fim, a zona 3 abrange toda a região em que o US é livre para utilizar o espectro a qualquer momento, sem riscos de causar interferências acima do limiar estipulado, ou seja, sempre que  $P_{thr} > P_r^{radar}(G_{max})$  e, conseqüentemente,  $P_{thr} > P_r^{radar}(G_{sec})$ . Logo, a transmissão ocorrerá sem interrupções, fazendo com que a interferência resultante no radar seja proporcionada tanto nas direções dos lóbulos secundários, quanto no lóbulo principal. Esta região é definida como zona livre ou espacial (*spatial/free zone*). A Figura 2.5 ilustra as regiões definidas acima. Conforme abordado com mais detalhes nos próximos capítulos, é esperado que, com o aumento na densidade de USs, a interferência agregada proporcionada por todos os secundários que estiverem transmitindo também cresça. Neste sentido, uma forma de conter este aumento é reduzindo o valor de  $P_{thr}$ . Com a redução do limiar, as regiões que abrangem as zonas 1 e 2 se expandem e, conseqüentemente, provoca a inserção de novos USs em tais zonas, limitando os mesmos na utilização do espectro. Com isso, reduz-se a interferência agregada. A habilidade de um mecanismo DSA em identificar a zona em que um US está inserido, define o quão eficiente será sua exploração de oportunidades no uso do espectro, evitando sempre interferências nocivas ao primário. A Seção 2.2 irá abordar os mecanismos DSA para bandas de radar desenvolvidos na literatura, que buscam maximizar a eficiência no uso oportunista desta faixa do espectro.

$$P_{thr} \leq P_r^{radar}(G_{sec}) \rightarrow \text{Zona 1}$$

$$P_r^{radar}(G_{sec}) < P_{thr} \leq P_r^{radar}(G_{max}) \rightarrow \text{Zona 2}$$

$$P_{thr} > P_r^{radar}(G_{max}) \rightarrow \text{Zona 3} \tag{2.7}$$

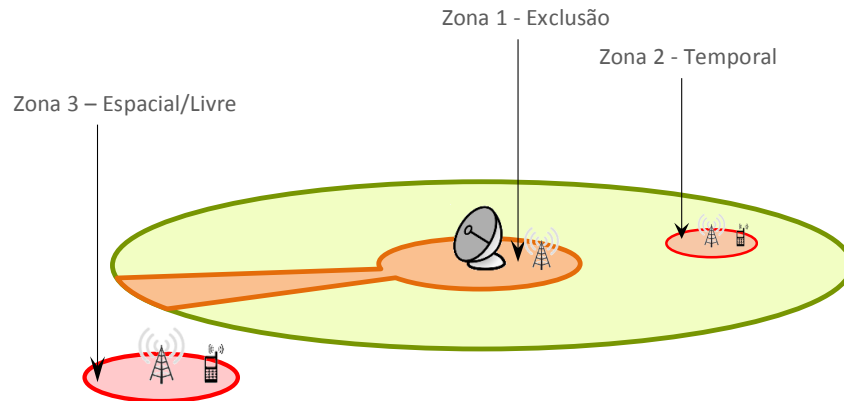


Figura 2.5: Ilustração das zonas de oportunidades no ambiente de radiofrequência dos sistemas de radar [2].

## 2.2 Os Mecanismos DSA em Bandas de Radar

Nesta seção, serão abordados os principais mecanismos DSA propostos na literatura para bandas de radar. Estes mecanismos são definidos como puramente oportunistas, em que dispositivos secundários não trocam informações com entidades externas, como bases de dados ou os próprios primários. Neste caso, é considerado apenas um  $P_{thr}$  de referência para se avaliar a disponibilidade do canal.

### 2.2.1 *Dynamic Frequency Selection (DFS)*

O mecanismo *Dynamic Frequency Selection* (DFS) foi desenvolvido no padrão IEEE 802.11h, possibilitando a operação de dispositivos IEEE 802.11 na faixa de 5260 a 5700 MHz, onde estão localizados sistemas de radar da banda C. O mecanismo DFS é implementado em todos os dispositivos que estejam inseridos nos padrões IEEE 802.11a/j/n/ac [25].



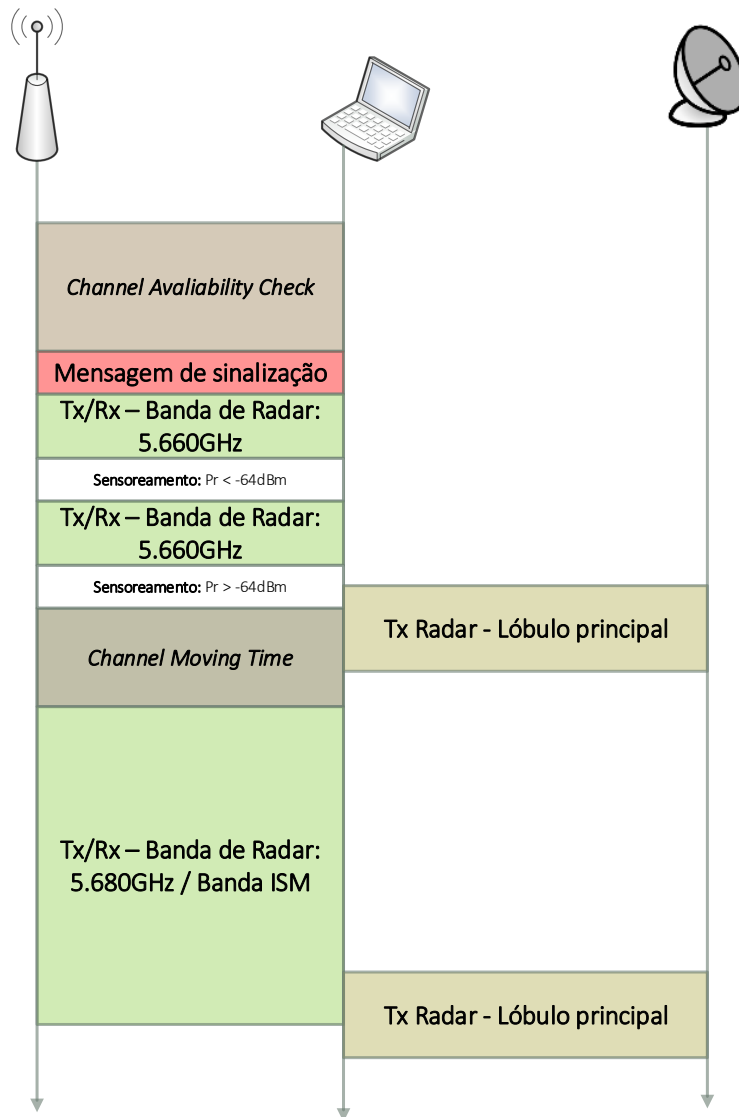


Figura 2.6: Operação do mecanismo DFS.

O DFS inicia sua operação com uma varredura inicial de um canal, escolhido aleatoriamente pelo ponto de acesso (*Access Point* - AP), que dura cerca de 60 segundos. Esta primeira fase é denominada de *Channel Availability Check* (CAC). Caso um sinal seja detectado acima de um limiar durante os 60 segundos de varredura, o canal é dado como ocupado, iniciando-se um novo processo CAC, em outro canal que esteja dentro do intervalo 5260-5700 MHz. Quando um canal é dado como livre durante este processo, ou seja, quando o nível de sinal percebido no sensoreamento de 60 segundos não ultrapassa o limiar de referência, o AP informa às estações associadas (*Stations* - STAs) o uso deste canal para a comunicação entre os dispositivos. No entanto, mesmo durante a ocupação do canal, nos intervalos entre períodos de transmissão, o AP ainda realiza o sensoreamento do meio sem

fio, com o intuito de verificar se algum radar iniciou sua operação na banda utilizada durante esse tempo. Este cenário pode ocorrer: (i) em casos onde sistemas de radar retornam à sua operação normal após um período de manutenção, (ii) em tipos de radares que possuem períodos de sensoriamento muito longos, ou (iii) em sistemas do tipo *frequency hopping*, onde as transmissões dos radares ocorrem em múltiplos saltos de frequência. Em qualquer um dos casos descritos, o AP inicia o processo denominado *Channel Moving Time* (CMT), que informa às STAs a interrupção de suas respectivas transmissões pelo canal. O processo CMT dura 10 segundos, garantindo que todas as estações associadas ao AP parem de transmitir. O canal ocupado permanecerá neste estado por 30 minutos, até que seja sensorado novamente quando necessário [24].

É definido um limiar fixo de  $-64dBm$ , escolhido a partir do valor de pior caso dentre todos os valores de  $I_{thr}$  existentes em sistemas de radar, levando em conta o cálculo definido na Seção 2.1.2. Sendo assim, o mecanismo garante que um US individual não ultrapasse o limiar máximo de interferência em nenhum dentre todos os tipos de radares existentes dentro desta faixa de frequência. A Figura 2.6 resume a operação do mecanismo DFS.

### 2.2.2 Mecanismo DFS-Temporal (DFS-T)

Pode-se verificar que o DFS não leva em conta os aspectos temporais de uso oportunista do espectro de radar. Sempre que o canal é identificado como ocupado, o AP inicializa o processo CMT para o sensoriamento de um novo canal, sem considerar futuras oportunidades de uso no canal anteriormente utilizado.

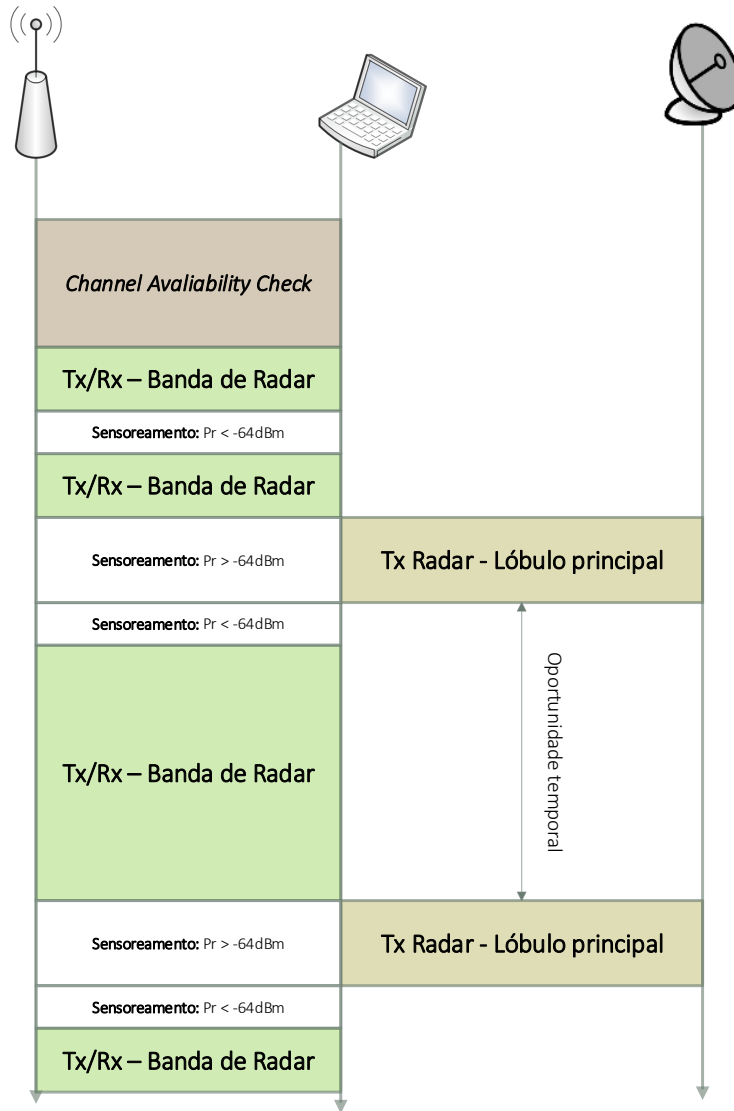


Figura 2.7: Operação do mecanismo DFS-T.

Baseando-se no fato dos radares possuírem a característica de uso periódico e bem comportado do espectro, o mecanismo proposto em [26], denominado de DFS-T (*Temporal DFS*), emprega a utilização temporal do espectro encontrados na zona 2, a partir da definição da Figura 2.5. Quando o nível de potência recebido está abaixo do limiar de referência de  $-64 \text{ dBm}$ , o canal é dado como livre, e transmissões secundárias são realizadas, como ocorre no caso do DFS. No entanto, a partir da visualização da Figura 2.5, quando o ganho da antena do radar varia com o tempo na direção em que o US se encontra, há variação no nível de potência recebido pelo mesmo. Sendo assim, há casos em que o nível de potência está acima do limiar calculado e casos onde encontra-se abaixo. Com a variação da direção de máximo ganho do feixe do radar, oportunidades de uso do espectro surgem para

USs localizados na zona 2, quando o nível do sinal se mantém abaixo do limiar. Portanto, para USs que localizados na zona 2, mesmo o canal estando ocupado por um determinado período de tempo, o US espera até que uma oportunidade nova de uso do espectro surja, ao invés de inicializar o processo CMT. Quando o US estiver na zona 1, a região de exclusão, o canal estará inacessível. Na zona 3, o nível de sinal recebido não irá ultrapassar o *threshold* calculado em nenhum instante de tempo, podendo utilizar o espectro integralmente a partir da oportunidade espacial obtida. A Figura 2.7 ilustra a principal diferença na operação do DFS-T para o DFS.

### 2.2.3 *Main Beam Occupied*

No mecanismo proposto em [19], transmissões oportunistas são interrompidas sempre que o feixe/lóbulo principal (*main beam*) estiver na direção do(s) US(s) que estiver(em) transmitindo, independente do nível de potência recebida estar ou não acima do limiar. Logo, este mecanismo não considera oportunidades espaciais para USs, que estiverem na zona 3. Para os casos em que o lóbulo principal não estiver apontado na direção de um US, este continua empregando o limiar para garantir que o US não esteja na zona de exclusão. Em outras palavras, este mecanismo expande a zona temporal para além da zona espacial. Como resultado, a interferência de USs no radar irá ocorrer somente através dos lóbulos secundários de sua antena. A análise deste mecanismo é importante para se perceber o limite na densidade de USs, quando nenhuma interferência ocorre no feixe principal do radar. A Figura 2.8 ilustra o uso do ambiente de radiofrequência por USs, através do mecanismo *Main-Beam*.

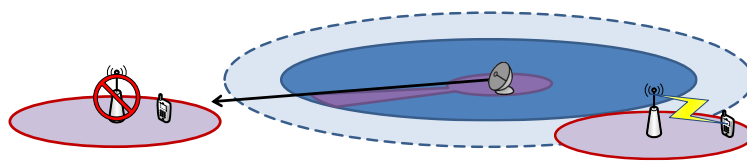


Figura 2.8: Utilização do ambiente de radiofrequência pelo mecanismo *MainBeam*.

## 2.3 Os Desafios enfrentados pelo Acesso Dinâmico em Bandas de Radar

Muito embora o uso das bandas de radar tenham como característica principal a facilidade na detecção dos UPs por fatores inerentes a estes sistemas, os mecanismos DSA estudados possuem dois principais desafios, no uso seguro do espectro para

prevenir UPs de interferências nocivas:

- **Limiar de referência restritivo** - O DFS utiliza um limiar de pior caso, garantindo que o nível de interferência não ultrapasse o limiar de interferência para o sistema de radar mais sensível. Neste caso, é ilustrado um exemplo na Figura 2.9, em que são mostradas as diversas regiões de uso do espectro no ambiente de radiofrequência do radar ilustrado. O radar possui um  $I_{thr}$ , tal que, o limiar obtido na Equação 2.6 é de  $-34dBm$ . No entanto, o  $P_{thr}$  de referência utilizado restringe o uso do espectro em toda região verde-clara. Neste caso, o AP ilustrado encontra-se impossibilitado de utilizar o canal do radar, mesmo não causando interferência acima do  $I_{thr}$ . O problema do limiar restritivo é uma constante em todos os mecanismos propostos, dado que os mesmos se utilizam de um único limiar estático de referência em todas as bandas de radar disponíveis.
- **Interferência Agregada** - Num cenário com múltiplos USs, a interferência resultante no radar é definida pela Equação 2.8.

$$I_{agg} = \sum_{j=1}^{N_{su}} I_j \quad (2.8)$$

onde:

$I_{agg}$  → Interferência agregada resultante no radar [mW]

$I_j$  → Interferência proveniente da transmissão do US j no radar [mW]

$N_{su}$  → Número de USs transmitindo na banda do radar.

Dado o somatório de interferências que caracteriza a interferência agregada no radar, o valor resultante de  $I_{agg}$  pode vir a ser um valor, tal que,

$$I_{agg} > I_{thr}.$$

Como o limiar de referência evita somente casos em que as interferências individuais  $I_j$  estejam acima do limiar  $I_{thr}$ , o somatório resultante  $I_{agg}$  pode vir a ser maior que  $I_{thr}$ , dependendo da densidade de USs transmitindo na banda de radar. Este fator torna os mecanismos propostos na literatura ineficientes no combate de interferência nociva aos sistemas de radar, comprometendo o uso oportunista deste espectro.

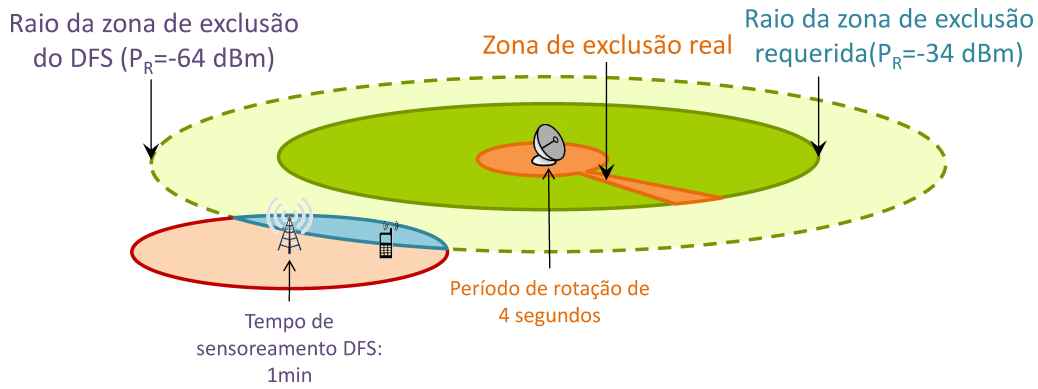


Figura 2.9: Exemplo do problema de limiar restritivo.

Enquanto que o primeiro desafio compromete a operação de USs, o segundo compromete os sistemas primários, podendo ocorrer casos de interferências nocivas a partir da interferência agregada. Levando em conta estes aspectos, o mecanismo aqui proposto busca, inicialmente, restringir o nível de interferência nos UPs de maneira a garantir que a interferência agregada proveniente de múltiplos USs não ultrapasse o limiar  $I_{thr}$ , independente da densidade de secundários existentes. Além disso, busca-se garantir que somente os USs que efetivamente venham a comprometer a operação dos primários não utilizem o espectro, sem restrições desnecessárias, garantindo que USs fora desta condição utilizem o espectro sem qualquer impedimento.

Mais adiante, é apresentada a proposta de acesso ao meio em bandas de radar, a partir da modelagem do comportamento de sistemas de radar reais, para fins de simulação de um ambiente que se aproxime do real. As devidas validações são realizadas para que o modelo atenda aos aspectos reais de uso do espectro, a partir das características de operação dos radares descritas nesta seção.

Por fim, os mecanismos aqui descritos e o proposto são implementados no simulador ns-3 em redes móveis LTE. Os dispositivos LTE são inseridos no ambiente de acesso ao meio modelado, seguindo as necessidades apresentadas pelo FCC no uso do espectro do radar para redes LTE heterogêneas.

# Capítulo 3

## Cooperação entre UP e USs

Este capítulo apresenta a proposta de um novo mecanismo DSA, em que se considera a cooperação do primário para o uso oportunista do meio pelos USs. Desta maneira, USs poderão usufruir dos espaços em branco temporais e espaciais do espectro, garantindo que os requisitos de interferência sejam atendidos. Além disso, como cada radar possui um limiar de interferência diferente, a cooperação possibilita que seja calculado um limiar de referência individual para cada sistema, sem levar em conta o pior caso.

Neste capítulo, inicialmente será apresentada uma visão geral sobre o funcionamento do mecanismo, que servirá de base para as próximas seções. Em seguida, é apresentado o modelo proposto do ambiente de radiofrequência para o cálculo da interferência agregada e da dinâmica como este parâmetro evolui, que será de suma importância para o mecanismo definido [2]. Mais adiante, é apresentado o algoritmo operacional do mecanismo tanto para o lado US, quanto para o UP, a partir do modelo definido anteriormente. Por fim, avalia-se o desempenho do mecanismo através da comparação com os mecanismos DFS, DFS-T e Main Beam. Para a avaliação proposta, foram realizadas simulações obtidas por uma implementação própria desenvolvida na linguagem de *script*, *Tool Command Language* (Tcl). Ao final deste capítulo, são apresentadas as conclusões com base nos resultados extraídos das simulações.

### 3.1 Mecanismo Cooperativo: Visão geral

O DFS-T é o mecanismo que usa de forma mais eficiente o espectro dentre todos evidenciados, permitindo que uma quantidade maior de USs utilize a banda de radar por um período de tempo mais longo, visto que são utilizadas as oportunidades temporais encontradas na zona 2 e as oportunidades espaciais encontradas na zona 3. O DFS restringe o uso da banda apenas aos USs presentes na zona 3, enquanto que o *MainBeam* estende a zona 2, impedindo o uso espacial do meio pelos USs

da zona 3. Todavia, dado maior uso do espectro pelo DFS-T, é esperado que este mecanismo gere uma maior interferência agregada no radar, aumentando as chances da interferência total ultrapassar o limiar estipulado. Estudos realizados em [26] evidenciam o avanço abrupto da interferência agregada em um ambiente com múltiplos USs. O método cooperativo proposto busca combinar o uso eficiente do espectro pelo DFS-T, permitindo que uma quantidade maior de USs com capacidades de uso temporal e espaciais usufruam destas oportunidades, com o mecanismo adicional que busca prevenir que a interferência agregada ultrapasse o limiar de degradação dos serviços de radar.

Partindo da premissa que os USs desconhecem completamente a existência e operação de outros secundários, na mesma banda que estiverem operando, o UP possui a característica de nó central no mecanismo cooperativo, onde toda a interferência agregada que o afeta pode ser medida e contabilizada. Com esta informação, o UP atualiza de forma dinâmica o limiar  $P_{thr}$  utilizado pelos USs, através de um sinal de *beacons* durante o intervalo entre pulsos, informando o novo valor calculado com base na interferência agregada atual. A Figura 3.1 ilustra a visão geral das operações realizadas pelo mecanismo. A seguir, será definido o modelo do ambiente de radiofrequência do radar e as variáveis necessárias que serão utilizadas para o desenvolvimento do mecanismo proposto.

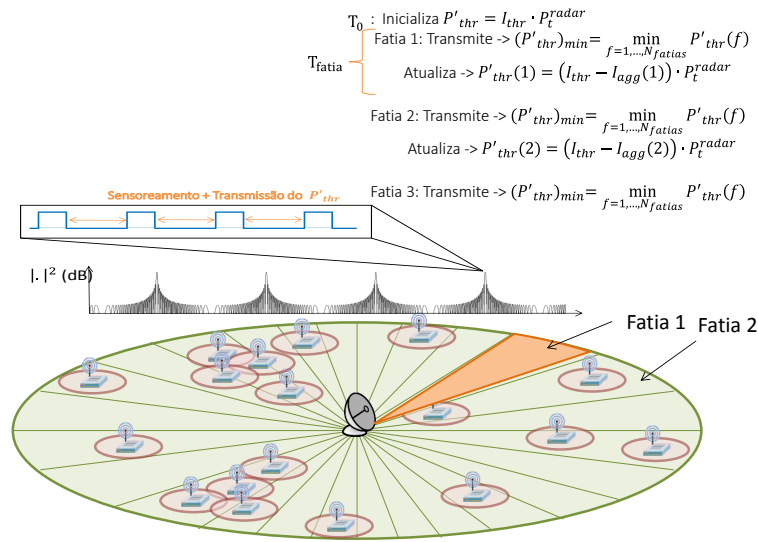


Figura 3.1: Operação do mecanismo cooperativo - Visão geral.



## 3.2 Modelo do ambiente de acesso ao meio compartilhado entre Radar e USs

O ambiente de acesso ao meio será caracterizado de maneira que a interferência agregada no radar possa ser contabilizada. Isto se dá, para que o mecanismo cooperativo proposto leve em conta este parâmetro e para a avaliação de desempenho no ambiente de simulação.

Considera-se um radar monostático, com padrão de escaneamento do tipo circular, com velocidade de rotação  $ScanRate$ , feixe principal em formato  $fan$  cujo ângulo de abertura é  $\theta$ , operando em uma área de cobertura definida por uma área circular de raio finito, dividido em diversas fatias de operação, conforme ilustrado na Figura 3.2. Cada fatia  $f$  é definida pelo ângulo  $\theta_f$ , cujo valor depende diretamente do ângulo de abertura do feixe principal do radar. O número total de fatias é dado por  $N_{fatias} = round(360/\theta_f)$ . Para cada uma das  $N_{fatias}$ , o radar permanece por um período de tempo  $T_{fatia} = \theta_f/ScanRate$  com seu lóbulo principal direcionado, emitindo um trem de pulsos.

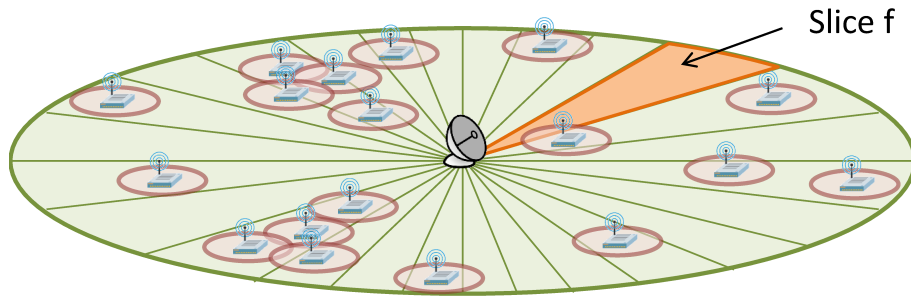


Figura 3.2: Definição das fatias de operação no ambiente de acesso ao meio do radar.

Para cada fatia  $f$ , são definidos(as):

- **Número de USs  $N_{tx}(f)$  transmitindo;**
- **Interferência agregada causada pelos  $N_{tx}(f)$  USs, enquanto o radar mantém seu feixe principal na direção da fatia  $f$  - Denominada de interferência agregada primária, por estar atrelada à interferência proporcionada na direção do lóbulo primário do radar, seu modelo segue a equação 3.1, derivada da equação 2.8 definida anteriormente;**

$$I_{agg}^{prim}(f) = \sum_{j=1}^{N_{tx}(f)} (P_{t_j}^{US} + G_{US} + G_{max}^{radar} - L_j(f) + B_{radar} - B_{US}) \quad (3.1)$$

onde:

$P_{t_j}^{US}$  → Potência de transmissão do US j

$G_{US}$  → Ganho da antena dos USs, quando todos os USs possuem o mesmo ganho

$G_{max}^{radar}$  → Ganho máximo proveniente do feixe principal do radar

$L_j(f)$  → Atenuação do sinal transmitido pelo US j no radar

- **Interferência agregada causada pelos  $N_{tx}(f)$  USs em todas as outras fatias no momento em que o lóbulo principal está direcionado para a fatia  $f$**  - A interferência agregada secundária, derivada da interferência proveniente dos lóbulos secundários do radar, segue o modelo da equação 3.2 de maneira análoga à equação 3.1;

$$I_{agg}^{sec}(f) = \sum_{i \in S \setminus \{f\}} \sum_{j=1}^{N_{tx}(i)} (P_{t_{i,j}}^{US} + G_{US_{i,j}} + G_{min}^{radar} - L_j(f) + B_{radar} - B_{US}) \quad (3.2)$$

onde:

$S = \{1, \dots, N_{fatias}\}$  → Conjunto formado pelas fatias

$G_{min}^{radar}$  → Ganho proveniente dos lóbulos secundários do radar

A partir dos modelos de interferência definidos, pode-se descrever o cálculo do limiar dinâmico utilizado no mecanismo cooperativo proposto conforme se dá em detalhes na Seção 3.3.

### 3.3 Definição e Cálculo do Limiar Dinâmico

O mecanismo cooperativo tem como principal premissa evitar que a interferência proporcionada por múltiplos USs ultrapassem o limiar de interferência, definido pela UIT, para um dado sistema de radar. O método aplicado consiste em realizar o cálculo do limiar de referência de maneira dinâmica, a fim de que o valor resultante limite o uso do espectro do radar por USs, que viriam a causar degradações no serviço do radar. Através do limiar dinâmico, as zonas definidas variam de tamanho de acordo com a variação da interferência agregada. Sendo assim, para uma quantidade de USs transmitindo na banda do radar, o limiar se torna mais rigoroso, aumentando as zonas de exclusão e temporal, impedindo que futuras transmissões proibitivas

ocorram. Esta dinâmica é ilustrada pela Figura 3.3, no qual mostra a variação no tamanho da zona de exclusão de acordo com limiar de referência usado.

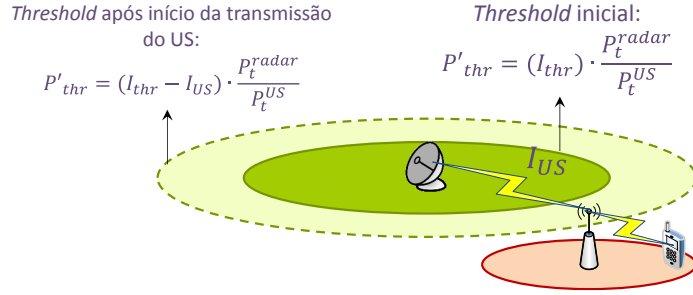


Figura 3.3: Variação no tamanho da zona de exclusão com a variação do limiar de referência.

No cálculo do limiar definido no Capítulo 2, Seção 2.1.2, o resultado indicado na equação 3.3 pode ser reescrito da seguinte forma,

$$P_{thr} = I_{thr} \cdot \frac{P_t^{radar}}{P_t^{US}} \cdot \frac{B_{US}}{B_{radar}} \quad [mW]. \quad (3.3)$$

A partir da equação 3.3, define-se o limiar dinâmico como a variação do  $I_{thr}$  de acordo com o aumento na interferência agregada total proporcionada no radar, definida como a soma das interferências primária e secundária resultantes, como mostra a equação 3.5.

$$I_{agg} = I_{agg}^{prim} + I_{agg}^{sec} \quad [mW]. \quad (3.4)$$

Através de  $I_{agg}$ , define-se o  $I'_{thr}$  como,

$$I'_{thr} = I_{thr} - I_{agg} \quad [mW]. \quad (3.5)$$

A equação acima restringe o limiar resultante, a partir do cálculo mostrado na equação 3.6, onde  $P'_{thr}$  é o novo limiar.

$$P'_{thr} = I'_{thr} \cdot \frac{P_t^{radar}}{P_t^{US}} \cdot \frac{B_{US}}{B_{radar}} \quad [mW] \quad (3.6)$$

Dessa maneira, cada US irá utilizar como referência o novo limiar calculado dinamicamente, a partir das informações transmitidas pelo radar que são necessárias para a aplicação do cálculo. As próximas seções descrevem os algoritmos nos USs e no UP que são necessários para que o mecanismo proposto tenha o comportamento esperado.

### 3.4 Comportamento do UP

Esta seção visa abordar o algoritmo utilizado pelo UP para a atualização do limiar de acordo com a variação da interferência agregada medida pelo radar. A partir do ambiente de acesso definido na Seção 3.2 e das equações 3.1 e 3.2, são definidos *thresholds* de referência específicos para cada fatia, a partir da aplicação da equação 3.6, particular para cada fatia  $f$ . Sendo assim, tem-se que,

$$P'_{thr}(f) = (I'_{thr}(f)) \cdot \frac{P_t^{radar}}{P_t^{US}} \cdot \frac{B_{US}}{B_{radar}} \quad [mW] \quad (3.7)$$

onde:

$$\begin{aligned} I'_{thr}(f) &= I_{thr} - I_{agg}(f) \\ I_{agg}(f) &= I_{agg}^{prim}(f) + I_{agg}^{sec}(f) \end{aligned}$$

O sistema de radar tem conhecimento de  $I'_{thr}(f)$ , através da informação de  $I_{thr}$  particular do sistema e de  $I_{agg}(f)$ , percebida pelo radar no instante em que o lóbulo principal está apontado para  $f$ , de sua potência  $P_t^{radar}$  e de sua banda  $B_{radar}$ . Sendo assim, a informação transmitida por *beacons* aos USs contém o resultado da equação 3.8 definida pelos parâmetros conhecidos pelo radar, e que é parte da equação 3.7 necessária para o cálculo do limiar dinâmico pelo US.

$$P'_{thr}(f) = (I_{thr} - I_{agg}(f)) \cdot \frac{P_t^{radar}}{B_{radar}} \quad [mW] \quad (3.8)$$

O Algoritmo 1 descreve o comportamento do primário, que também pode ser efetuado por meio de uma base de dados. Este elemento poderia exercer o papel do primário, a fim de atualizar, dinamicamente, o limiar de referência. A operação inicia com o envio do limiar inicial  $P_{thr}$  obtido a partir de seu próprio valor de  $I_{thr}$ . Em seguida, o sensoreamento do meio é realizado, nos intervalos entre pulsos, pelo período em que o lóbulo principal se mantém direcionado para uma dada fatia  $f$ . Enquanto o período de tempo for menor ou igual a  $T_{fatia}$ , o radar calcula seu novo limiar,  $P'_{thr}(f)$ , a partir do nível de interferência  $I_{agg}(f)$  recebido naquela direção. Após este período, o radar compara  $P'_{thr}(f)$  com o limiar de todas as outras fatias, de maneira que, o menor limiar seja escolhido, conforme mostra a equação 3.9. Na fatia  $f + 1$ , a mesma operação é realizada, de maneira que  $P'_{thr}(f + 1)$  seja compara com todas as outras  $f - 1$  fatias. O limiar mínimo é selecionado e utilizado como o novo  $P_{thr}$  para todas as fatias, evitando assim que a interferência agregada ultrapasse o limiar  $I_{thr}$  em qualquer uma das fatias que possuem USs.

$$P_{thr} = \min_{f=1, \dots, N_{fatias}} P'_{thr}(f) \quad [mW] \quad (3.9)$$

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo do UP

---

```

for  $f = 1 : N_{slice}$  do
   $P'_{thr}(f) = I_{thr} \cdot P_t^{radar} / B^{radar}$  //Inicializa para todas as fatias com limiar estático
 $f = 1$  //Variável que indica a fatia para em que o feixe principal está direcionado
Set  $T_{fatia}$  //Período de sensoreamento para cada fatia.
while True do
   $(P'_{thr})_{min} = \min_{f=1, \dots, N_{fatias}} P'_{thr}(f)$ 
  Transmite um beacon com a informação  $(P'_{thr})_{min}$ 
  Inicia temporizador T da fatia f //O temporizador é (re)inicializado
  while  $T < T_{fatia}$  do
    Sensoreamento do espectro
  Guarda interferência recebida  $I_{agg}(f)$ 
   $P'_{thr}(f) = (I_{thr} - I_{agg}(f)) \cdot P_t^{radar} / B^{radar}$ 
   $f + \%N_{fatias} + 1$  //O feixe principal do radar se encontra direcionado para a próxima fatia.  $f$  é zero quando  $f > N_{fatias}$ , retornando para a fatia inicial.

```

---

Com a informação propagada pelo radar, o US se comporta de maneira que a informação obtida atualiza seu limiar de referência, que, conseqüentemente, influenciará na sua decisão pelo uso do espectro. A Seção 3.5 descreve a forma como o US se comporta a partir de seu algoritmo, definido mais adiante.

### 3.5 Comportamento do US

Nesta seção, serão abordados os detalhes do algoritmo utilizado pelos USs para acesso dinâmico ao espectro, através do mecanismo cooperativo. O Algoritmo 2 descreve os passos a serem seguidos pelo US para uso do espectro do radar. Inicialmente, o US realiza um sensoreamento para inferir os valores de potência recebida dos lóbulos principal e secundário. A partir deste sensoreamento inicial, o US também consegue inferir o período de rotação do radar e o tempo em que o lóbulo principal permanece apontado em sua direção, dado pelas diferenças dos níveis de potências, assim como foi ilustrado anteriormente pela Figura 2.4. Durante o período de sensoreamento, o US recebe o *beacon* do radar contendo o valor  $(P'_{thr})_{min}$ , a partir do qual introduz seus valores de potência de transmissão  $P_t^{SU}$  e banda  $B_{SU}$  para obter o limiar final  $P_{thr}$ , como mostra a equação 3.10. O  $P_{thr}$  é comparado com o nível de sinal recebido pelo US para inferir em qual zona o mesmo se encontra, e assim realizar a operação necessária sem causar interferências nocivas ao UP.

$$P_{thr} = (P'_{thr})_{min} \cdot \frac{B_{US}}{P_t^{US}} \quad [mW], \quad (3.10)$$

O comportamento definido entre UPs e USs, e o cálculo dinâmico do limiar que leva em conta a interferência agregada percebida pelo radar, possibilita a operação do mecanismo cooperativo descrito anteriormente.

---

**Algoritmo 2:** Comportamento do US

---

```
Sensoreamento e sincronização com o radar
Get  $(P_{Rx})_{main}$  // Potência recebida relacionada ao lóbulo primário do radar
Get  $(P_{Rx})_{side}$  // Potência recebida do lóbulo secundário do radar
TimeOnTarget = Tempo em que o US permanece dentro da região, onde o lóbulo principal está
direcionado
ScanPeriod = Período de escaneamento do radar
Get  $(P'_{thr})_{min}$  // Recebe o beacon do radar
 $P_{thr} = (P'_{thr})_{min} \cdot \frac{B_{SU}}{P_t^{SU}}$ 
if  $(P_{Rx})_{side} < P_{thr}$  then
  if  $(P_{Rx})_{main} < P_{thr}$  then
    zona = 3 // 0 US está na zona 3
    Transmite/Recebe
  else
    zona = 2 // 0 US está na zona temporal
    mainlobe = false while True do
      // loop de operação do US if Primeira rodada dentro do loop then
      Sensoreamento do meio...
      Guarda  $P_{Rx}$ 
      while  $P_{Rx} \neq (P_{Rx})_{main}$  do
        // Caso o sensoreamento inicial seja fora do lóbulo principal, aguarda
        até entrar no lóbulo principal
        Sensoreamento do meio
        Guarda  $P_{Rx}$ 
      while  $P_{Rx} == (P_{Rx})_{main}$  do
        // Estando dentro do lóbulo principal, aguarda até o primeiro instante
        fora do lóbulo para iniciar a transmissão
        Sensoreamento do meio
        Guarda  $P_{Rx}$ 
      Inicia ScanTimer // Inicializa temporizador que sincroniza com o radar no instante
      imediatamente após o lóbulo principal
      while ScanTimer < ScanPeriod - TimeOnTarget do
        Transmite/Recebe // 0 lóbulo principal do radar não está direcionado para o
        US
      while ScanTimer < ScanPeriod do
        Interrompe transmissão // 0 lóbulo principal do radar está direcionado para o
        US
  else
    zona = 1 // 0 US está na zona de exclusão
    mudar para outro canal; // DFS Channel Moving Time (CMT)
```

---

Na próxima seção, serão descritos os detalhes sobre a avaliação de desempenho realizada entre o mecanismo proposto e os já citados anteriormente. Para a avaliação de desempenho do mecanismo DSA proposto, foram implementados em um simulador próprio os mecanismos DFS, DFS-T e *MainBeam* e o cooperativo, com a finalidade de verificar os impactos da operação destes mecanismos em um dado sistema de radar.

### 3.6 Avaliação de Desempenho com Simulador Próprio

Para avaliação de desempenho do mecanismo DSA proposto, foram implementados em um simulador próprio, na linguagem Tcl, os mecanismos DFS, DFS-T e *MainBeam* e o cooperativo, com a finalidade de verificar os impactos da operação destes

mecanismos em um dado sistema de radar. O simulador gera o comportamento esperado de tais mecanismos a partir de um ambiente de simulação específico, conforme descrito na próxima seção.

### 3.6.1 Ambiente de simulação

A Figura 3.2 ilustra o ambiente de simulação, que é composto por múltiplos USs distribuídos aleatoriamente em uma área circular, cuja a densidade é variada de acordo com o ambiente de simulação. O ambiente possui um radar posicionado no centro da área circular, formando um cenário de pior caso, onde a interferência gerada no radar está presente em todas as possíveis direções. Para o radar definido, foram utilizados as especificações técnicas de um radar meteorológico que opera na banda C, extraídas da normas da UIT [24] e [22]. As especificações técnicas utilizadas se encontram na Tabela 3.1. Como pode ser visto, os parâmetros utilizados para os USs definem APs do padrão IEEE 802.11, onde são considerados apenas o tráfego de *downlink*, ou seja, o tráfego transferido do AP à STA associada. Logo, a interferência considerada no radar é proveniente das transmissões dos APs, ocasionadas por um tráfego constante do tipo *constant bitrate* (CBR), para que as interferências no radar se em todo o tempo de simulação. A perda do ambiente sem fio é modelada pelo modelo de propagação *log-distance*,

$$L = L_0 + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad [dB] \quad (3.11)$$

onde,  $L_0$  é a perda de espaço livre,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor,  $d_0$  é a distância de referência, escolhida com o valor de 1 m, e  $\gamma$  é o coeficiente de perda do ambiente sem fio.

Para definir o raio máximo do ambiente de simulação, foi levado em conta um ambiente que pudesse abranger as três zonas de uso do espectro. Com isso, foram calculados os valores de distância, onde se iniciam e terminam as zonas 1 e 2. Foi utilizada a equação de perda de percurso, com a atenuação  $L$  representada pela equação do *log-distance*, levando em conta um valor de  $\gamma = 3.0$ , representando a média do valor de  $\gamma$  utilizado em ambientes urbanos ( $\gamma = 3.5$ ) e rurais ( $\gamma = 2.5$ ). Para encontrar a distância máxima da zona 1, foi calculada a perda de percurso levando em conta o ganho do lóbulo secundário da antena, onde a potência recebida do radar é igual ao  $I_{thr}$  de  $-107$  dBm [24]. Substituindo este valor na equação 3.11, foi encontrado um valor de 0.9 km para a distância máxima da zona 1. De maneira análoga, foi aplicada a perda de percurso, levando em conta o ganho do feixe principal do radar. Neste caso, a distância resultante foi de 131 km. A partir desta distância, os USs estarão dispostos na zona 3. Logo, para que o ambiente pudesse

Tabela 3.1: Especificações técnicas.

Parâmetro	Radar	US
Potência Tx	63.5 dBm	10 dBm
Ganho do feixe principal	44 dBi	0 dBi
Ganho dos lóbulos secundários	-21 dBi	0 dBi
Largura de banda	10 MHz	20 MHz
Frequência	5.6 GHz	5.6 GHz
Largura do feixe principal da antena	12°	antena omni
$I_{thr}$	-107 dBm	N/A

abranger as três zonas, foi escolhido um raio máximo de 200 *km* de área circular onde os USs foram dispostos. A extensão da área justifica o uso de  $\gamma$ , representando a abrangência de áreas urbanas e rurais. Para ambientes de longa distância, considera-se a perda ocasionada pela forma esférica da Terra [27], adicionando um decaimento de 1.5 dB/km à perda do ambiente sem fio devido à difração do sinal causada pela curvatura da Terra. Dada a localização do radar em grandes altitudes, não foram considerados os efeitos de perda por relevo.

O ambiente acima descrito foi gerado no simulador próprio, em conjunto com os mecanismos DSA para a avaliação dos impactos de interferência no radar. As métricas avaliadas e os resultados obtidos estão descritos na próxima seção.

### 3.6.2 Resultados

Na avaliação de desempenho, foram adotadas duas métricas: a primeira mede a interferência agregada provocada pelos USs no UP, para cada mecanismo DSA, variando a densidade de USs presentes. Os USs estão a uma distância que os mantêm fora da zona de colisão uns dos outros. Neste caso, transmissões simultâneas irão ocorrer. A interferência entre USs não foi explorada, pois a mesma não influencia na análise de desempenho aqui realizada. A segunda métrica estima a eficiência no uso do espectro, isto é, o número de USs que possuem permissão no uso oportunista da banda de radar e os que não possuem. Neste caso, foi utilizado a porcentagem de USs encontrados em cada uma das três zonas de operação. Para ambas as métricas, foi utilizado o mesmo ambiente de simulação, descrito na Seção 3.6.1, com um total de 300 rodadas para cada densidade de USs, onde cada uma delas gera posições aleatórias distintas para cada um dos secundários. Os resultados obtidos possuem um intervalo de confiança de 95% levando em conta todas as rodadas.

O gráfico ilustrado na Figura 3.4 mostra a interferência agregada para diferentes densidades de USs. No caso dos mecanismos DFS, DFS-T e *MainBeam*, foi utilizado o limiar estático de -64 dBm proposto pela UIT. No entanto, um mecanismo



extra foi utilizado, através do cálculo do limiar pré-ajustado. A partir do ambiente com a maior densidade de USs, foi encontrado um valor de limiar que impedisse a interferência agregada de ultrapassar o  $I_{thr}$  de  $-107$  dBm do radar. O cenário gerado considera a densidade máxima de USs que podem usar o meio, limitada pelo mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) do IEEE 802.11. O mecanismo CSMA/CA, para evitar que colisões ocorram entre transmissões vizinhas, impede que transmissões simultâneas ocorram dentro de uma mesma zona de colisão. No entanto, o ambiente foi gerado, de maneira que todos os USs possam transmitir simultaneamente, gerando um cenário de pior caso para a interferência agregada. Com isso, foi considerada uma área de cobertura circular de 200 m de raio para o AP, em um ambiente *indoor*. É assumido que colisões ocorram com probabilidade nula para distâncias acima de 200 m. Considerando que os USs estejam distribuídos na área de 200 km de raio e fora das zonas de colisão de seus vizinhos, para que transmissões simultâneas possam ocorrer, é possível uma densidade máxima de  $\frac{(200)^2/(0,2)^2}{\pi \cdot (200)^2} \approx 8 \text{ USs}/\text{km}^2$  dentro da área utilizada. Para este valor de densidade máxima, foram realizadas simulações iniciais para se calcular um valor de  $P_{thr}$  ideal que pudesse impedir interferências nocivas ao primário. Os resultados obtidos convergiram para um valor de  $P_{thr}$  próximo de  $-73$  dBm, que impede que a interferência agregada ultrapasse o  $I_{thr}$  para a densidade máxima calculada. Logo, denomina-se de DFS-T com limiar ajustado, o mecanismo que utiliza o valor citado de limiar, garantindo que a interferência agregada não ultrapasse o  $I_{thr}$  até a densidade máxima de  $8 \text{ USs}/\text{km}^2$ . Pelo gráfico, pode ser visto que os únicos mecanismos capazes de manter a interferência abaixo do limiar de  $-107$  dBm são o DFS-T com limiar pré-ajustado, *MainBeam* e o mecanismo cooperativo proposto. Apesar de ser amplamente usado em dispositivos IEEE 802.11, o DFS se mostrou altamente nocivo, com sua interferência agregada ultrapassando o limiar a partir de uma densidade em torno de  $0.5 \text{ USs}/\text{km}^2$ .

Para o cenário de maior densidade de USs, foi analisada a evolução da interferência agregada de acordo com a variação na quantidade USs ativos. A quantidade total de 100.000 USs é correspondente à densidade de  $3.0 \text{ USs}/\text{km}^2$ . Para todos os casos, diz-se que um US é ativo quando o mesmo inicia o sensoreamento do espectro para uso oportunista. No cenário proposto, o sensoreamento é inicializado por cada US em ordem decrescente de distância do radar. Para este caso, o resultado da evolução da interferência agregada pode ser visto no gráfico da Figura 3.5. Como esperado, o mecanismo cooperativo possui um controle maior na contenção da interferência agregada, não permitindo que USs transmitam na banda de radar assim que a interferência agregada atinja o valor máximo de  $-107$  dBm. Os mecanismos DFS-T com limiar ajustado e *MainBeam* também conseguem manter a interferência abaixo do limiar. No entanto, não há nenhum controle da evolução da interferência

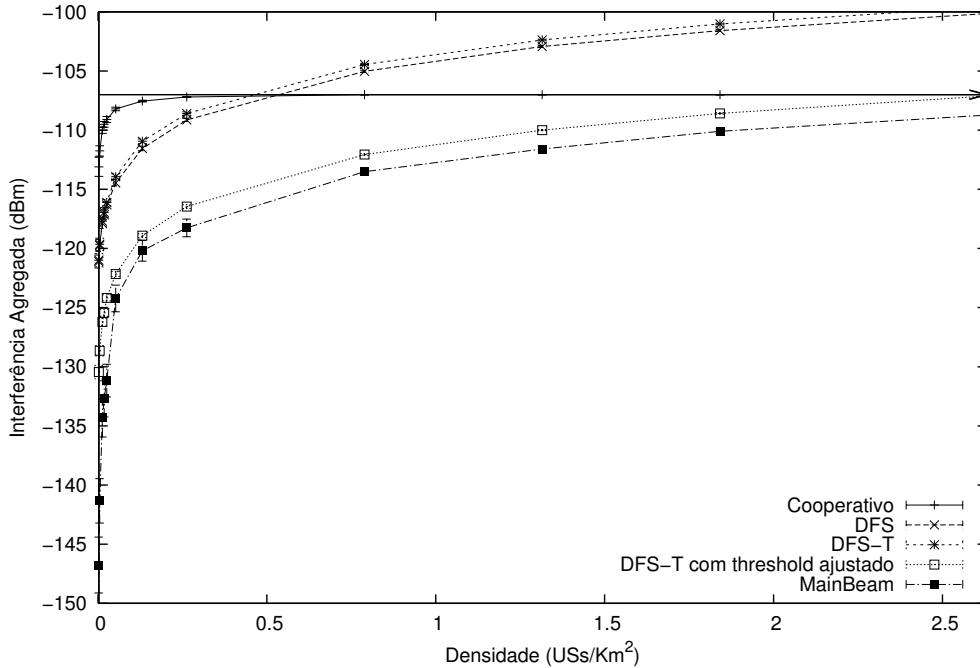


Figura 3.4: Nível de interferência agregada no radar para cada mecanismo avaliado.

agregada por esses mecanismos, atingindo valores cada vez maiores de acordo com o aumento da densidade USs. Neste caso, não há como garantir que estes mecanismos impeçam interferências nocivas para densidades maiores que  $3.0 \text{ USs}/\text{km}^2$ .

Analisando a segunda métrica, o resultado obtido é ilustrado no histograma da Figura 3.6, onde se tem a distribuição final dos USs por zonas de operação. Neste caso, o mecanismo cooperativo foi comparado com o caso ideal do DFS-T com limiar ajustado, variando a densidade em cada um dos casos. Analisando o histograma, verifica-se que o mecanismo cooperativo permite que mais USs estejam inseridos na zona 3, que possui mais oportunidades de uso do espectro, possibilitando que uma quantidade maior de nós utilizem o espectro com transmissões livres de interrupções. No entanto, para densidades a partir de  $0.26 \text{ USs}/\text{km}^2$ , o método proposto começa a inserir USs na zona de exclusão, impedindo que a interferência cresça acima do limiar. Já, o DFS-T com limiar restritivo possui praticamente 0 % de USs na zona de exclusão. É possível notar que o limiar restritivo, apesar de inserir poucos nós na zona de exclusão e ter seu limiar estático de  $-74 \text{ dBm}$ , impossibilita que mais USs se utilizem das oportunidades de uso espacial e temporal do espectro para densidades abaixo de  $0.263 \text{ USs}/\text{km}^2$ , com mais USs inseridos nas zonas 2 e 3 para o limiar dinâmico. Neste caso, o uso do limiar dinâmico se mostrou mais eficiente quanto ao uso do espectro, com o caso ideal agindo de forma restritiva, pelo fato do limiar usado ser o de pior caso. Além disso, o caso ideal possui seu limiar dimensionado para uma densidade máxima, onde dispositivos IEEE 802.11 encontram-se livres de

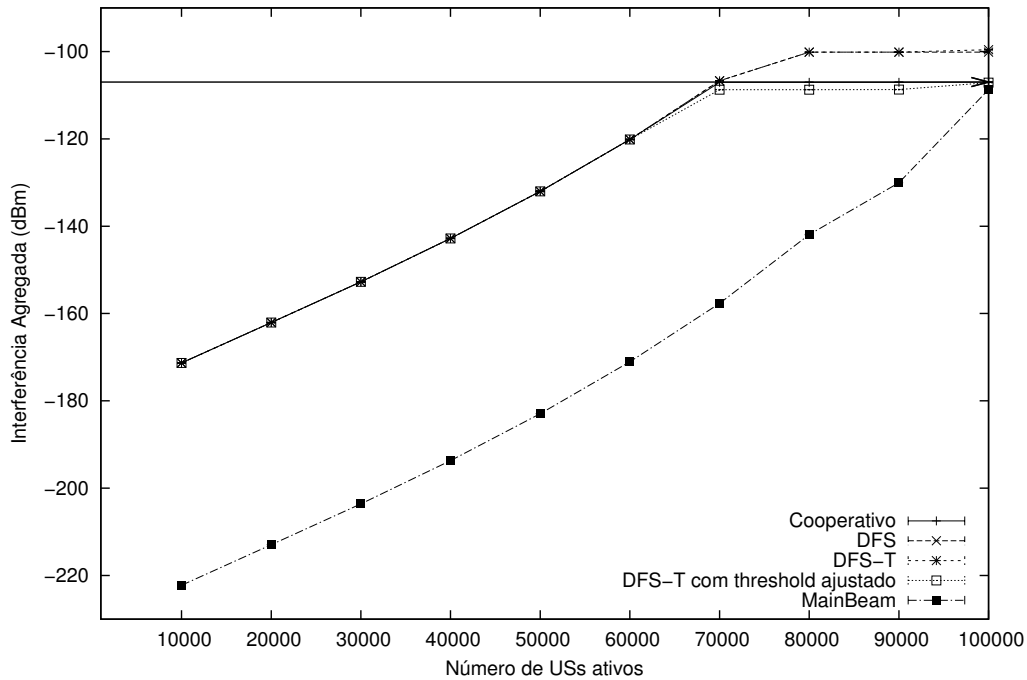


Figura 3.5: Evolução da interferência agregada por USs ativos.

colisão. Contudo, em cenários com densidades acima do valor calculado, o uso do limiar estático não garante que interferências nocivas sejam geradas. Já o uso do limiar dinâmico, que se adapta de acordo com a densidade, garante o uso oportunista livre de interferências nocivas.

### 3.7 Conclusões do Capítulo

No acesso dinâmico ao espectro, um dos desafios enfrentados para o uso oportunista das faixas licenciadas do espectro, é a interferência nociva causada pelos secundários aos usuários primários que detêm o direito de uso desta faixa de frequência. Neste capítulo, foi explorado o problema citado para o caso de uso dinâmico do espectro em bandas de radar por múltiplos USs.

Com o intuito de viabilizar o uso oportunista das bandas de radar, dada a existência de oportunidades temporais e espaciais desta faixa do espectro, foi proposto um mecanismo DSA cooperativo entre radar e USs, de maneira a evitar que a interferência agregada afete o primário acima de um limiar pré-estabelecido. O mecanismo proposto foi avaliado, quando comparado com os outros mecanismos DSA propostos na literatura, no intuito de averiguar o impacto da interferência agregada em um radar meteorológico que opera na banda C.

Para a avaliação, foi desenvolvido um simulador próprio que implementa os me-

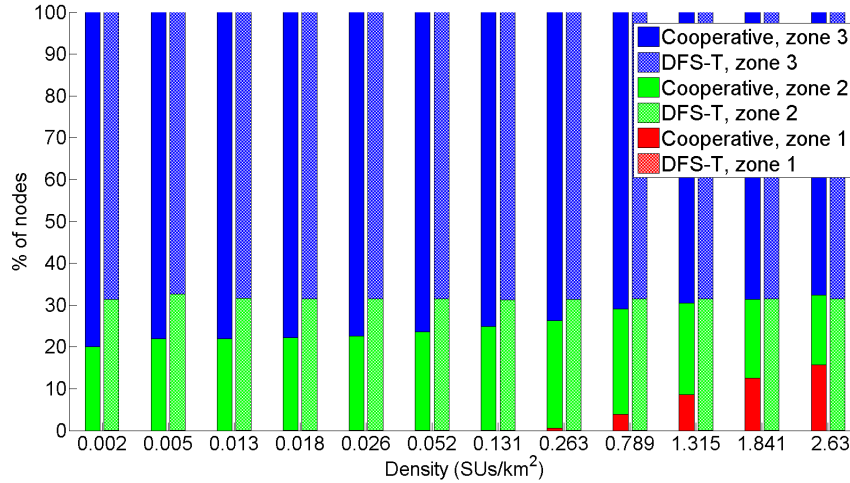


Figura 3.6: Histograma da porcentagem de USs inseridos em cada uma das zonas de operação.

canismos DSA e o ambiente de acesso do radar, utilizando parâmetros reais deste sistema, extraídos das normas da UIT. Os resultados expostos mostram que, o mecanismo cooperativo é o único que garante uma interferência abaixo do limiar para qualquer densidade de USs. Apesar disso, para altas densidades, o cooperativo, quando comparado com o mecanismo ideal para a densidade máxima, limitada pelo CSMA/CA em redes IEEE 802.11, se mostrou bastante restritivo, com uma quantidade maior de USs dentro da zona de exclusão. No entanto, para densidades menores, o mecanismo cooperativo oferece mais oportunidades de uso do espectro que os mecanismos de limiar estático propostos na literatura, garantindo que a interferência agregada permaneça abaixo do limiar estipulado.

A avaliação desenvolvida evidencia o desempenho obtido dos mecanismos DSA sob o ponto de vista do primário. Além disso, o mecanismo cooperativo foi desenvolvido para uso em tecnologias de redes sem fio genéricas, apenas para a validação dos efeitos de interferência no primário. Dadas as vantagens obtidas pelo mecanismo proposto e as características de uso oportunista presentes nas bandas de radar, o próximo capítulo insere o mecanismo de acesso dinâmico ao espectro dentro do contexto das redes celulares 4G. Com isso, serão desenvolvidas as análises de desempenho baseado em uma tecnologia específica de redes sem fio atualmente bastante adotada, e que vem sendo estudada pela FCC para fins de acesso à banda de radar por redes sem fio domésticas. Tais redes são cobertas por células de curtíssimo alcance, denominadas de femtocélulas, com o intuito de prôver uma melhor qualidade de acesso ao meio por usuários inseridos em ambientes *indoor*. Com isso, a análise aqui abordada será expandida, verificando o desempenho dos USs quando se utilizam da banda de radar e, mais uma vez, o impacto das transmissões dos USs no radar. Este tipo de

análise busca complementar o estudo desenvolvido neste capítulo, e inserido em um contexto de redes sem fio altamente adotado atualmente.

# Capítulo 4

## Utilização da banda de radar em Redes *Long-Term Evolution* (LTE) Heterogêneas

Com as vantagens expostas no uso da banda de radar pelo estudo inicial realizado, o objetivo do trabalho exposto nos Capítulos 4 e 5 é implementar os mecanismos DSA explorados nos Capítulos 2 e 3 dentro do contexto das redes celulares de quarta geração (4G), evidenciando os principais ganhos obtidos pelo o uso oportunista das bandas de radar neste tipo de tecnologia de redes sem fio.

Como oportunidade de uso prático da faixa do espectro utilizado por sistemas de radar, a FCC (*Federal Communications Commission*), órgão regulador norte-americano, vem regulamentando o uso oportunista das bandas de radar em redes celulares domésticas 4G, constituída por uma estação-base denominada Home eNodeB (HeNB). A tecnologia LTE (*Long-Term Evolution*) é, atualmente, a adotada em redes móveis 4G. Conforme será visto no decorrer deste capítulo, uma HeNB serve para suprir a demanda de tráfego originada por clientes de ambientes *indoor*, complementando a oferta de recursos das macrocélulas, denominadas de Macro eNodeBs (MeNBs)[21]. Este cenário caracteriza uma rede heterogênea (HetNet), na qual células dos dois tipos citados compartilham a mesma faixa de espectro licenciada do LTE. Com a oportunidade do uso oportunista das bandas de radar, usuários *indoor* poderão usufruir de seus espaços em branco, evitando assim o surgimento de interferência com usuários da MeNB. O FCC define em [21], uma entidade denominada SAS (*Spectrum Access System*), que visa dar suporte ao LTE para o uso oportunista das bandas de radar. Essa entidade tem como base, o uso do espectro de radar livre de interferências nocivas ao primário, e possibilitando que múltiplas femtocélulas possam usufruir dos *whitespaces* existentes. Este capítulo visa, além de avaliar o uso da banda de radar quando comparada com a banda LTE comum, apresentar

uma proposta de um SAS para o LTE, utilizando como base o mecanismo DSA cooperativo proposto no capítulo anterior.

O capítulo é organizado da seguinte forma: a Seção 4.1 detalha os aspectos mais relevantes sobre redes LTE para acesso dinâmico ao espectro. Serão tratadas as características de camada física importantes para o entendimento acerca dos mecanismos DSA aplicados neste tipo de tecnologia. Mais adiante, serão definidos os conceitos de redes heterogêneas, as motivações que levaram ao surgimento destas, e o problema atual a ser atacado através do mecanismo DSA proposto no capítulo anterior. Em seguida, serão detalhadas a implementação e verificação do ambiente de acesso ao meio do radar proposto neste trabalho para o simulador de redes ns-3, que será utilizado na avaliação de desempenho dos mecanismos. Serão evidenciados os ganhos obtidos a partir do uso da banda de radar, quando comparado com a banda LTE em um ambiente heterogêneo, desenvolvido no ns-3. Por fim, o mecanismo cooperativo implementado para o LTE será descrito, avaliando e comparando com os outros mecanismos DSA citados anteriormente. A implementação dos mecanismos também foi desenvolvida no ns-3, para a devida avaliação de desempenho da rede LTE com acesso dinâmico ao espectro.

## 4.1 Redes LTE

A tecnologia LTE é, atualmente, a adotada pela nova geração de redes celulares, a partir da evolução das redes de terceira geração (3G), que compõem a arquitetura de redes celulares da geração passada. Assim como as tecnologias anteriores, a padronização das redes 4G foi desenvolvida pelo grupo de trabalho 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), que visa adotar as mais recentes tecnologias de acesso desenvolvidas, como a multiplexação de frequências ortogonais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e a tecnologia de múltiplo acesso OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Tais tecnologias visam o uso eficiente dos recursos de rádio, a partir da ocupação reduzida do espectro de frequência por subportadoras ortogonais de 150 KHz de banda. Além disso, um dos aspectos principais das redes 4G foi a implantação do suporte completo à comutação por pacotes no núcleo da rede, em contraste ao modelo antigo de comutação por circuitos adotado nos sistemas celulares anteriores. A atual tendência pelo uso de serviços sobre o protocolo IP (*Internet Protocol*) motivou o uso pela comutação por pacotes em redes celulares, provendo conectividade transparente entre usuários móveis e a rede global, denominada PDN (*Packet Data Network*) em redes 4G. A ausência de interrupções sucessivas, provocadas por eventos de *handover* entre células vizinhas, dada a mobilidade dos usuários, foi um dos pré-requisitos para que se pudesse operar sobre este novo paradigma de redes móveis, mantendo a eficiência obtida pelos

esquemas de comutação por circuitos [3].

A evolução das redes de acesso móvel é denominada E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*), caracterizada pela evolução da tecnologia UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) utilizada em redes 3G, e composta por um conjunto de estações rádio-base, intitulada eNB (*Evolved Node B*), que servem de infraestrutura de acesso para os usuários finais, denominados UEs (*User Equipments*). A Figura 4.1 ilustra os elementos que compõem uma rede LTE, contendo as denominações de cada interface de conexão que interliga cada elemento da rede. Conforme mencionado, os elementos de rede eNB e UE compõem o E-UTRAN, enquanto que todos os outros elementos estão inseridos no núcleo da rede (*core*), denominado EPC (*Evolved Packet Core*). O EPC é composto por equipamentos que realizam funcionalidades como: encaminhamento de pacotes, conexão com a rede global, identificação, autorização e serviços de tarifação dos UEs, e funcionalidades de segurança, como encriptação e geração de chaves assimétricas, para todo tráfego transferido pelo núcleo. Os detalhes e as funcionalidades de cada um dos elementos do EPC estão fora do escopo deste trabalho, sendo de interesse somente os aspectos de acesso ao meio do E-UTRAN e o encaminhamento de pacotes realizados pelos elementos *Serving Gateway* (SGW) e *PDN Gateway* (PGW) do EPC, a serem abordados com maiores detalhes nas próximas seções.

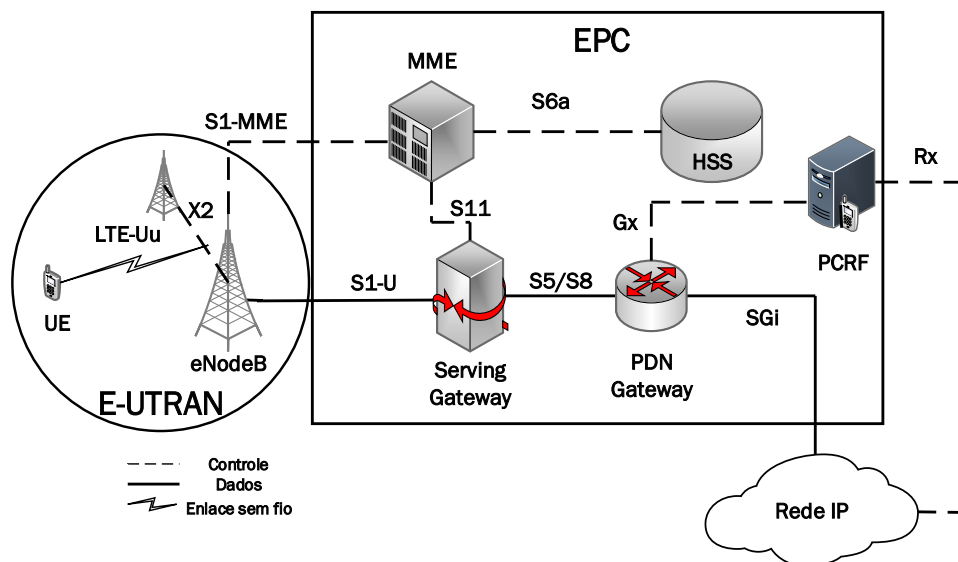


Figura 4.1: Topologia composta pelos elementos da rede LTE.

#### 4.1.1 E-UTRAN e a Tecnologia de acesso ao meio

O E-UTRAN compõe a infraestrutura da rede LTE que provê a tecnologia de acesso ao meio para a transferência de dados originados dos UEs, por meio do canal de



*uplink*, e com destinos aos mesmos através do canal de *downlink*. A topologia de acesso ao meio do LTE é ilustrada pela Figura 4.1, composta pela interface sem fio Uu, que interliga UE à eNB associada, e uma interface de interconexão entre eNBs, denominada X2, que provê a troca de informações necessárias na realização de operações como *handoff* e gerenciamento do espectro para reuso de frequências.

Segundo [3], o E-UTRAN é responsável pelas seguintes funções:

- **Gerenciamento dos recursos de rádio** - Relacionado com as funções de controle de admissão de acesso de UEs à rede LTE, controle de mobilidade dos usuários entre eNBs, escalonamento e alocação dinâmica dos recursos de acesso ao meio para os UEs, tanto no *uplink* quanto no *downlink*.
- **Compressão de cabeçalho** - Auxilia no uso eficiente da interface de rádio através da compressão dos cabeçalhos das diversas camadas que compõem um pacote IP, constituindo um *overhead* significativo na transferência de dados, especialmente em aplicações de tempo real como VoIP (*Voice over IP*) e *streaming* de vídeo, comprometendo a qualidade na experiência (*Quality of Experience* - QoE) do usuário. A compressão de cabeçalho permite que haja menos *overhead* nos pacotes transmitidos, reduzindo os riscos de comprometimento de QoE das aplicações utilizadas pelos UEs.
- **Segurança** - Todos os dados enviados pela interface sem fio tanto pela eNB, quanto pelos UEs possuem suas confidencialidades garantidas por algoritmos de criptografia, os quais o LTE não estipula um uso padronizado.
- **Conectividade com o EPC** - Consiste na troca de sinalizações com os elementos de rede que compõem o EPC, através de interfaces S1 que interligam as eNBs com os elementos MME (*Mobility Management Entity*) e SGW, para fins de transferência de dados e de informações de controle, como tarifação de serviços, admissão de UEs e direcionamento de tráfego em eventos de mobilidade entre eNBs.

### Alocação de recursos

A tecnologia de acesso ao meio das redes LTE se dá através de alocação de recursos de rádio controlado pela eNB. Os recursos são alocados de acordo com um algoritmo de escalonamento de recursos pré-definido que, através de um conjunto de regras e priorização de tráfego, estipula a distribuição de recursos entre os diferentes usuários [28]. Os recursos de acesso ao meio são definidos de acordo com transmissões de *downlink* e *uplink*, organizados em quadros (*frames*) de 10 ms de duração, sendo que, cada quadro engloba 10 subquadros (*subframes*) de 1 ms. Cada *subframe* é

formado por 2 *slots* de 0,5 ms, onde estão inseridos os recursos de acesso da camada física. A Figura 4.2 ilustra a divisão e alocação de recursos entre uma eNB e um UE.

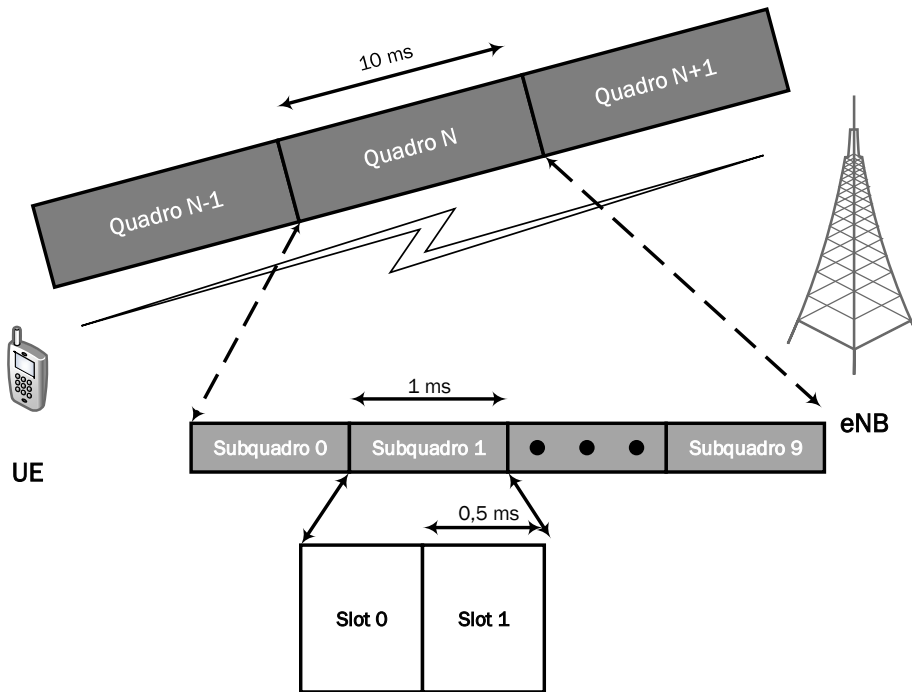


Figura 4.2: Alocação de recursos entre eNB e UE.

O recurso de camada física contido em um *slot* é constituído por um *Resource Block* (RB), a menor unidade existente nos recursos de acesso ao meio sem fio por dispositivos LTE, composto por 12 subportadoras OFDM de 15 KHz cada, e com uma duração de 0,5 ms. Cada subportadora armazena 7 símbolos, gerando um total de 84 símbolos a serem transmitidos em um RB. A alocação de recursos de transmissão se dá a cada *subframe*, definindo um *Transmission Time Interval* (TTI), a menor unidade de transmissão de dados possível dentro do LTE. À cada TTI, diversos mecanismos de controle são realizados para alimentar o escalonador de recursos da eNB, dentre eles a qualidade do canal utilizado, através de mensagens de *feedback* dos UEs de indicadores de qualidade do canal (*Channel Quality Indicator - CQI*) de acordo com a relação sinal/ruído (SINR - *Signal to Interference plus Noise Ratio*) percebida pelo usuário. A largura de banda a ser usada no sistema define a quantidade de RBs que serão usados na alocação de recursos pela eNB. A Figura 4.3 ilustra a estrutura dos recursos de acesso descritos, onde pode ser visto um *Resource Element* (RE), constituído por uma subportadora OFDM.

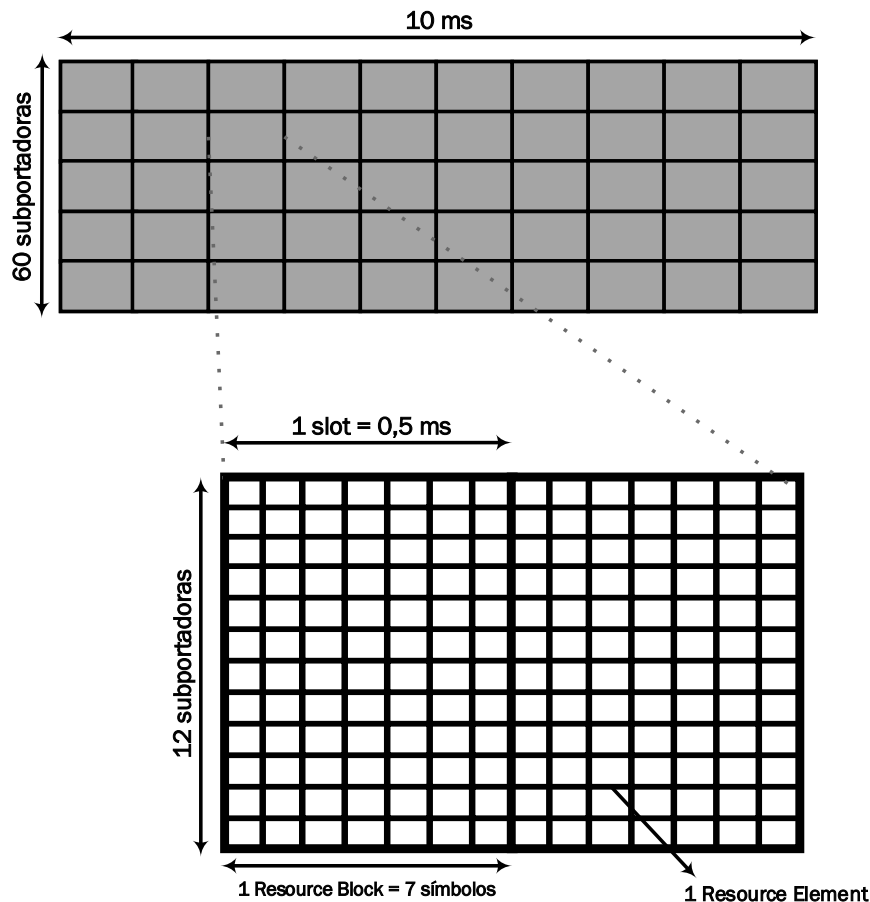


Figura 4.3: Ilustração dos RBs inseridos na alocação de recursos LTE.

### Técnicas de transmissão por duplexação

As transmissões pelo meio sem fio podem se dar em dois sentidos: do UE à eNB, ou da eNB ao UE. Para que ambas as transmissões não venham a interferir entre si, duas técnicas são adotadas de maneira a realizar o que é chamado de duplexação, ou seja, a combinação entre os dois sentidos de transmissão: a duplexação por divisão de frequência (*Frequency Division Duplex - FDD*) e a duplexação por divisão de tempo (*Time Division Duplex - TDD*). Na primeira, o acesso ao meio é realizado, de maneira que, a transmissão em sentidos opostos ocorram em dois canais distintos. Neste caso, o *downlink* possuirá um canal reservado para que ocorram as transmissões da eNB em direção ao UE, enquanto que o *uplink*, analogamente, possuirá um canal exclusivo para transmissões no sentido oposto. Já a técnica de duplexação TDD, utiliza a multiplexação no tempo para a transferência em ambos os sentidos, a partir do compartilhamento de um único canal comum entre *downlink* e *uplink*. O diagrama da Figura 4.4 ilustra a diferença do acesso ao meio para as

duas tecnologias.

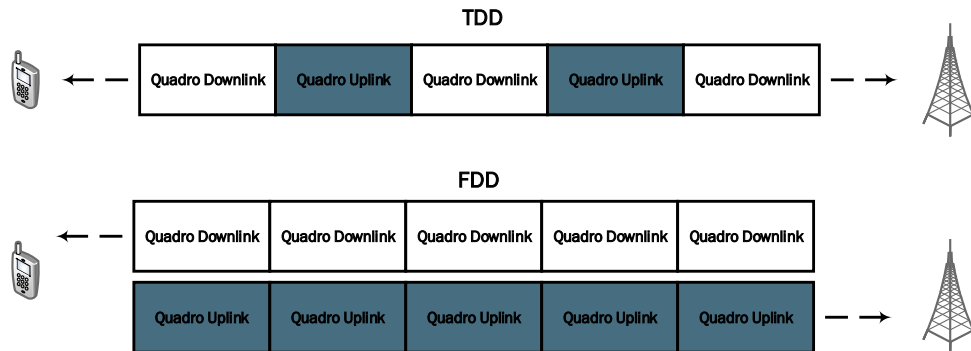


Figura 4.4: Diferença de uso do meio entre as tecnologias FDD e TDD.

Para um cenário de múltiplas eNBs, colisões entre RBs poderão ocorrer tanto no esquema FDD, quanto no TDD. A partir da alocação simultânea dos mesmos RBs por eNBs distintas, a interferência proporcionada entre as transmissões pode provocar eventuais perdas de dados dos UEs escalonados nos RBs que sofreram colisões. Esta característica de perda é de suma importância no cenário de redes heterogêneas, a ser tratado mais adiante.

#### 4.1.2 Conexão entre E-UTRAN e EPC

A conexão existente entre E-UTRAN e EPC se dá através da interface S1, que interconecta eNBs com os elementos MME (S1-MME) e SGW (S1-U) do EPC. A conexão com o MME proporciona a troca de mensagens de controle, que possuem diversas funções. Dentre elas, se encontra a função para o processamento de informações como controle de admissão e tarifação dos UEs associados. Outra função é a de gerenciamento de *bearers* de tráfego, que definem regras de priorização para garantia de QoS (*Quality of Service*) das aplicações utilizadas pelos UEs. Por fim, o gerenciamento de conexões, que incluem o estabelecimento de conexões e segurança entre o núcleo da rede e UEs, que também lida com o gerenciamento de mobilidade dos UEs para restabelecimento de conexão e re-roteamento do tráfego. O SGW tem como principal função a transferência de dados dos usuários, de acordo com as regras de priorização de tráfego dos *bearers* definidos. De forma geral, trata-se de um *gateway* da rede de acesso do LTE. Logo, a interface S1-U realiza a transferência de pacotes IP dos UEs para o EPC ou originados do EPC. Neste caso, o elemento PGW possui um papel fundamental, servindo de *gateway* para o SGW, e realizando a transferência de dados internet (PDN). Sendo assim, o PGW realiza funções de roteamento e filtragem dos pacotes entre as diferentes regras de QoS. Todos os ou-

tros elementos que constituem o EPC estão fora do escopo deste trabalho, sendo o SGW e PGW os elementos do núcleo mais relevantes no estudo realizado.

### 4.1.3 Pilha de protocolos do LTE

A pilha de protocolos do LTE é dividida em duas estruturas distintas: plano de usuário (*User Plane*), que possui uma pilha de protocolos utilizada na transferência de pacotes IP dos UEs e plano de controle (*Control Plane*), cuja pilha de protocolos é definida para a geração e transferência de informações de controle da rede [3]. Cada estrutura será abordada nas seções a seguir.

#### Plano de usuário

Na pilha de protocolos definida no plano de usuários, é realizado o encapsulamento de um pacote IP para um determinado UE, ou seja, os dados gerados a partir de uma aplicação/serviço utilizado(a) pelo usuário final. Neste caso, o encapsulamento se inicia na camada GTP (*GPRS Tunneling Protocol*), tratando-se de um protocolo próprio que visa reduzir o *overhead* dos cabeçalhos que compõem um pacote IP, utilizado a partir do elemento PGW, que recebe os pacotes da Internet, e os encapsula no protocolo GTP, que é utilizado como referência até a eNB. Diferentes protocolos são utilizados entre interfaces distintas. O GTP, por exemplo, é utilizado somente nas interfaces S1 e S5/S8, que interconectam os elementos do EPC, até a eNB. A Figura 4.5 ilustra as pilhas de protocolos utilizadas nas diversas interfaces até o UE no plano de usuário. Logo após o processamento do cabeçalho GTP, o pacote é desencapsulado, tomando novamente a forma de um pacote IP no UE, conforme visto na figura.

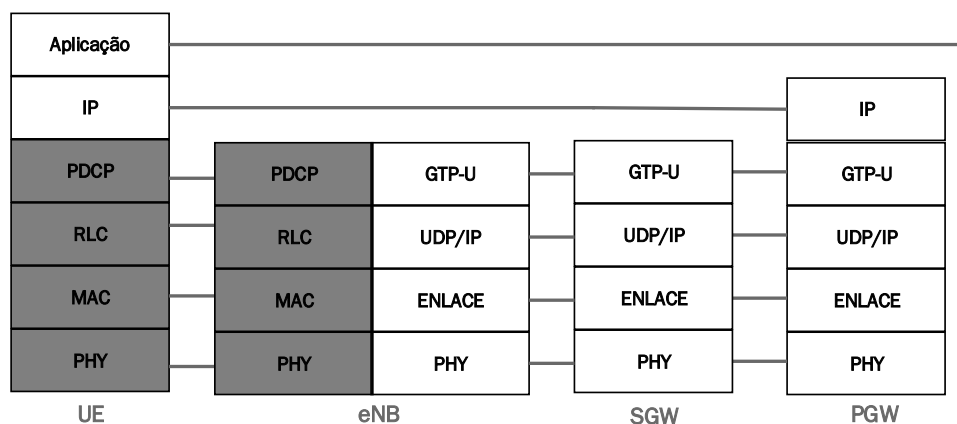


Figura 4.5: Pilha de protocolos definida no plano de usuário, para cada interface da rede LTE [3].

A pilha de protocolos do E-UTRAN, ilustrada pelas camadas em cinza, é formada pelas camadas PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), RLC (*Radio Link Control*) e MAC (*Medium Access Control*), onde são utilizadas na comunicação estabelecida entre eNB e UE (interface Uu). O PDCP é responsável por processar os pacotes IP e, dependendo dos requisitos exigidos no *bearer* do qual o pacote faz parte, suas principais funções são as seguintes: compressão de cabeçalhos, segurança (proteção da integridade e autenticidade) e suporte para reordenamento e retransmissão de pacotes durante eventos de *handover*. A camada RLC possui as seguintes funções: segmentação e remontagem de pacotes segmentados para as camadas superiores, de maneira a adaptar o tamanho da estrutura de dados que a interface de rádio suporta para transmissão. Para casos de *bearers* que não são tolerantes a erros de transmissão, a camada RLC também atua na retransmissão de pacotes perdidos pelo meio sem fio. Além disso, a camada RLC atua no re-ordenamento dos pacotes recebidos a partir das retransmissões efetuadas. Por fim, a camada MAC do plano de usuário realiza a multiplexação dos dados provenientes de diferentes regras de priorização de tráfego. Neste caso, através das regras do *bearer* de cada tráfego, a camada MAC estipula a quantidade de dados que pode ser transmitida para cada *bearer* e, dessa forma, instrui para a camada RLC o tamanho dos pacotes que a mesma deve prover. Com isso, a camada MAC é responsável por garantir que a QoS seja alcançada para cada *bearer* durante o processo de multiplexação. Na eNB, a camada MAC atua com o escalonador de recursos, que realiza a alocação dos recursos de rádio para cada UE, dependendo das regras de cada *bearer* existentes em cada um dos UEs. No caso do escalonamento de recursos no *uplink*, a camada MAC dos UEs informam à eNB a quantidade de dados armazenada em seus respectivos *buffers*, para a devida alocação de recursos no enlace de subida.

Estas são as principais funções exercidas pela pilha de protocolos do plano de usuário. A seguir, serão detalhados os principais aspectos da pilha de protocolos definida no plano de controle.

### **Plano de controle**

A pilha de protocolos definida no plano de controle serve para o suporte à troca de mensagens de controle entre os UEs e eNBs, sendo processadas até o MME, conforme ilustrado na Figura 4.6.

As camadas ilustradas em cinza representam a pilha de protocolos de controle do E-UTRAN, denominadas de *Access Stratum* (AS). A nomenclatura serve para diferenciar estes protocolos do protocolo NAS (*Non-Access Stratum*), sendo este usado para troca de mensagens de controle com o EPC, enquanto que o AS lida com mensagens de controle referentes ao acesso ao meio sem fio. Neste caso, estão fora do escopo deste trabalho maiores detalhes referentes ao protocolo NAS.

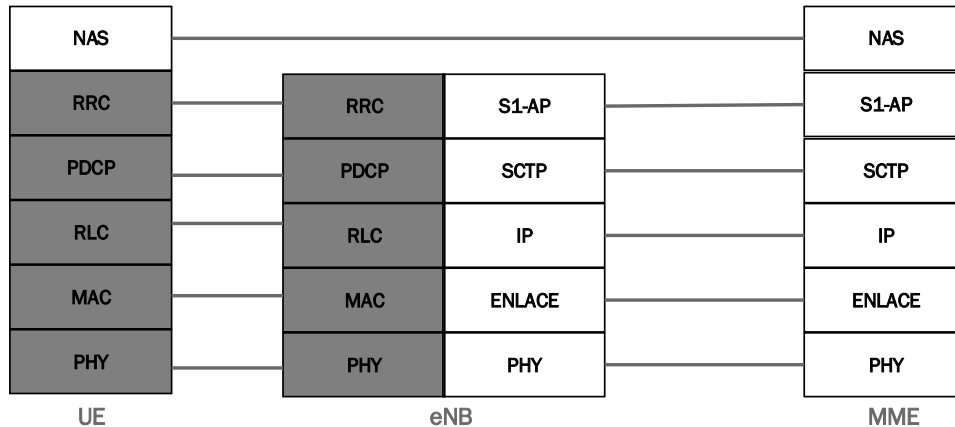


Figura 4.6: Pilha de protocolos definida no plano de controle, para cada interface da rede LTE [3].

As camadas inferiores da pilha de protocolos do E-UTRAN possuem as mesmas funções que as descritas no plano de usuário, com exceção da compressão de cabeçalhos, inexistente no plano de controle. O protocolo RRC (*Radio Resource Control*) é considerado um protocolo de camada 3 da pilha de protocolos AS. O mesmo realiza as principais funções de controle do acesso ao meio sem fio, sendo responsável por estabelecer *bearers* de rádio e configuração dos parâmetros de transmissão como, frequências centrais de transmissão no *uplink* (denominada, no LTE, de UL-EARFCN - *Uplink Absolute Radio-Frequency Channel Number*) e *downlink* (DL-EARFCN), largura de banda, níveis de potência, através da troca de mensagens controle entre eNB e UEs. Dentre as principais funções do RRC, estão:

- **Informações do sistema** - Lida com o *broadcast* de informações do sistema, que inclui o *status* atual de cada UE (ocioso, ativo ou em mobilidade), o canal ARFCN utilizado pela eNB, a largura de banda, em quantidade de RBs, e outros parâmetros relacionados à camada física do LTE.
- **Controle de conexão RRC** - Realiza o estabelecimento de *bearers* de rádio, garantindo a priorização de tráfego na interface de rádio, transferência de contexto dos UEs durante eventos de *handover* entre eNBs e configuração das camadas inferiores frente ao contexto de camada física utilizado.
- **Controle de mobilidade entre tecnologias de acesso distintas** - Inclui, no *handover* comum, o suporte à *handover* com tecnologias distintas, como o 3G ou 2G, provendo toda informação à respeito do contexto atual dos UEs, incluindo informações de segurança.

- **Configuração de sensoreamento e geração de relatórios** - Esta característica fornece ao LTE suporte ao acesso dinâmico ao espectro, de maneira que, eventos de mobilidade entre frequências sejam realizados a partir das medições realizadas por UEs e eNBs, no intuito de selecionar o canal com melhor qualidade. Inclui, nesta funcionalidade, a configuração no intervalo de sensoreamento do meio para a geração de relatórios, que detalham a qualidade percebida do canal durante o período de sensoreamento, e a decisão, por parte da eNB, na utilização do canal mais apropriado de acordo com os resultados listados no relatório.

Conforme detalhado no último tópico, o protocolo RRC possui características relevantes para a definição e realização de mecanismos DSA no LTE. O protocolo RRC será explorado mais adiante, com intuito de utilizá-lo como suporte ao mecanismo cooperativo proposto para o LTE.

A próxima seção detalha a estrutura de um *subframe* levando em conta o compartilhamento de recursos entre o plano de controle e de usuário.

#### 4.1.4 Estrutura do *Subframe*

Segundo [4], a Figura 4.7 ilustra a estrutura de um *subframe*. A divisão superior define a estrutura do *subframe* para o *uplink*, enquanto que a divisão inferior mostra a utilização do *subframe* no *downlink*.

Na estrutura do *subframe* de *downlink*, define-se o tempo para envio de mensagens de controle equivalente a 3 símbolos, ou seja,  $3/14$  ms, levando em conta que um *subframe* possui 14 símbolos (2 RBs). Dentro deste intervalo de tempo, a parte do *subframe* que contém a informação sobre a duração das informações de controle é chamada de *Physical Control Format Indicator Channel* (PCFICH), enquanto que, a parte do *subframe* que possui as informações de controle é denominada *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH). O restante do tempo do *subframe* contém os dados dos UEs, a partir dos protocolos definidos no plano de usuário. Esta faixa é denominada *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH).

Para o *subframe* de *uplink*, os 13 primeiros símbolos são utilizados de maneira compartilhada para envio de dados do plano de usuário e/ou do plano de controle. É denominada de *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH) a fatia do *subframe* que contém a estrutura de dados do plano de controle, enquanto que, a fatia destinada para o envio de dados das aplicações dos UEs é chamada de *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH). Toda a duração restante do *subframe* é utilizada para o envio do sinal SRS (*Sounding Reference Signal*), sinal de referência enviado para eNB estimar a qualidade do canal de *uplink* a partir da SINR recebida do sinal.



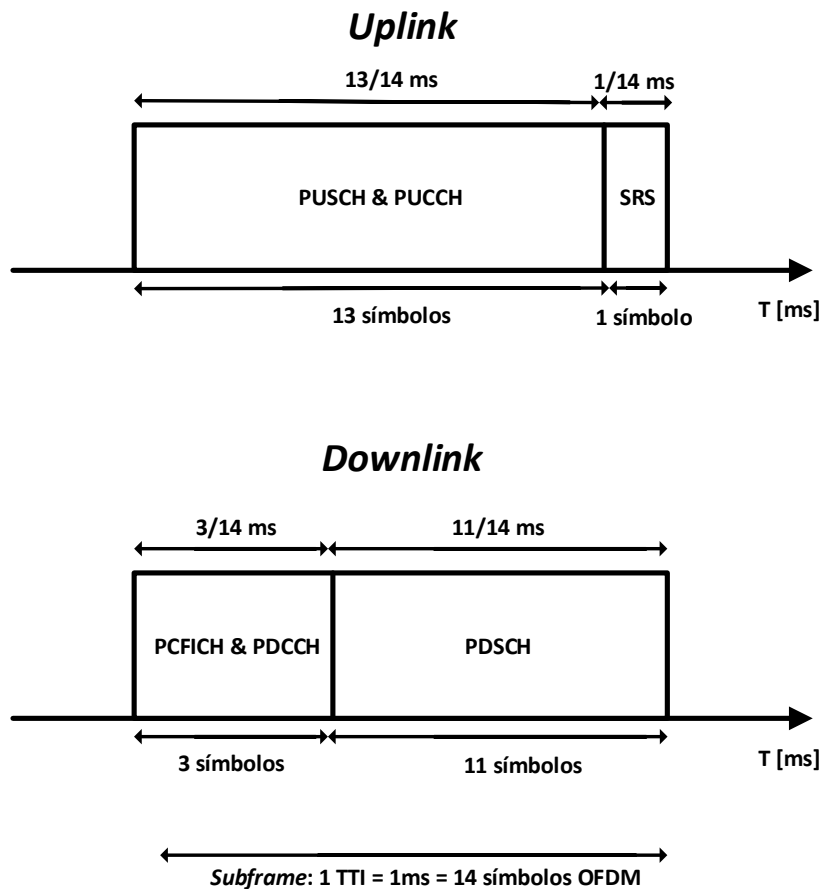


Figura 4.7: Estrutura do *subframe* (*uplink* e *downlink*) no envio de mensagens de controle e dados [4].

Dadas as principais características das redes LTE, a próxima seção aborda o cenário de redes heterogêneas inseridas no contexto de redes 4G, utilizada no estudo proposto de acesso dinâmico em bandas de radar.

## 4.2 Redes Heterogêneas de quarta geração

Frente aos desafios de escassez de recursos do espectro de frequência e, em contraponto, o aumento na demanda por acesso às redes sem fio, emerge o conceito de células domésticas, também denominadas femtocélulas, que buscam melhorar a qualidade e aumentar os recursos por acesso à rede 4G da cobertura de ambientes *indoor* em cidades que possuem uma alta densidade populacional, as grandes metrópoles. Com o uso de femtocélulas, espera-se aumentar a capacidade das redes

móveis 4G, através do *offloading* de tráfego de usuários *indoor*, e possibilitando um aumento na capacidade da macrocélula que abrange uma área de cobertura mais extensa.

O cenário composto por múltiplas femtocélulas inseridas em uma região onde existe a cobertura dos serviços de redes 4G por uma macrocélula é definido como uma rede heterogênea (HetNet), conforme ilustrado na Figura 4.8, onde o mapa de calor de uma região de 5 km de extensão é evidenciado pela SINR de uma MeNB, situada no centro da região, composto por 6 setores, e pela SINR das múltiplas HeNBs localizadas ao redor da macrocélula. Para uma dada femtocélula  $j$ , a Equação 4.1 representa a SINR percebida no *downlink* de  $j$ . Como pode ser visto, a femtocélula fornece uma cobertura média de 30 m de raio, compartilhando a faixa do espectro licenciado com a macrocélula, que cobre, em média, 500 metros de raio de cobertura, conforme citado em [29]. Devido ao curto alcance das femtocélulas, estas conseguem prover maiores taxas de transferências de dados em ambientes *indoor*, caracterizado por casas, escritórios, e estabelecimentos comerciais. Como pode ser visto no mapa de calor, as femtocélulas garantem uma qualidade do canal superior à da macrocélula. O nível de SINR nas regiões próximas às femtocélulas são superiores à SINR da MeNB. Com um serviço de qualidade superior prestado pelas HeNBs, além de servir como *offload* de tráfego para as MeNBs, as células domésticas vem sendo amplamente adotadas no cenário mundial para uso comercial, disponibilizadas para uso particular de clientes localizados em estabelecimentos *indoor*.

Frente ao aumento na densidade de femtocélulas em grandes metrópoles e devido ao compartilhamento das bandas licenciadas do LTE com a macrocélula, mecanismos de controle e gerenciamento de interferências começam a se tornar bastante complexos. Este cenário é evidenciado na própria Equação 4.1: com o aumento de HeNBs, reduz-se a SINR resultante no *downlink* de  $j$ , que já é afetada pela interferência provocada pela MeNB. Logo, com o uso abundante de femtocélulas, seu principal objetivo de fornecer uma maior vazão de dados acaba sendo comprometido, afetando a qualidade dos serviços prestados. RBs de uma determinada femtocélula, que são escalonados por femtocélulas vizinhas e pela macrocélula, acabam colidindo e, dependendo da densidade, promovem um baixo nível de SINR, aumentando a probabilidade de erros de blocos transmitidos (BLER - *Block Error Rate*) [4], inversamente proporcional à SINR. É definido como uma interferência do tipo *co-tier*, a interferência provocada entre femtocélulas, dada pelo somatório de interferências da equação, enquanto que, *cross-tier* é chamado o tipo de interferência gerada entre femtocélulas e macrocélula, quando se tem um ambiente HetNet. Com o desafio no controle de interferência, surge a proposta no uso oportunista das bandas de radar aqui estudadas para acesso dinâmico ao espectro pelas femtocélulas, que irão usufruir das oportunidades temporais e espaciais evidenciadas em tais bandas. Com

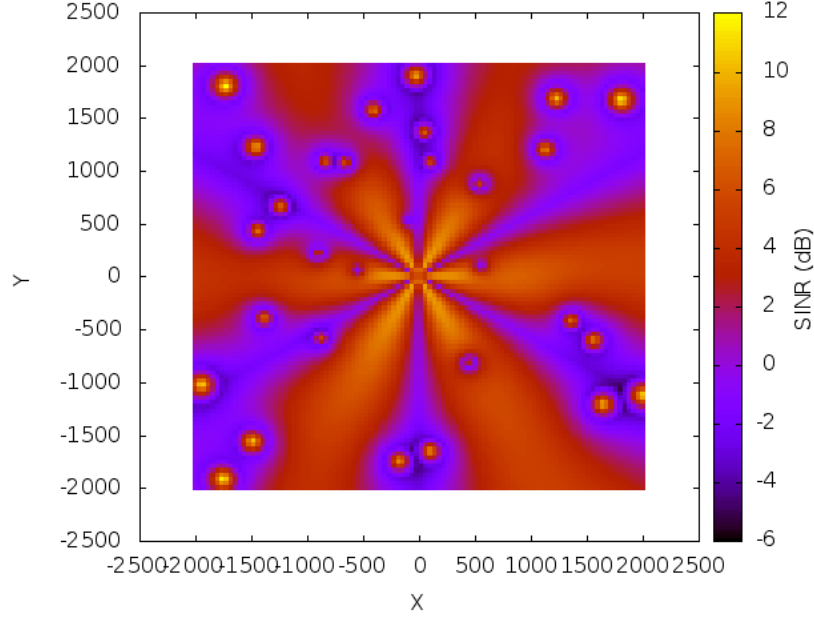


Figura 4.8: Mapa de calor ilustrado em um ambiente HetNet 4G, gerado com o módulo LTE do ns-3. Eixo  $x$  representa a largura da região, em metros. Eixo  $y$  define a extensão do mapa de calor, em metros. Ambos se encontram limitadas em 5 km.

isso, busca-se eliminar os efeitos de interferência *cross-tier*, que comprometem tanto os serviços disponibilizados para usuários da MeNB, quanto usuários *indoor* associados às HeNBs, utilizando uma frequência de operação mais elevada, reduz-se a interferência *co-tier* entre femtocélulas. Com a mitigação da interferência *cross-tier* e a redução da interferência *co-tier*, o controle de interferência se limita somente na contenção de interferências *co-tier* entre as HeNBs, cujos mecanismos adotados de reuso de frequência nas redes LTE tornam-se mais eficientes, frente ao uso de novos espaços do espectro.

$$SINR_j = \frac{P_R^j}{N + \sum_{i \in S \setminus \{j\}} I_i^j + I_k^j} \quad (4.1)$$

onde:

$S = \{1, \dots, j\} \rightarrow$  Conjunto das HeNBs inseridas no cenário de HetNets.

$I_i^j \rightarrow$  Interferência derivada da HeNB  $i$  em relação à HeNB  $j$ .

$I_k^j \rightarrow$  Interferência derivada da MeNB  $k$  em relação à HeNB  $j$ .

$N \rightarrow$  Ruído proveniente do meio de propagação.

$P_R^j \rightarrow$  Potência recebida da HeNB  $j$ .

Para a verificação no uso das bandas de radar por dispositivos 4G, será utilizado

o módulo LTE, desenvolvido em [4], do simulador de redes ns-3. Para isso, foi proposto um modelo de ambiente de acesso ao meio em bandas de radar para o ns-3, com o intuito de caracterizar, da forma mais realista possível, as condições de uso do ambiente de propagação na faixa do espectro utilizada por sistemas de radar, enquanto dispositivos LTE estão sujeitos à interferência proporcionada pelo radar em operação. A Seção 4.3 cobre os detalhes do modelo de acesso ao meio proposto.

## 4.3 Proposta do modelo de ambiente de acesso ao meio em bandas de radar para o simulador de redes ns-3

Esta seção cobre os detalhes acerca do ambiente de acesso ao meio implementado no simulador de redes ns-3. A Subseção 4.3.1 detalha os aspectos gerais sobre o ns-3 e o módulo LTE utilizado nas implementações realizadas. A Subseção 4.3.2 aborda os detalhes sobre o ambiente de acesso ao meio em bandas de radar. A Subseção 4.3.3 cobre os detalhes de implementação e a verificação do modelo desenvolvido é realizada na Subseção 4.3.4. Com o ambiente de acesso ao meio do radar implementado, são exploradas, na Subseção 4.3.5, as vantagens no uso da banda de radar por dispositivos de LTE, quando comparada com o uso das bandas usuais licenciadas das redes 4G.

### 4.3.1 Simulador de redes ns-3 e o módulo LTE

O simulador de redes ns-3 é definido como um simulador de eventos discretos, utilizado na avaliação de desempenho de redes IP [30]. Trata-se de um *software* de código aberto, escrito na linguagem C++, distribuído com a licença GNU GPLv2. Os modelos de redes desenvolvidos possuem todas as camadas definidas pelas pilhas de protocolos definidas em cada tecnologia, o que torna os resultados da simulação mais próximos do caso real. Os modelos implementados são formados por redes cabeadas e sem fio, dentre estes, o conjunto de funcionalidades do padrão IEEE 802.11 e do padrão, estipulado pelo 3GPP, do LTE.

O simulador de eventos discretos funciona a partir do escalonamento de eventos pré-agendados, controlados por um escalonador de eventos, que atua na chamada de processos dos eventos dentro de um tempo de simulação estabelecido. O ns-3 se apropria dos conceitos de orientação a objeto do C++, onde cada módulo de simulação é definido por um conjunto de classes específicas. As implementações propostas neste trabalho utilizam estes conceitos, sendo todos os módulos propostos implementados dentro da estrutura de dados definida para o ns-3 (*namespace* ns-3).

O módulo LTE tem sua estrutura implementada no ns-3 pelo modelo ilustrado na Figura 4.9. No modelo da E-UTRAN, inclui-se toda pilha de protocolos de controle e de usuário (RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY). Estas entidades estão contidas dentro dos nós que definem um UE e uma eNB. Além disso, a interface X2 é definida por uma ligação ponto-a-ponto, dando suporte a eventos de *handover*, que surge diante da mobilidade dos UEs, que também pode ser modelado no simulador. Cada UE se associa a uma eNB por meio de um enlace de rádio, definido por um modelo de propagação a ser escolhido no ambiente de simulação, para a definição do comportamento das condições do ambiente sem fio [4]. Até o momento, somente a técnica de duplexação FDD foi implementada no simulador, sendo esta a mais adotada, em âmbito mundial, por operadoras de redes celulares.

O módulo EPC inclui a definição dos nós SGW, PGW e MME, cujas funções foram descritas anteriormente. Suas interfaces com a eNB e entre os próprios módulos também são definidos [4]. A estrutura da Internet, com um nó remoto localizado na nuvem, pode ser simulada pelo módulo de redes cabeadas com a pilha de protocolos TCP/IP. Juntos, pode-se implementar um conjunto de roteadores interligados por uma infraestrutura cabeada, do tipos 10BaseT, 100BaseT ou *Gigabit ethernet*, e que se interconecta com a rede LTE através do nó SGW/PGW. O conjunto de protocolos adotados no EPC, como o GTP, UDP e IP, são utilizados na transferência de dados do núcleo da rede. O plano de controle do EPC está, atualmente, indisponível neste módulo do LTE [4].

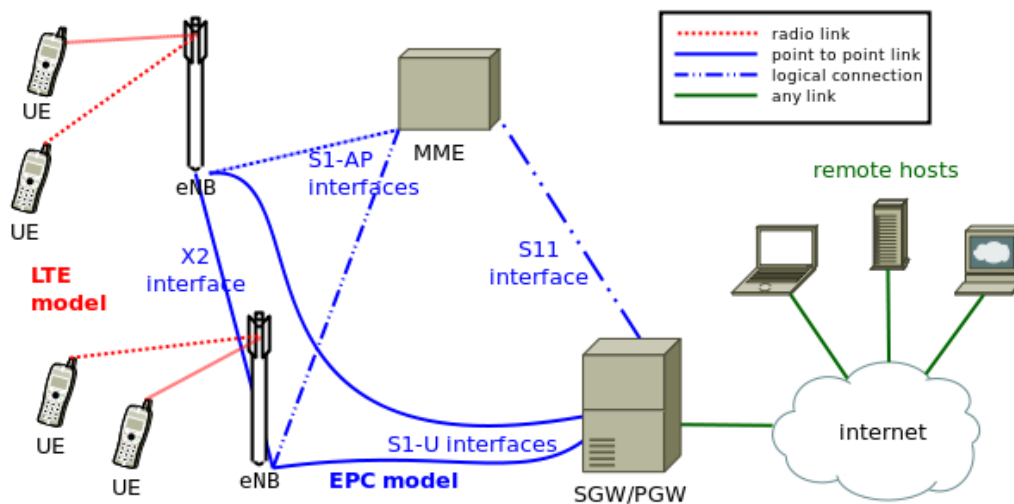


Figura 4.9: Conjunto de entidades da rede LTE definida no modelo de simulação do ns-3 [4].

O módulo LTE desenvolvido no ns-3 oferece suporte à avaliação das seguintes funções [4]:

- Gerenciamento dos recursos de rádio.

- Escalonamento de pacotes realizados na camada MAC e baseados em políticas de QoS.
- Definição de *bearers* para priorização de tráfego.
- Coordenação de interferência entre células.
- Acesso dinâmico ao espectro.

O último item trata da função a ser explorada neste trabalho. É importante destacar, para fins de esclarecimento da implementação proposta para o modelo de acesso ao meio, que a granularidade desenvolvida no simulador se dá a nível de blocos de recursos (RBs) na camada física. Esta é a unidade fundamental utilizada para a alocação de recursos em redes LTE. Com este nível de granularidade, pode-se modelar, com uma alta acurácia, esquemas de escalonamento de pacotes, que são tratadas por um conjunto de RBs disponíveis. Aliado ao esquema de escalonamento de pacotes, outro fator que pode ser avaliado é a interferência entre células vizinhas, a partir do escalonamento dos mesmos RBs por diferentes eNBs dentro de um mesmo TTI. Tal granularidade permite a ocorrência de ambientes de simulação que possuam uma alta densidade de eNBs e UEs. Já, simuladores do tipo *link-level*, que implementam uma granularidade de camada física a nível de símbolo, possuem uma alta complexidade de processamento, limitando a simulação somente para uma eNB e alguns poucos UEs [4]. O módulo LTE do ns-3 alia o modelo de perdas na camada física dos simuladores *link-level*, através da utilização das curvas de probabilidade de erro de bloco geradas pelo simulador Vienna, com escalabilidade na quantidade de nós instanciados [31].

Na Seção 4.3.2, serão tratados os detalhes de implementação do modelo de acesso ao meio em bandas de radar, levando em conta as características de camada física implementadas no módulo LTE do ns-3.

### 4.3.2 Acesso ao meio em bandas de radar

O ambiente de acesso ao meio das bandas de radar é caracterizado pela dinâmica com que os radares operam, que depende, em essência, do padrão de escaneamento (*scan pattern*) das antenas, velocidade de rotação e o ângulo de abertura do lóbulo principal da antena. Estes três parâmetros citados definem a forma como o radar utiliza sua parte do espectro licenciada e, além disso, são úteis aos mecanismos de acesso dinâmico, para o acesso oportunista em períodos de ociosidade. Sendo assim, através da dinâmica de acesso do radar ao ambiente, são realizados os devidos cálculos de interferência do radar nos usuários secundários, aqui caracterizados por HeNBs e UEs, e vice-versa.

Dentre os diversos tipos de sistemas de radar, foram utilizadas na modelagem as características de operação dos radares monostáticos. O padrão de rotação utilizado no modelo é do tipo circular, o mais usual empregado em radares monostáticos, estando entre eles, radares meteorológicos e marítimos. Os outros tipos se aplicam em sistemas de controle de tráfego aéreo e geolocalização que, por serem aplicados em serviços de segurança de vida (*safety of life*), não serão aqui tratados para uso oportunista.

O modelo define os seguintes parâmetros:

- Potência de transmissão.
- Ganho proveniente do lóbulo principal.
- Ganho dos lóbulos secundários.
- Frequência de operação.
- Largura de banda.
- Velocidade angular.
- Ângulo de abertura do lóbulo principal.

Os parâmetros acima podem ser configurados de acordo com as características reais de sistemas de radar. Variando os parâmetros, geram-se diferentes níveis de interferência nas transmissões dos USs e no próprio radar instanciado.

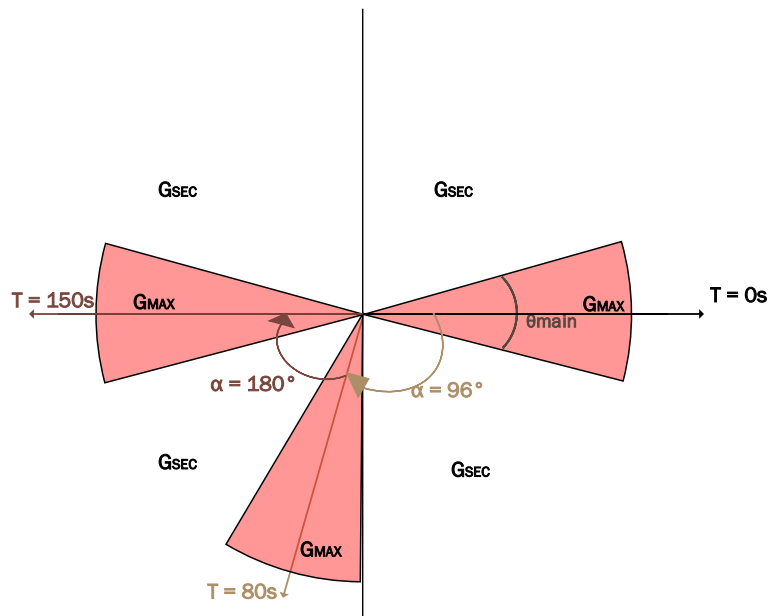


Figura 4.10: Modelo do ambiente de acesso ao meio em bandas de radar.

A partir destes parâmetros, o modelo do ambiente de radiofrequência é definido segundo a ilustração da Figura 4.10. Como pode ser visto, os USs que estiverem presentes dentro do lóbulo principal irão sofrer interferências e interferir com um nível de potência somado ao ganho máximo  $G_{MAX}$  do radar, segundo a fração do ângulo  $\theta_{main}$  de abertura da antena nessa região. A abertura do lóbulo principal se desloca, a partir da velocidade angular, no sentido horário, de maneira que, a cada tempo de simulação, o cálculo da interferência nos dois sentidos seja feita com o ângulo de referência  $\alpha$  do feixe principal. O ângulo  $\alpha$  pode ser obtido pela divisão da velocidade angular  $ScanRate$  pelo tempo de simulação atual  $T$ , que varia a cada TTI, correspondente ao intervalo de transmissão dos dispositivos LTE. Sendo assim, cada transmissão realizada a cada TTI terá o nível de interferência do radar contabilizado.



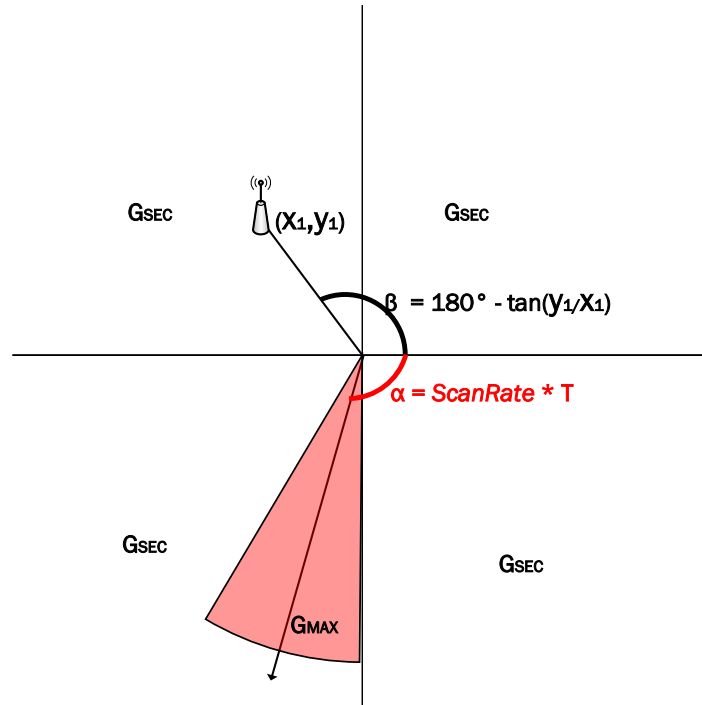


Figura 4.11: Mapeamento da localização do US e do lóbulo principal de acordo com seus ângulos de referência

Para saber se o US que teve sua transmissão interferida pelo radar, e vice-versa, esteja dentro ou fora do lóbulo principal, é necessária a realização do mapeamento da localização atual do secundário com relação à direção do lóbulo principal atual. A definição da inserção do US na região do lóbulo principal é realizada a partir da diferença entre os ângulos de referência do US,  $\beta$ , calculada a partir de seu ponto cartesiano  $(x, y)$ , e o ângulo  $\alpha$  do radar, conforme ilustrado na Figura 4.11. O algoritmo 3 mapeia todos os possíveis casos de localização de um US em relação às direções dos ganhos máximo e secundário do radar. Cada condição define uma dada região em que o US está inserido.

Após a verificação do ganho realizada no Algoritmo 3, é calculado o nível de potência recebida no US, através da Equação 4.2, onde  $G_{radar}$  possui o valor selecionado na verificação ( $G_{MAX}$  ou  $G_{MIN}$ ). Com o valor do nível de  $P_r^{radar}$ , é possível obter o nível de interferência em cada RB transmitido em um TTI, a partir da densidade espectral de potência do radar dentro de sua própria banda, calculada segundo a Equação 4.3. Com a densidade espectral de potência do radar, o nível de interferência do radar em cada RB é feito com a fração da densidade espectral

---

**Algoritmo 3:** Cálculo do ganho de referência

---

```
 $\alpha$  = Get RadarAngle (T) //Pega o ângulo de referência do lóbulo principal do radar com o eixo x
no instante T
 $\beta$  = Get USAngle ( $US_{RX}$ ) //Pega o ângulo de referência do secundário que atua como RX no TTI
referente ao instante T
 $\theta_{main}$  = Get MainbeamAngle //Retorna o ângulo de abertura do lóbulo principal
if  $\alpha + \beta \geq 360$  ||  $\alpha + \beta == 0$  then
    //Condição para verificar se o secundário está após ou na direção máxima do lóbulo
    principal
    if  $(\alpha + \beta - 360) \leq (\theta_{main}/2)$  ||  $(720 - (\alpha + \beta)) \leq (\theta_{main}/2)$  then
        //Condição que verifica se US está dentro do lóbulo principal
        retorna  $G_{max}$  //Retorna valor de ganho máximo do lóbulo principal
    else
        retorna  $G_{sec}$  //Retorna ganho do lóbulo secundário
else
    //US está antes da direção de ganho máximo do lóbulo principal.
    if  $\alpha + \beta \leq \theta_{main}/2$  ||  $\alpha + \beta + (\theta_{main}/2) \geq 360$  then
        //Verifica se está dentro do lóbulo principal para o caso em que US está antes da
        direção máxima
        retorna  $G_{max}$ 
    else
        retorna  $G_{sec}$ 
```

---

de potência inserida em cada um dos RBs, como mostra a Equação 4.4. O modelo leva em conta que todos os RBs das bandas de *downlink* e *uplink* estejam inseridas na banda de radar, fazendo com que todos sofram uniformemente a interferência calculada.

Com o modelo descrito, é possível obter as condições do ambiente sem fio para o LTE, a partir dos parâmetros de radar servidos como entrada do sistema. Na seção seguinte, será detalhada a implementação do modelo no módulo LTE do simulador ns-3.

$$P_r^{radar} = \frac{P_t^{radar} \cdot G_{radar} \cdot G_{US}}{L} \quad (4.2)$$

onde:

$P_r^{radar}$  → Potência recebida no US a partir da perda de percurso L

$$PSD_{radar} = \frac{P_r^{radar}}{B_{radar}} \quad (4.3)$$

onde:

$PSD_{radar}$  → Densidade espectral de potência do radar

$$PSD_{RB} = PSD_{radar} \cdot \frac{(B_{subportadora} \cdot N_{RB})}{B_{radar}} \quad (4.4)$$

onde:

$PSD_{RB}$  → Fração da densidade espectral de potência recebida do radar nos RBs

$B_{subportadora}$  → Largura de banda de uma subportadora OFDM = 150 KHz

$N_{RB}$  → Número de RBs utilizados nas transmissões por dispositivos LTE

### 4.3.3 Implementação

A implementação realizada no ns-3 define uma nova classe, denominada "*radar module*", que possui o conjunto de atributos listados na Tabela 4.1. Como pode ser visto, os atributos representam os parâmetros de operação do radar definidos, onde são todos parametrizáveis a partir das chamadas usuais do ns-3 no ambiente de simulação, permitindo que cada ambiente gerado possua sua respectiva configuração de radar.

Tabela 4.1: Atributos da classe radar.

Atributo	Função	Unidade de medida
<i>RadarTxPower</i>	Potência de transmissão do radar	<i>dBm</i>
DIEarfcn	Valor do EARFCN de <i>downlink</i> para o cálculo da frequência do radar, conforme o padrão LTE para o cálculo das frequências centrais. Somente para uso interno (Valor <i>default</i> : 39650)	Adimensional
UIEarfcn	Função análoga ao DL-EARFCN, utilizado na frequência de <i>uplink</i> (Valor <i>default</i> : 39651)	Adimensional
Gmax	Ganho do lóbulo principal do radar	<i>dBi</i>
Gsec	Ganho referente aos lóbulos secundários do radar	<i>dBi</i>
Vang	Velocidade angular do radar utilizado	$^{\circ}/s$
<i>Frequency</i>	Frequência de operação do radar	<i>GHz</i>
Ithr	limiar de interferência do radar	<i>dB</i>
<i>RadarBand</i>	Largura de banda do radar	<i>MHz</i>

Os principais métodos da classe "*radar module*" são definidos na Tabela 4.2, e

indicam suas principais funções e parâmetros de entrada. O cálculo de interferência no módulo do ns-3 é realizado a partir dos intervalos de recepção de uma transmissão agendada, e cuja transmissão não pertence ao receptor em questão. Cada nó instanciado possui um objeto da classe *lte-interference*, que realiza os respectivos cálculos de *SINR* dos sinais recebidos em cada um dos dispositivos. Este módulo foi alterado, de maneira que, fossem consideradas as interferências do radar no dispositivo, a partir da chamada do método *get-interference* da classe *radar-module*.

Tabela 4.2: Métodos da classe radar.

<b>Método</b>	<b>Função</b>	<b>Parâmetro passado</b>
get-reference	Retorna o ângulo de referência $\alpha$ do radar, a partir do tempo de simulação atual.	Variável de tempo de simulação
SetPositionRx	Guarda a posição $(x, y)$ do secundário, para o cálculo de interferência do radar no US	Vetor $(x, y)$ de posição do US
SetPositionTx	Análogo ao método SetPositionRx, guarda o valor do secundário que transmite na banda de radar, para o cálculo da interferência do US no radar	Vetor $(x, y)$ referente à posição do US transmissor
CalculateSUIinterference	Calcula a interferência proporcionada pelo US durante seu período de transmissão, levando em conta as variações de ganho do radar.	Tempo de início da transmissão e sua duração total
EndInterference	Remove a interferência do US após o término de sua transmissão	<i>void</i>
GetNodeAngle	Retorna o ângulo de referência $\beta$ do US a partir de sua posição cartesiana	<i>void</i>
GetRadarGain	Retorna o ganho do radar referente ao ângulo de referência $\alpha$ do radar e $\beta$ do US no instante $t$	Instante $t$ de referência
get-interference	Retorna a interferência do radar no US durante seu intervalo de recepção, para o cálculo final na classe <i>lte - interference</i> do módulo LTE. Caso haja variação do ganho durante este período, retorna a interferência proporcional ao tempo de interferência para cada ganho	Variáveis de tempo de início e término de recepção do US
<i>pathloss</i>	Cálculo de perda de percurso e interferência em ambos os sentidos de transmissão (Radar $\rightarrow$ US e US $\rightarrow$ Radar)	Ganho da antena do radar considerado no instante
calc-gain	Método que realiza o cálculo do ganho do radar a partir dos ângulos $\alpha$ e $\beta$ . Implementa o algoritmo 3	Ângulos $\alpha$ e $\beta$ calculados no instante atual

### 4.3.4 Verificação do modelo proposto

A verificação do modelo de acesso ao meio do radar se baseia na comprovação do comportamento do radar, diante da interferência provocada nas transmissões de dispositivos LTE na banda de radar. A Figura 4.12 ilustra o cenário proposto para a verificação. Foi considerado, primeiramente, a transmissão entre uma eNB e um UE no canal de *downlink*, a partir de um tráfego constante de voz, do tipo CBR, implementado no ns-3, sem considerar a transferência destes dados com o EPC. A eNB e o UE foram dispostos, variando-se o ângulo de referência  $\beta$  em relação ao radar e cujos efeitos da interferência, provocada pela variação do lóbulo principal do radar, na vazão do tráfego serão verificados durante o tempo de simulação para cada valor de  $\beta$ . A duração da simulação se dá, de maneira que, o radar possa completar uma volta completa em torno de seu eixo.

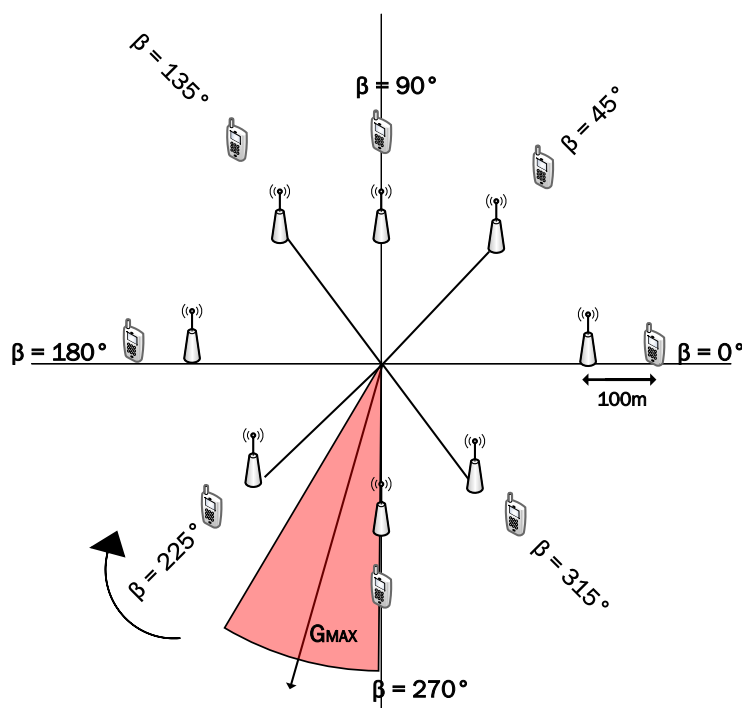


Figura 4.12: Cenário utilizado para a verificação do modelo.

Os parâmetros de radar utilizados na verificação são os mesmos evidenciados na Tabela 3.1, do Capítulo 3. A partir da velocidade angular de  $1.2^\circ/s$  e ângulo de abertura de  $12^\circ$ , um US utilizando a banda de radar está sujeito à interferência do lóbulo principal por um tempo de 10 segundos de duração. A Figura 4.13 mostra os

resultados de simulação para cada ângulo de referência, variando, em cada um dos casos, as distâncias da eNB e UE em relação ao radar. Em todos os casos, exceto para  $\beta = 0^\circ$ , pode-se constatar uma perda durante o período de 10 segundos referente à interferência proporcionada pelo lóbulo principal do radar nas transmissões. No caso de  $\beta = 0^\circ$ , as transmissões da eNB sofrem uma interferência nociva de 5 segundos apenas, pois a eNB se encontra no centro do lóbulo principal, acarretando em apenas metade do tempo de interferência da duração total. Além disso, pode-se verificar que, para a distância de 100 m, a interferência do radar proporciona alta perda nos dados, tanto no lóbulo principal, quanto no secundário, enquanto que, para distâncias maiores a partir de 300 m, a vazão se estabiliza. A partir de uma distância de 3km, a vazão alcança um valor constante na direção dos lóbulos secundários de, aproximadamente, 10Mbps, o que mostra que, para distâncias acima de 3 km, mantêm-se a mesma probabilidade de erro de blocos.

Através dos gráficos evidenciados, também pode-se validar o comportamento do radar, de acordo com sua rotação. Para  $\beta = 0^\circ$ , o US é interferido pelo lóbulo principal durante o período de 0 a 5 segundos, como esperado, devido à posição inicial do radar, cuja direção do feixe é mesma do eixo positivo de  $x$ . À medida que a rotação evolui no sentido horário, o próximo US a ser interferido do lóbulo principal é àquele situado em  $\beta = 315^\circ$ . Como este US se encontra a  $45^\circ$  de distância angular do eixo positivo de  $x$ , o radar o alcança em um tempo, tal que,  $\alpha = 45^\circ - \frac{\theta_{main}}{2} = 39^\circ$ , o que equivale ao tempo de  $\frac{39^\circ}{1.2^\circ/s} = 32.5$  segundos. A Figura 4.13(b) evidencia o tempo de início de interferência do lóbulo principal citado, com a duração de 10 segundos correspondente a duração da interferência primária, cujo término se dá no tempo de 42.5 segundos. De forma análoga, este mesmo raciocínio se repete nas Figuras 4.13(c), 4.13(d), 4.13(e) e 4.13(f), que pode ser evidenciado pela variação do eixo temporal, até o tempo de 300s, equivalente à volta completa do radar.

Uma segunda verificação é realizada, utilizando o mesmo cenário de  $\beta = 0^\circ$  e  $\beta = 315^\circ$ . Neste caso, varia-se, aleatoriamente, a posição do UE dentro de um raio de cobertura de 100m em relação à eNB. Foram geradas 30 rodadas para as diferentes posições do UE dentro desta região, e a Figura 4.14 mostra os resultados de cada cenário para as distâncias de 500 m e 5 km entre eNB e radar, em um intervalo de confiança de 95%. Os resultados comprovam que o comportamento da vazão é o mesmo que o da primeira verificação, porém, a variância dos resultados é maior para a distância de 500m, devido ao efeito da interferência do radar, que provoca uma maior probabilidade de erros de blocos quando comparada com a distância de 5 km. Os pontos próximos ao período de interferência do lóbulo principal também mostram uma flutuação mais intensa no valor da vazão, para ambas as distâncias, devido à variação no posicionamento do UE que, em determinados cenários, pode se encontrar dentro do lóbulo principal e, em outros, fora.

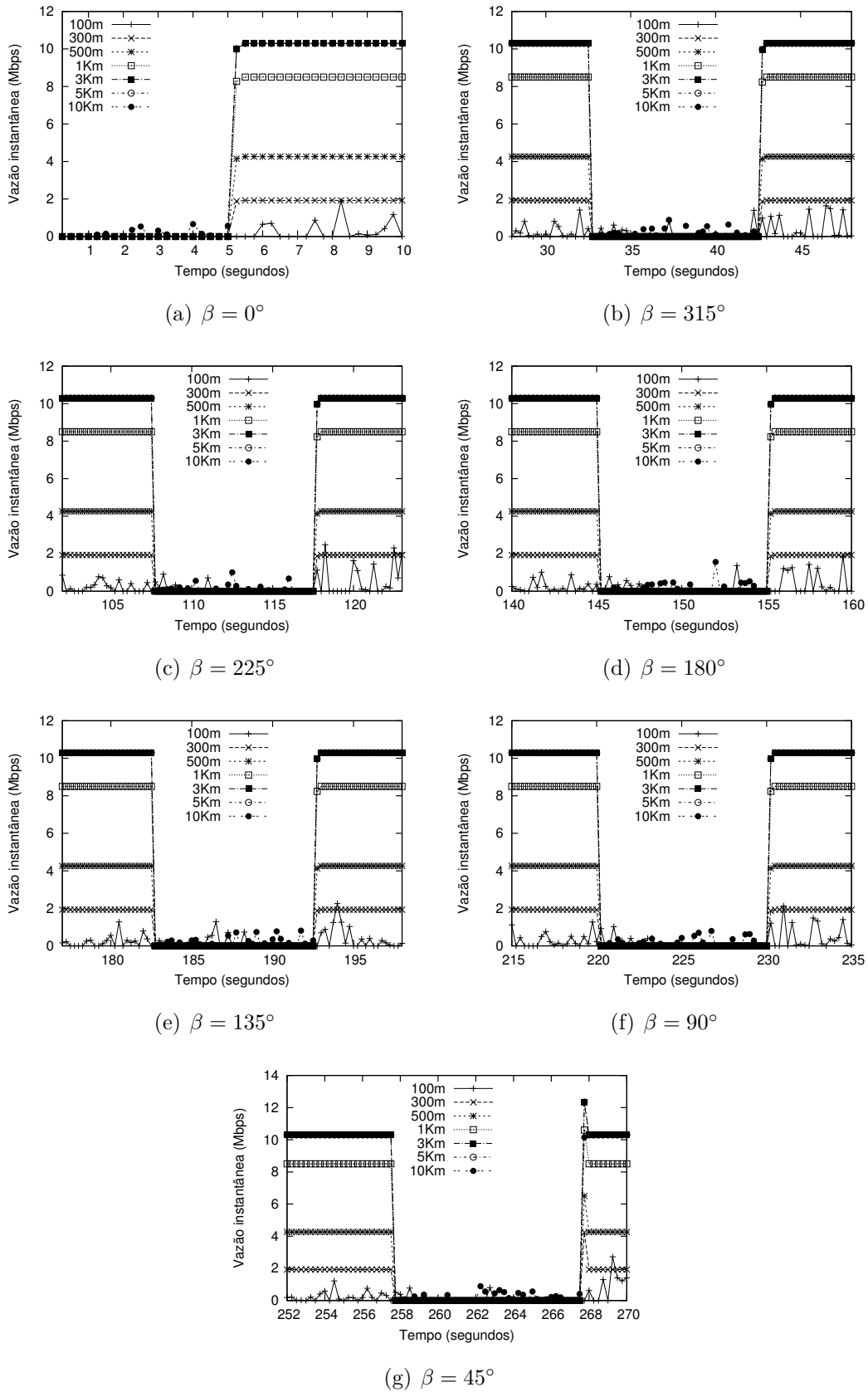
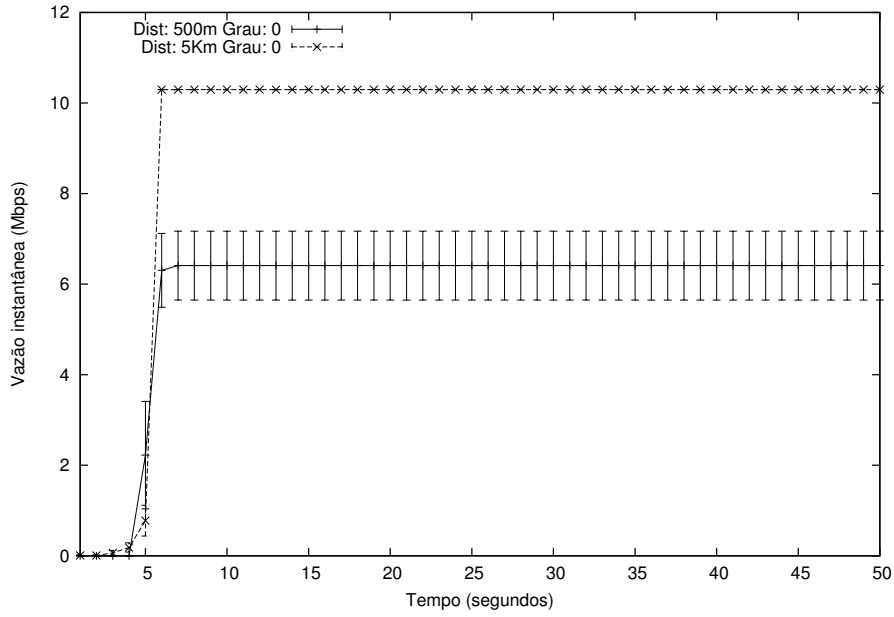
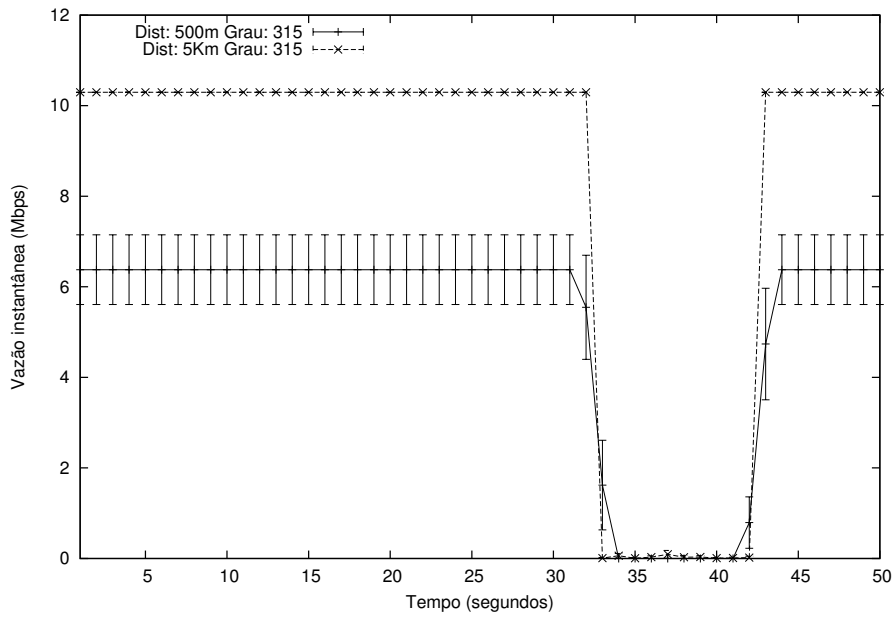


Figura 4.13: Comportamento da vazão instantânea no canal de *downlink* durante o tempo de rotação do radar.





(a)  $\beta = 0^\circ$



(b)  $\beta = 315^\circ$

Figura 4.14: Vazão instantânea a partir da variação da distância do UE.

Através destes resultados, pode-se constatar o comportamento do ambiente de acesso ao meio em bandas de radar conforme o esperado para os parâmetros utilizados. Sendo assim, o modelo de acesso ao meio em bandas de radar desenvolvido será utilizado nas avaliações de uso dinâmico do espectro nas próximas seções.

### 4.3.5 Vantagens no uso da banda de radar em redes LTE Heterogêneas

Através do modelo de acesso na banda de radar proposto e validado, esta seção visa destacar as vantagens no uso desta quando comparada com a banda LTE tradicional em um cenário HetNet de quarta geração.

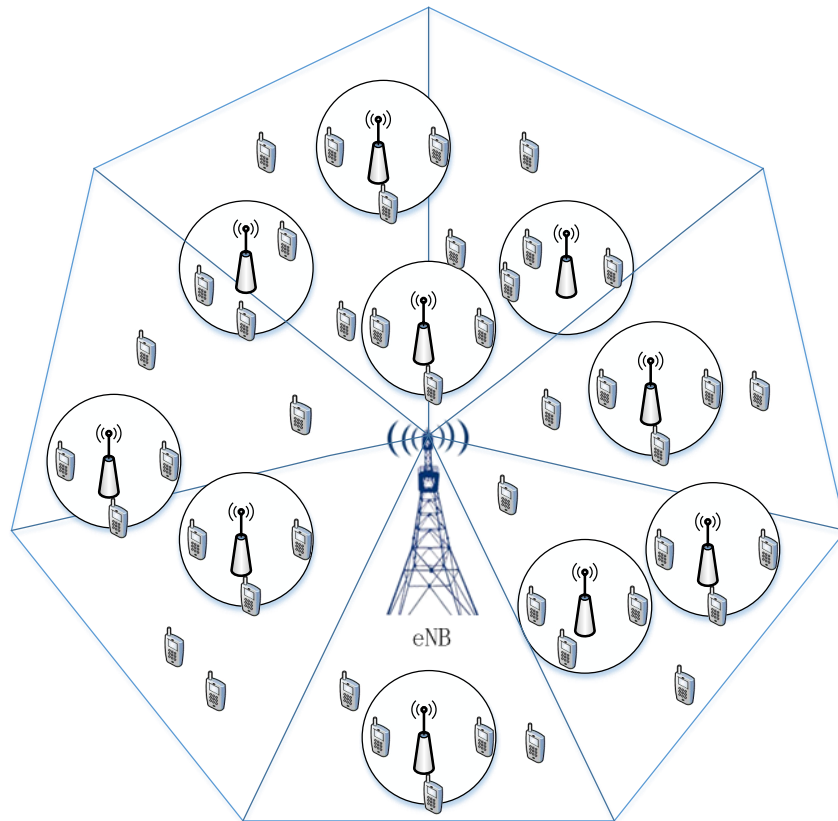


Figura 4.15: Rede LTE Heterogênea utilizada no ambiente de simulação.

O ambiente HetNet proposto é ilustrado na Figura 4.15. Uma MeNB, composta por 6 setores de  $60^\circ$ , está localizada no centro de uma região circular. Dentro desta área, HeNBs são distribuídas aleatoriamente, cada uma possuindo 3 UEs associados, também distribuídos de maneira aleatória, a uma distância mínima de 1 m da femtocélula e entre si. A distribuição é feita em torno de suas respectivas HeNBs, representando um ambiente *indoor* circular equivalente a uma sala de  $80m^2$  de área. Cada uma das salas possui uma HeNB em seu centro, e estão separadas a uma distância mínima de 10 m, suficientes para que ocorram interferências *co-tier*. A quantidade de UEs associados à macrocélula possui uma densidade igual à densidade de femtocélulas instanciadas. Os UEs da macrocélula estão distribuídos aleatoriamente dentro da região circular, com uma distância mínima de 1 m entre os dispositivos e com a macrocélula. Esta configuração tem por objetivo avaliar o

desempenho de uma rede LTE heterogênea de alta densidade.

Neste ambiente, serão analisados os dois tipos de compartilhamento de espectro:

- proveniente do canal de comunicação licenciado do LTE entre MeNBs e HeNBs, gerando a interferência do tipo *cross-tier* (macro-femto) e *co-tier* (femto-femto);
- da banda de radar, utilizada somente pelas HeNBs, sem qualquer tipo de mecanismo DSA, proporcionando uma interferência *co-tier* entre femtocélulas, e a interferência *cross-tier* entre o radar meteorológico e as HeNBs, seguindo o modelo descrito na seção anterior.

Em cada um dos casos, foi utilizada uma banda total referente a 15 RBs no *downlink* e *uplink* da rede LTE, cuja banda equivale a 3 MHz em cada enlace. O valor escolhido proporciona uma ocupação completa das duas bandas dentro do total de 10 MHz da banda de radar, sem que ocorram interferências externas a esta banda nos RBs. Segundo a especificação do 3GPP [32], em um sistema FDD, a separação nominal entre as bandas de *downlink* e *uplink* é feita a partir da Equação 4.5. Através da Figura 4.16, que ilustra a ocupação da banda do radar pelas duas bandas do sistema FDD do LTE, pode-se verificar um total de 9 MHz de ocupação da banda de radar, contabilizando os 3 MHz de separação entre as bandas, proporcionando uma interferência uniforme do radar nos 30 RBs. Para o compartilhamento entre macro e femtocélulas, conforme a implementação realizada no ns-3, as interferências *cross-tier* e *co-tier* na rede LTE existem somente quando macro e femtocélulas utilizam os mesmos RBs para transmissão, tanto na banda de *uplink* quanto na de *downlink*, diferente da interferência entre femtocélulas e radar, que se dá em toda banda utilizada pelos dispositivos LTE, a todo tempo, tendo em vista a ocupação completa da banda de radar.

$$NominalChannelSpacing = \frac{(BW_{downlink} + BW_{uplink})}{2} \quad (4.5)$$

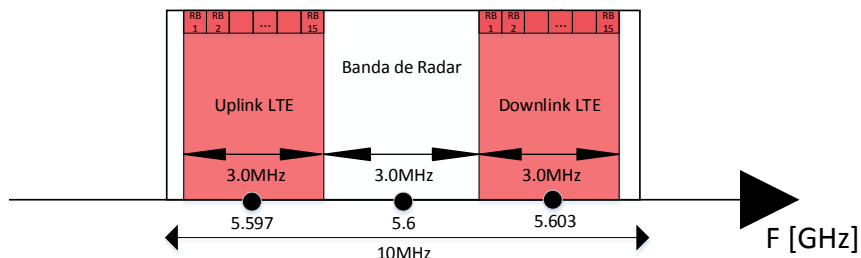


Figura 4.16: Ocupação da bandas do sistema FDD-LTE na banda de radar.

Foi utilizado o modelo de propagação *log-distance* para perda no ambiente sem fio de todos os enlaces, analogamente ao ambiente do Capítulo 3, cujo modelo segue a Equação 3.11, e com o mesmo valor  $\gamma = 3.0$ . A frequência de operação compartilhada é de 5.6GHz, com as mesmas características do radar meteorológico utilizado, segundo informado na Tabela 3.1, localizado na banda C do espectro. As frequências centrais de operação da bandas de *downlink* e *uplink* podem ser vistas na Figura 4.16. No ambiente de compartilhamento do canal com a MeNB, foi utilizada a banda LTE em que a EARFCN no *downlink* é de 100 e de 18100 na de *uplink*, resultando nas frequências centrais de 2120.0 MHz e 1930.0 MHz, respectivamente, segundo as conversões realizadas de códigos de EARFCN para frequências de operação.

Tabela 4.3: Especificações - Dispositivos LTE.

Paramêtros	HeNB	MeNB	UE
Potência Tx	20dBm	40dBm	10dBm
Ganho da antena	0dBi	17dBi	0dBi
Largura de banda	3MHz	3MHz	3MHz
Altura da antena	1.5m	30m	1.5m
Frequência Central	5.603GHz(Down) 5.597GHz(Up)	5.603GHz(Down) 5.597GHz(Up)	5.603GHz(Down) 5.597GHz(Up)

A análise da qualidade do canal em cada um dos casos é realizada a partir da vazão agregada proporcionada por um tráfego TCP, tanto no *downlink*, quanto no *uplink*, entre UEs e um *host* remoto, localizado na rede PDN, conforme mostra a Figura 4.17. Para a transferência de dados com o *host* remoto, o núcleo EPC da rede LTE é instanciada, constituída apenas por um nó, que exerce o papel dos elementos de rede SGW/PGW, encaminhando pacotes gerados entre a rede PDN e E-UTRAN. O nó SGW/PGW está conectado por um enlace ponto-a-ponto ao *host* remoto, e por enlace ponto-multiponto, do tipo S1-U, com as eNBs instanciadas. A aplicação que utiliza o *socket* TCP, nativo do ns-3, é do tipo *BulkSend*, em que os pacotes são gerados constantemente até a completa ocupação do *buffer* da camada de transporte. Uma vez que o *buffer* esteja completamente lotado, a aplicação espera até que parte do *buffer* seja desocupado para continuar gerando novos pacotes. Isto impede que qualquer tipo de perda se dê nas bordas da rede, garantindo que eventuais perdas sejam provocadas somente no ambiente sem fio.

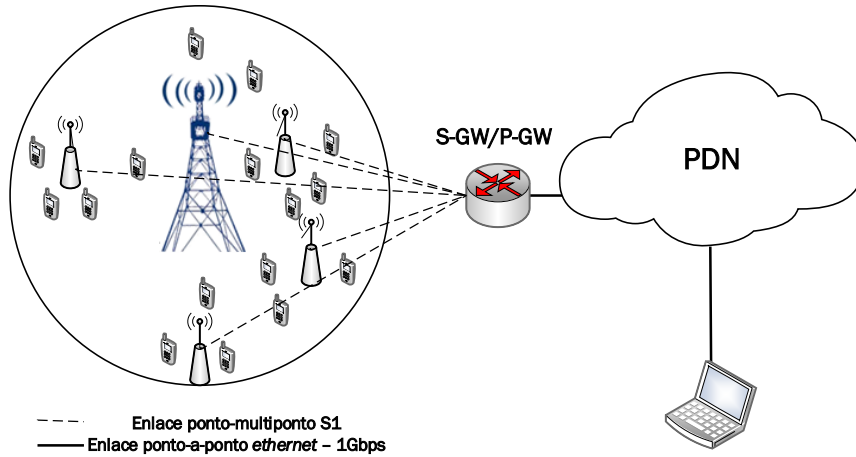


Figura 4.17: Topologia completa (E-UTRAN + EPC) da rede instanciada no ambiente de simulação.

As especificações técnicas dos dispositivos LTE utilizados no ambiente estão resumidas na Tabela 4.3.

## Resultados

O resultados obtidos mostram a vazão agregada de todo tráfego TCP gerado tanto no *downlink* quanto no *uplink* dos UEs pertencentes às femtocélulas e macrocélulas.

A análise foi feita variando-se a área de cobertura total utilizada pela macrocélula, mantendo a mesma densidade de nós em cada caso. A Figura 4.18 ilustra o ambiente definido na Figura 4.15 sobre o plano cartesiano com o radar em operação. A simulação foi realizada para um tempo de simulação de 80s, o que equivale a um valor máximo de  $\alpha$  igual  $96^\circ$  correspondente à rotação do radar. Para  $0^\circ \leq \alpha \leq 96^\circ$ , este é o intervalo em que todas as femtocélulas dentro da área serão submetidas à interferência do lóbulo principal. Neste caso, é realizada a validação para um cenário de pior caso, pois todo o resto do período de rotação do radar, as femtocélulas estarão fora da região de interferência primária.

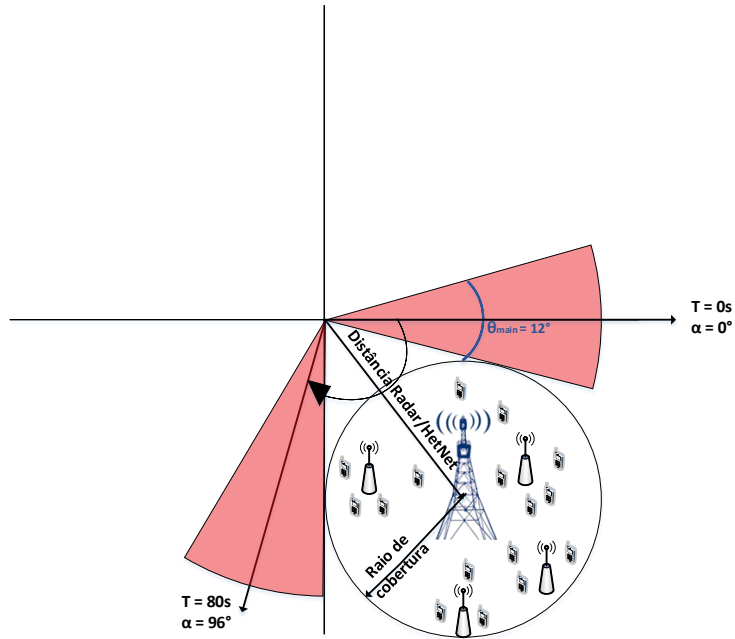
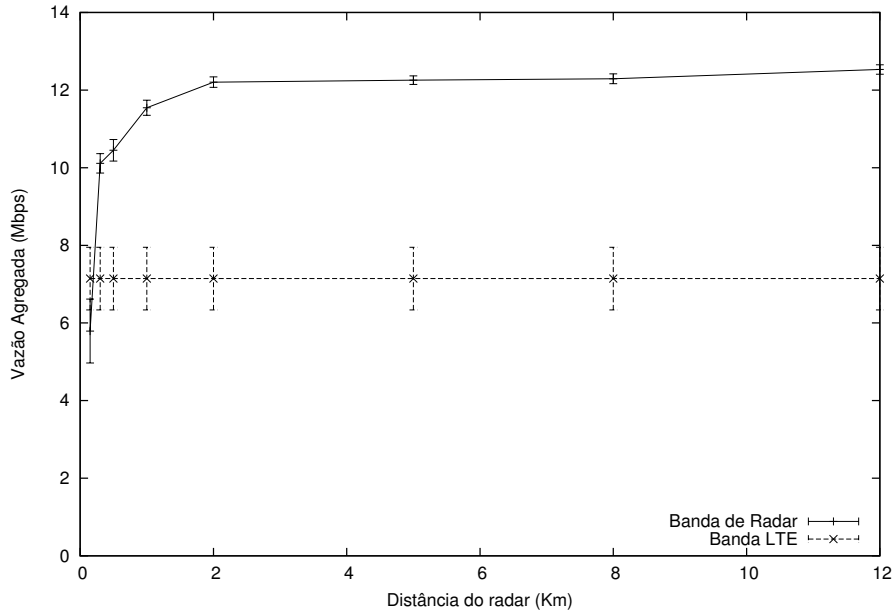


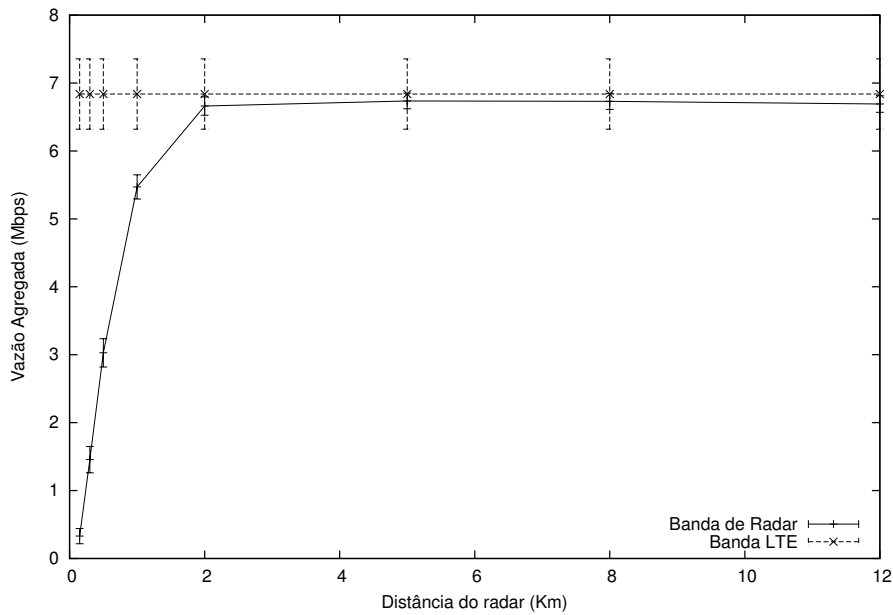
Figura 4.18: Localização da rede LTE Heterogênea em relação à localização do lóbulo principal, no início e fim da simulação.

Primeiramente, foi utilizada uma área de cobertura da macrocélula de até 100m de distância da mesma, onde 4 femtocélulas são dispostas seguindo a mesma metodologia da seção anterior, o que equivale a uma densidade de, aproximadamente,  $127 \text{ femtocélulas}/\text{km}^2$ . Os resultados mostram a variação na vazão agregada dos UEs pertencentes às HeNBs, quando se varia a distância entre a rede heterogênea e o radar, tendo como referência o centro da área de cobertura. Analisando primeiramente a vazão no *downlink*, a partir dos resultados da área de 100m de raio, mostrados na Figura 4.19(a), pode-se verificar que, somente para uma distância de 150m do radar, a vazão agregada nesta banda se mostrou abaixo da vazão obtida no uso da banda LTE. O uso da banda de radar começa a se tornar vantajosa a partir da distância de 300m, onde a vazão se mantém entre 10 e 12Mbps, enquanto que a vazão obtida no canal LTE compartilhado é em torno de 8Mbps para todos os valores de distância do radar. Segundo o cálculo do tamanho das zonas de exclusão, temporal e espacial realizada na Seção 3.6.1, a vazão agregada da banda de radar começa a se tornar estável dentro da zona temporal do radar, que se inicia em torno de 0.9km, sendo vazão agregada desta zona o dobro da obtida no canal LTE comum, evidenciando uma grande vantagem no uso oportunista a partir da zona de uso temporal. Para o *uplink*, Figura 4.19(b), a vazão agregada na banda de radar

se mantém abaixo da banda LTE até a distância de 1km do radar, mostrando que a interferência do radar impacta significativamente as transmissões do *uplink*, mantendo a vazão abaixo dos 6Mbps. A partir de 2km, o resultado obtido se mantém igual ao resultado da banda LTE. Isto mostra que, no *uplink*, o compartilhamento da banda de LTE tem um impacto menor que no *downlink*. Este resultado é esperado, dado que a potência de transmissão da macrocélula é de 20dB acima da femtocélula, enquanto que a potência de transmissão dos UEs é a mesma entre os usuários das femto e macrocélula. Neste caso, o impacto das transmissões pelo *downlink* da MeNB e femtocélulas é maior que as transmissões dos UEs no *uplink*, gerando um ganho de vazão superior no *downlink* que no de *uplink*, quando utilizada a banda de radar. Logo, os resultados mostram que a interferência ocasionada pelo compartilhamento da banda LTE não impacta significativamente o tráfego de *uplink*, dado que o uso da banda de radar manteve o nível de vazão agregada obtida no uso da banda LTE. Já, no *downlink*, a interferência entre MeNB e HeNBs gera uma queda considerável na vazão dos usuários *indoor*, quando comparado com a vazão obtida no uso da banda de radar.



(a) Vazão no canal de *downlink*



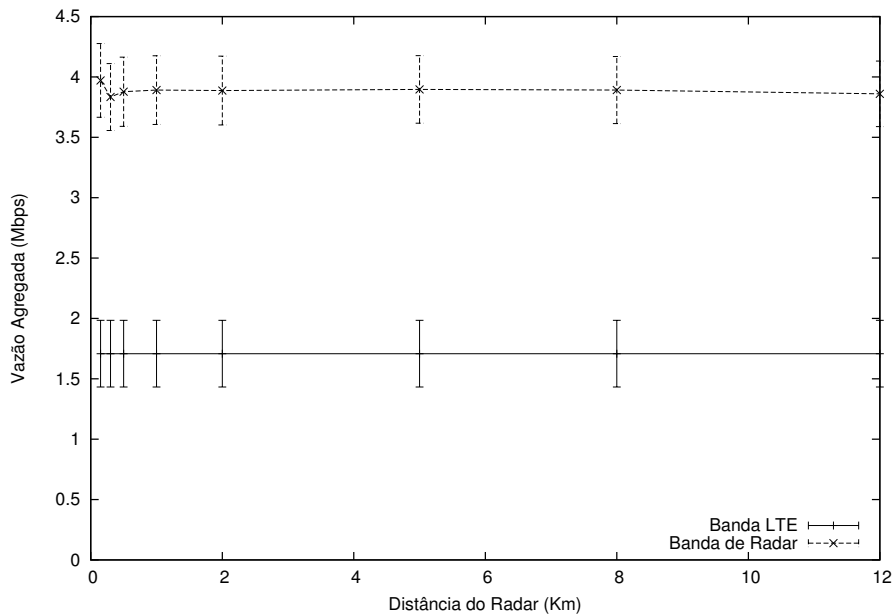
(b) Vazão no canal de *uplink*

Figura 4.19: Vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas.

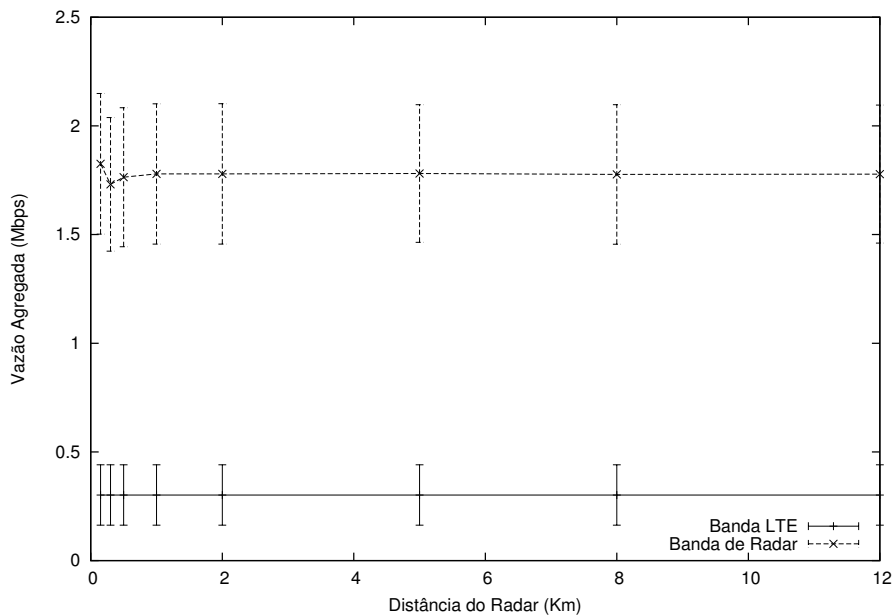
Os gráficos da Figura 4.20 mostram os resultados da vazão agregada dos UEs associados à macrocélula. Diferentemente do gráfico anterior, a curva "Banda de Radar" corresponde à vazão agregada obtida pelos UEs associados à macrocélula que utilizam a banda LTE, enquanto as femtocélulas operam na banda de radar, dedicando a banda LTE para uso exclusivo da MeNB, enquanto que, a curva "Banda LTE" corresponde à vazão agregada dos UEs *outdoor* para o cenário em que há o



compartilhamento da banda LTE com as femtocélulas. A partir dos resultados, pode-se constatar um ganho de até 2 vezes a vazão da banda LTE compartilhada no *downlink*, e de até 4 vezes no *uplink*. A qualidade de experiência dos usuários da macrocélula melhora significativamente. Analisando os valores de vazão agregada, enquanto que a banda LTE permanece entre 1.5Mbps e 2Mbps, a banda de radar chega a 4Mbps de vazão.



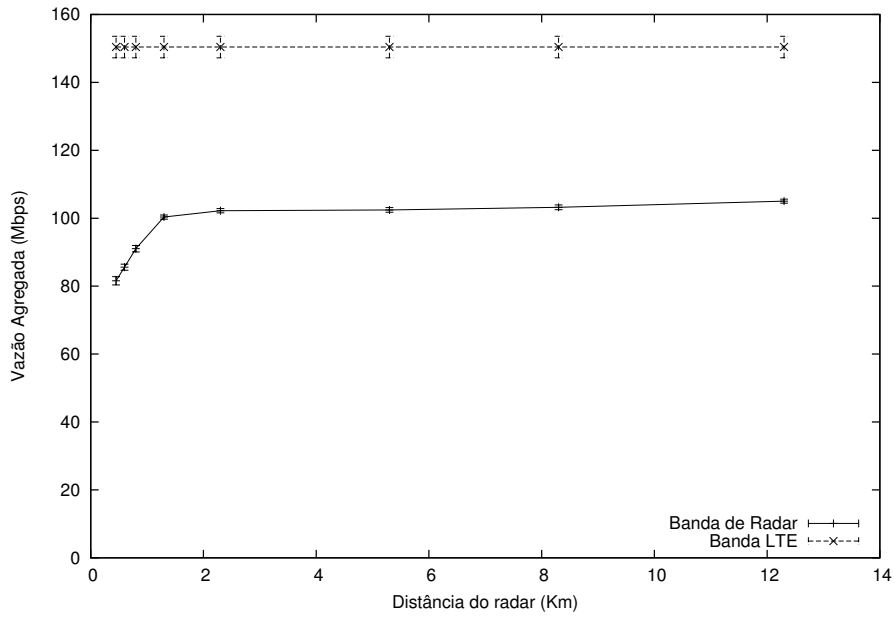
(a) Vazão no canal de *downlink*



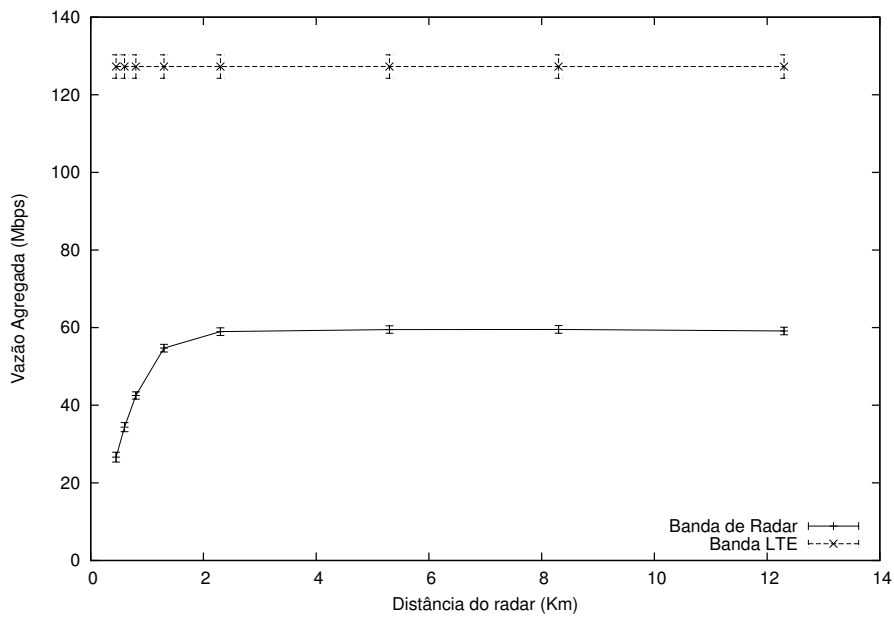
(b) Vazão no canal de *uplink*

Figura 4.20: Vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos UEs da macrocélula.

O mesmo cenário para a área de cobertura de 100m de raio, também foi gerado para uma área de cobertura total de 300m de raio, mantendo a mesma densidade de femtocélulas e usuários da macrocélula. Neste caso, estão instanciados 36 femtocélulas, com 3 UEs cada uma, e 36 UEs na macrocélula. Os resultados obtidos para a vazão agregada das femtocélulas se encontram na Figura 4.21. Como pode ser visto, o resultado foi oposto ao do cenário anterior, com a vazão agregada da banda LTE estando acima da banda de radar nos dois enlaces, com uma diferença igual ao dobro da vazão agregada na banda de radar para o *uplink*. No entanto, a partir da Figura 4.22, o ganho obtido na vazão agregada dos usuários da macrocélula foi de até 10 vezes a vazão da banda LTE para o *downlink* e de até 2 vezes para o *uplink*. Para explorar a causa na mudança de comportamento da vazão entre as duas bandas, foi gerado este mesmo cenário, com a mesma densidade, variando apenas o raio de cobertura, com o objetivo de se verificar o comportamento da vazão no aumento da área em que as femtocélulas e UEs estão inseridos.

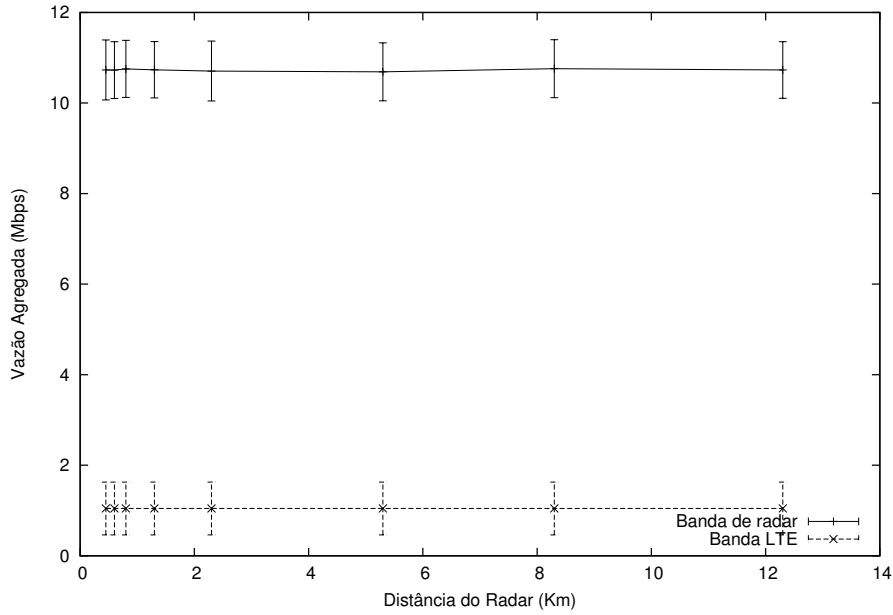


(a) Vazão no canal de *downlink*

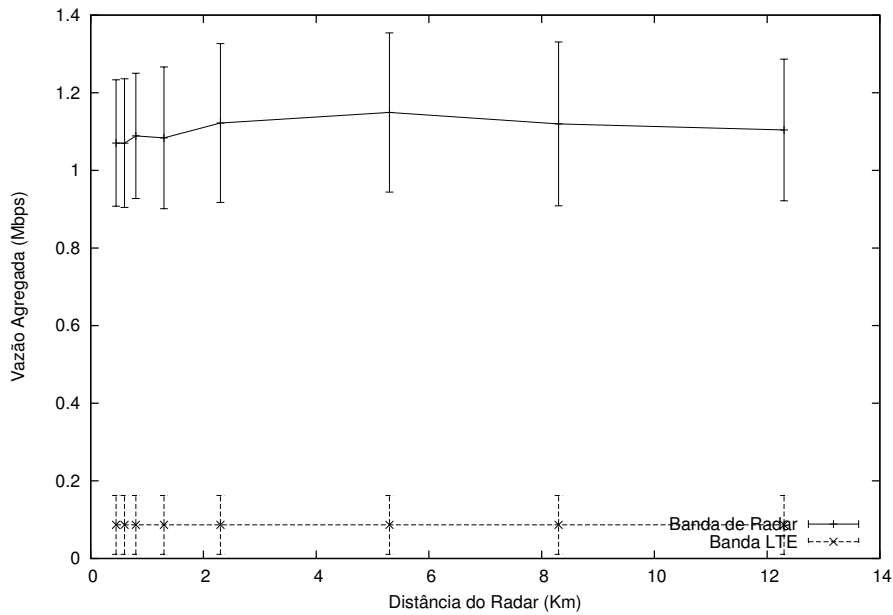


(b) Vazão no canal de *uplink*

Figura 4.21: Vazão agregada dos usuários das femtocélulas - 300m de cobertura.



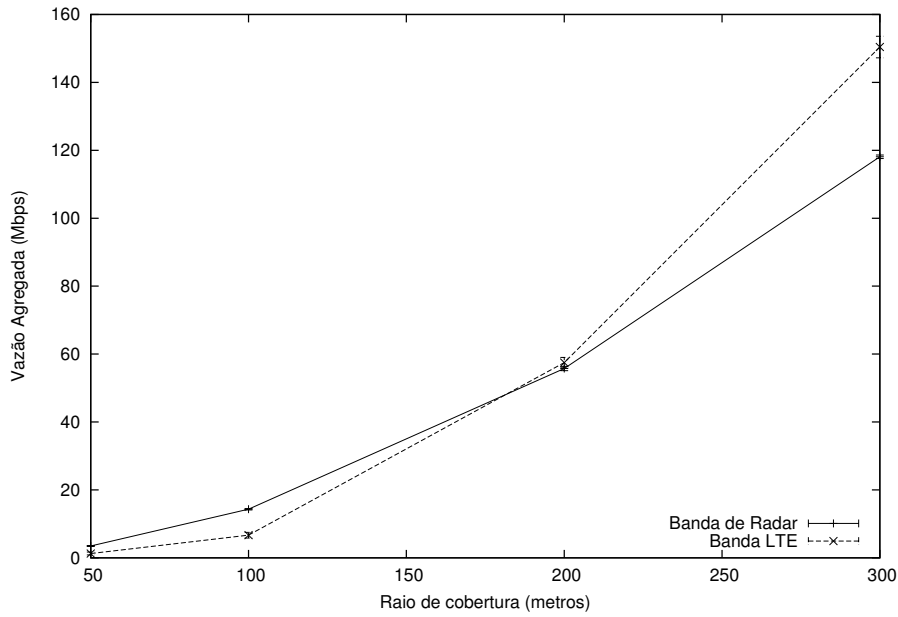
(a) Vazão no canal de *downlink*



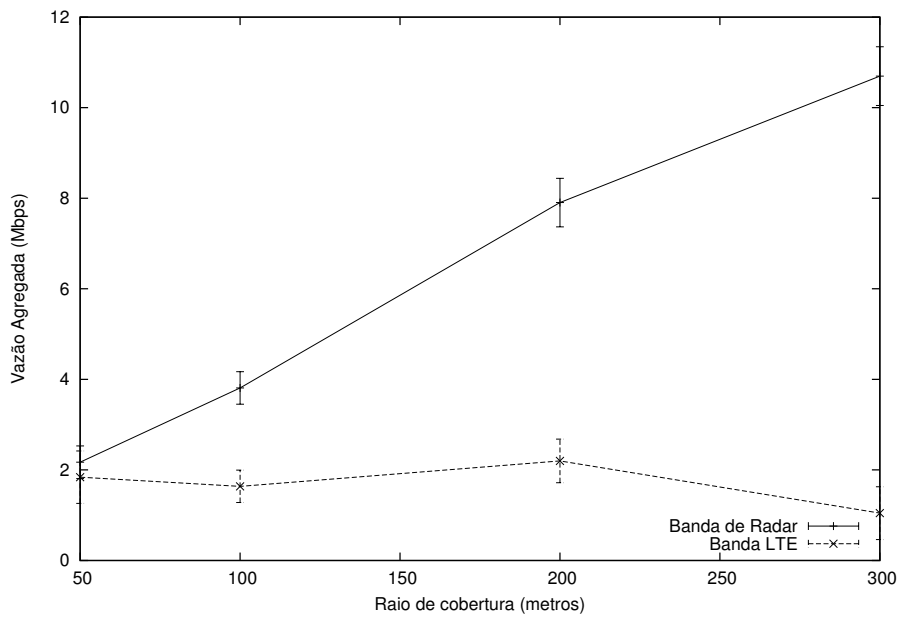
(b) Vazão no canal de *uplink*

Figura 4.22: Vazão agregada dos usuários da macrocélula - 300m de cobertura.

Dado que a mudança no comportamento da vazão não se deu pela variação da distância do radar, com USs inseridos em diferentes zonas, e dado que o comportamento no *uplink* foi alterado da mesma forma que o *downlink*, o resultado mostrado na Figura 4.23 leva em conta apenas o comportamento da vazão de *downlink* para USs dispostos na zona espacial, a uma distância de 200km do radar, para todos os raios de cobertura analisados.



(a) Vazão no canal de *downlink* - HeNBs



(b) Vazão no canal de *downlink* - MeNB

Figura 4.23: Comportamento da vazão agregada com o aumento do raio de cobertura do ambiente de simulação.

A partir da Figura 4.23(a), pode-se constatar que, com o aumento no raio de cobertura, e consequentemente o aumento na quantidade de usuários, para manter a densidade de  $127 \text{ femtocélulas}/\text{km}^2$ , a vazão da banda LTE se eleva, com um comportamento exponencial, de maneira mais assentuada que a vazão da banda de radar, ultrapassando a vazão da mesma a partir do raio de 200m. Logo, há uma tendência em uma maior vazão na banda de LTE quando comparada com a

banda de radar para um raio de cobertura maior que 200m. Este comportamento pode ser explicado devido ao nível de interferência da macrocélula nas transmissões das femtocélulas, pois a macrocélula é constituída por setores de  $60^\circ$  que, conforme visto na Figura 4.8, o nível de sinal nas bordas do setor é mais baixo. A antena da macrocélula possui seu padrão de irradiação no formato de um cone, onde o nível de potência se concentra no centro deste, sendo esta a direção de maior irradiação no nível do sinal. Quanto menor a área onde as femtocélulas são distribuídas, maior é o número de femtocélulas presentes no centro do setor, ou seja, na região de maior potência no nível do sinal. Neste caso, há uma piora na qualidade do canal para as femtocélulas inseridas na região. De forma contrária, quanto maior a área, mais femtocélulas se encontram nas regiões onde o nível de irradiação da antena da macrocélula é menor, diminuindo a interferência e, conseqüentemente, aumentando a qualidade do canal. Neste caso, a vazão na banda LTE se mostrou superior à vazão obtida na banda de radar na zona espacial. Conseqüentemente, nas zonas temporal e de exclusão, o desempenho se manterá inferior, dado o comportamento previsto nos resultados anteriores.

No entanto, verificando a Figura 4.23(b), pode-se constatar o comportamento na vazão de dados dos usuários da macrocélula. O cenário da banda compartilhada mostra uma queda na vazão com o aumento na área de cobertura. Para um valor acima de 200m de raio, há uma tendência na redução da vazão, dado o nível de interferência proporcionado entre as transmissões das HeNBs e MeNB. Para o cenário da banda de radar, a vazão permanece crescendo quanto maior a área e maior o número de usuários. Mesmo com o aumento na vazão das femtocélulas na banda LTE, a queda na vazão dos usuários da macrocélula causa uma pior qualidade de experiência do usuário, e tende a piorar com o aumento na área de cobertura e de usuários, enquanto que a banda de radar mantém uma crescente na vazão de dados, tanto dos usuários *indoor* quanto dos usuários *outdoor*, colaborando na qualidade dos serviços 4G prestados aos UEs da macrocélula.

Logo, torna-se vantajoso o uso da banda do radar em redes LTE Heterogêneas, frente ao impacto extremo e nocivo que os UEs da macrocélula sofrem diante da quantidade de femtocélulas que compartilham a banda LTE. A próxima Seção irá mostrar os resultados obtidos a partir do uso de mecanismos DSA nos dispositivos LTE para acesso à banda de radar.

## 4.4 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas as características e definições da arquitetura LTE, constituída pela rede de acesso, denominada E-UTRAN, e o núcleo EPC. Neste contexto, foi apresentada a pilha de protocolos contida em cada um dos dispositivos

LTE definidos (eNB, UE, PGW e SGW), dividida em dois planos de operação: controle e usuário. Além disso, a estrutura de camada física e a divisão dos recursos de rádio foram destacados, como base para o acesso dinâmico ao espectro e o modelo de acesso ao meio do radar, implementado no simulador de redes ns-3. O cálculo da interferência nos dispositivos LTE e no radar foram evidenciados a partir do modelo, bem como o comportamento do radar no uso do espectro de frequência. A partir do acesso ao meio modelado, foi realizada a análise de desempenho no uso da banda de radar pelos dispositivos LTE de maneira indiscriminada, para fins de avaliação. Os resultados extraídos das simulações mostraram um ganho considerável na vazão de *downlink* dos usuários *indoor*, quando as mesmas se utilizavam da banda de radar, quando comparado com a banda LTE usual. No entanto, foi visto que o ganho depende do raio de cobertura considerado. Ou seja, para as femtocélulas concentradas até uma distância de 200 m da macrocélula de 6 setores, o uso da banda de radar se mostrou vantajosa sob o ponto de vista dos UEs *indoor*. Para distâncias acima desta, a banda LTE obteve uma vazão maior de dados, tanto no enlace de subida quanto no de descida, constatando uma qualidade superior deste canal em relação à banda de radar. Porém, sob o ponto de vista dos usuários da macrocélula, o ganho na vazão destes, proporcionado pelo uso da banda de radar pelas femtocélulas, se comportou de maneira crescente. Ao contrário do ambiente de 100 m de raio, a vazão dos UEs *outdoor* sofreu uma redução com o aumento na área de cobertura, quando utilizada a banda LTE compartilhada, degradando os serviços disponibilizados aos usuários da macrocélula. Neste caso, a banda de radar gera um ganho considerável, mantendo tanto a qualidade da rede 4G para usuários *indoor* quanto para os usuários *outdoor*. Dadas as vantagens no uso da banda de radar pelos dispositivos LTE, serão vistos a seguir a implementação dos mecanismos DSA expostos na literatura e o cooperativo, proposto neste trabalho, para o acesso dinâmico ao espectro, a partir do ambiente de acesso ao meio do radar modelado no simulador ns-3.

# Capítulo 5

## Implementação dos mecanismos DSA em dispositivos LTE

Este capítulo visa apresentar os mecanismos DFS, DFS-T e *MainBeam* inseridos no contexto de redes LTE Heterogêneas. Os mecanismos citados foram implementados no módulo LTE do ns-3, para análise de desempenho dos mesmos quando se utilizam do uso oportunista da banda de radar, cujo modelo utilizado é o proposto no capítulo anterior.

Logo em seguida, é apresentada a proposta do mecanismo de acesso dinâmico ao espectro em redes LTE, denominado de SAS, segundo a regulamentação do FCC, que se utiliza dos conceitos de limiar dinâmico e cooperação entre UP e USs definidos no mecanismo cooperativo. Além disso, será abordado o problema de uso aleatório do espectro por múltiplos USs que surge durante a atualização dinâmica do limiar de referência. Este problema é resolvido por um controle de admissão definido por uma base de dados, denominada de *Geolocation database*, que busca controlar o uso aleatório das bandas de radar por múltiplos secundários. Ao final, a análise dos resultados de simulação é realizada, comparando o desempenho no tráfego gerado tanto por UEs *indoor* quanto *outdoor*, e verificando o impacto causado no sistema de radar diante das transmissões secundárias, para cada mecanismo DSA.

### 5.1 Implementação dos mecanismos DSA propostos na literatura

Os mecanismos levam em conta suas devidas características de operação citadas na Seção 2.1. Para isso, é necessário definir uma fase de sensoreamento antes do uso do espectro pela eNB. Neste trabalho, foi implementado uma fase de sensoreamento do espectro a cada TTI, imediatamente antes do período de uso dos canais PCFICH e PDCCH para envio de mensagens de controle, conforme ilustrado no diagrama da



Figura 5.6. Após este período, caso a eNB esteja operando na banda LTE e tenha permissão de acesso à banda de radar, a partir das condições de cada mecanismo, uma mensagem de controle é enviada ao UEs, informando o uso da banda oportuna de radar, para que os usuários associados à eNB modifiquem seus parâmetros de rádio para operarem na frequência do radar. Caso a eNB esteja inserida na zona temporal de operação, o MainBeam e DFS-T permanecerão trocando entre bandas LTE e Radar durante o tempo, enquanto que o DFS, dada o seu impedimento no uso temporal, uma vez que detecta o radar acima de seu limiar, retorna à banda LTE, passando a transmitir somente pela mesma.

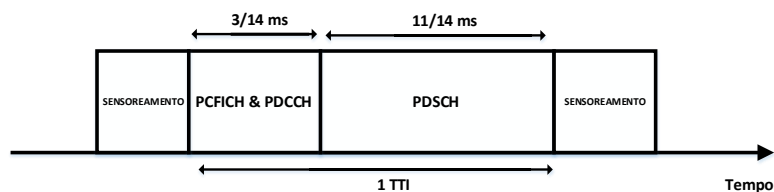


Figura 5.1: Período de sensoreamento do espectro localizado entre TTIs.

Para as simulações realizadas, não foi considerado o período de 60 segundos do CAC (*Channel Availability Check*), em que se verifica a ocupação do canal por um radar, dos mecanismos DFS e DFS-T, e o período de CMT (*Channel Moving Time*), de troca do canal ocupado por um livre, foi considerado como desprezível. Logo, é levado em conta para a avaliação de desempenho somente as técnicas de uso oportunista do espectro de cada mecanismo DSA.

### 5.1.1 Resultados

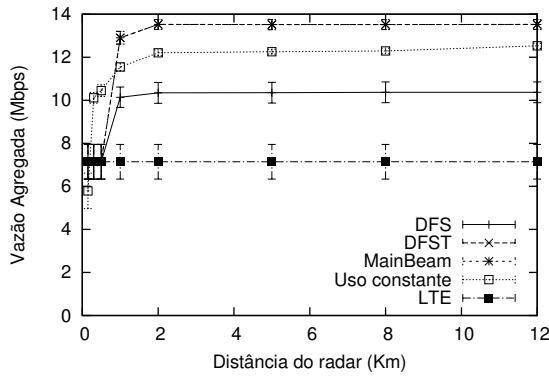
Foi considerado o mesmo ambiente de simulação utilizado na verificação das vantagens do uso do espectro. Primeiramente, foi verificado o desempenho dos mecanismos sob o ponto de vista dos secundários, analisando a vazão agregada obtida. Para o raio de cobertura de 100m, com 4 HeNBs, 3 UEs associados em cada uma, e 4 UEs associados à MeNB, o resultado da vazão agregada dos UEs da femtocélula pode ser visto na Figura 5.2.

Os Gráficos 5.2(a) e 5.2(b) mostram os resultados da vazão no *downlink* e *uplink*, respectivamente, para as distâncias que mantêm os USs inseridos nas zonas 1 (exclusão) e 2 (temporal). Como pode ser visto, para as distâncias de 400m, 600m e 800m, todos os mecanismos possuem o mesmo resultado de vazão obtida pelo uso da banda LTE, o que é coerente, pois estas distâncias mantêm os USs inseridos na

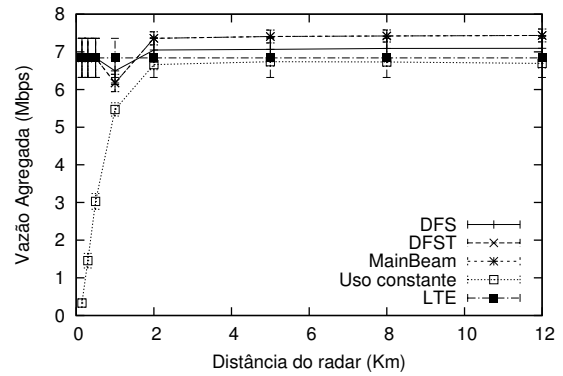
zona de exclusão para todos os mecanismos, fazendo com que os dispositivos utilizem somente a banda de LTE. Neste caso, para 600m e 800m, o uso constante da banda de radar, sem qualquer mecanismo DSA administrando o uso do espectro, mantém sua vazão acima, devido ao uso da banda de radar, no entanto, o mesmo interfere com o radar acima do limiar estipulado. Para as distâncias maiores que o limite da zona de exclusão, de 1km, o DFS-T e o *MainBeam* foram os que proporcionaram o maior nível de vazão agregada para os UEs das femtocélulas, sendo que o DFS, se manteve abaixo destes. A diferença na vazão do DFS para os outros dois mecanismos, está na possibilidade do uso temporal do espectro pelo DFS-T e *MainBeam*, que não transmitem na banda de radar somente quando o lóbulo principal está direcionado para o US, enquanto que, o DFS, quando verifica, durante o período de sensoriamento, que o nível de potência recebida está acima do limiar de  $-64dBm$ , troca imediatamente de canal e passa a utilizar somente a banda LTE. Para a zona 2, o DFS-T e o *MainBeam* possuem o mesmo comportamento, acarretando em um mesmo resultado. O uso eficiente do espectro por estes mecanismos possibilita uma maior vazão, que nos períodos de maior interferência, utilizam a banda LTE para a transferência de dados, aumentando ainda mais o ganho obtido pelo uso da banda de radar. Quando utilizada constantemente, a perda na vazão se dá devido aos períodos de interferência do lóbulo principal do radar, conforme visto nas perdas de vazão dos gráficos da verificação do modelo, em que um vale surge nos períodos em que o lóbulo principal se encontra direcionado para o US. O *uplink*, da mesma forma que o *downlink*, possui a vazão agregada igual ao utilizado pela banda LTE para todos os mecanismos nas distâncias que inserem os USs na zona de exclusão. Para distâncias maiores, os mecanismos DFS-T e *MainBeam* se encontram levemente acima do DFS, da banda LTE e do uso constante da banda de radar, devido ao mesmo uso eficiente mencionado para *downlink*.

A partir dos Gráficos 5.2(c) e 5.2(d), pode-se verificar um aumento na vazão agregada dos UEs das HeNBs na zona espacial, quando comparado com o uso do espectro na zona temporal. Neste caso, o DFS-T e o DFS irão utilizar o espectro indiscriminadamente. O ponto acima de 100km, limite da zona temporal, já mostra o uso do espectro pelo DFS semelhante ao mecanismo DFS-T. O uso constante da banda de radar para estas distâncias gera um ganho considerável. Já o *MainBeam* permanece sempre com a mesma vazão, pois permanece com o uso temporal do espectro, de forma a não transmitir nos períodos em que o lóbulo principal encontra-se voltado para o US. Com isso, a vazão se mantém abaixo dos outros dois mecanismos, mas ainda obtendo um alto ganho da banda LTE no *downlink*. No *uplink*, o DFS aumenta o ganho, devido ao uso da banda de radar, mantendo a mesma vazão dos outros mecanismos. Para este caso, assim como as zonas 1 e 2, há um leve aumento na vazão, quando comparado com a banda LTE, com todos os mecanismos obtendo

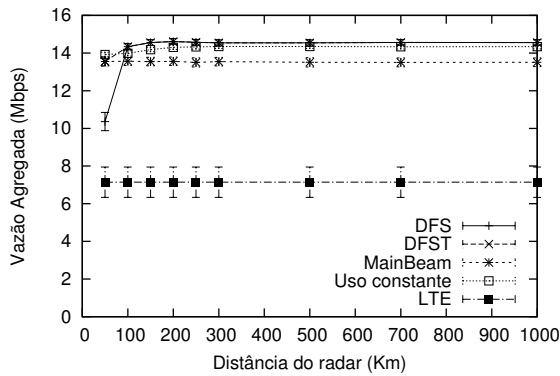
seus desempenhos similares.



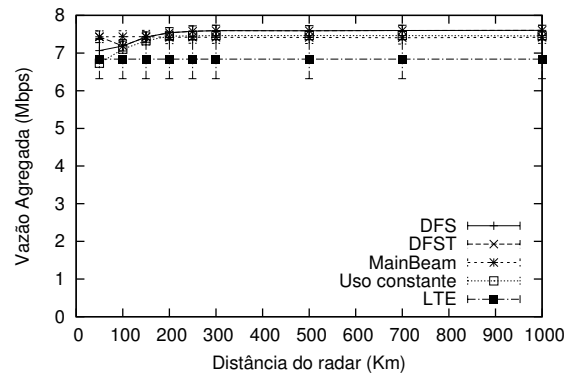
(a) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 1 e 2



(b) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 1 e 2



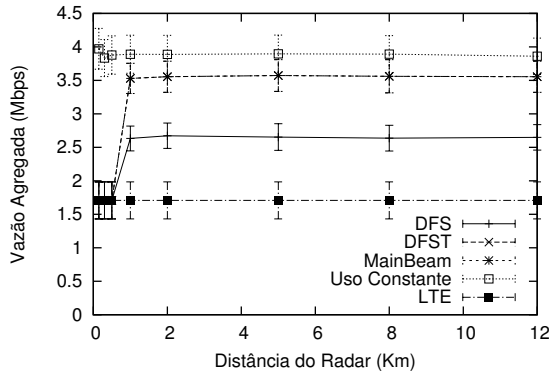
(c) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 2 e 3



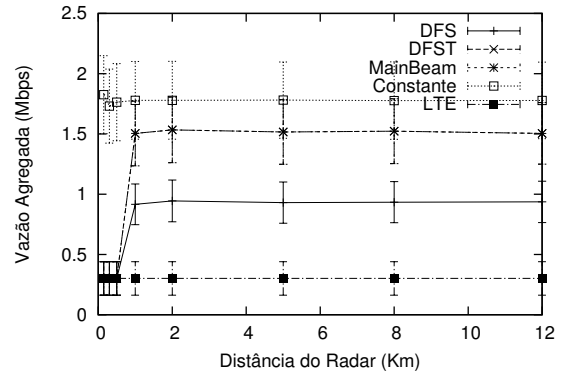
(d) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 2 e 3

Figura 5.2: Vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, abrangendo as zonas 1, 2 e 3 - 100m de cobertura.

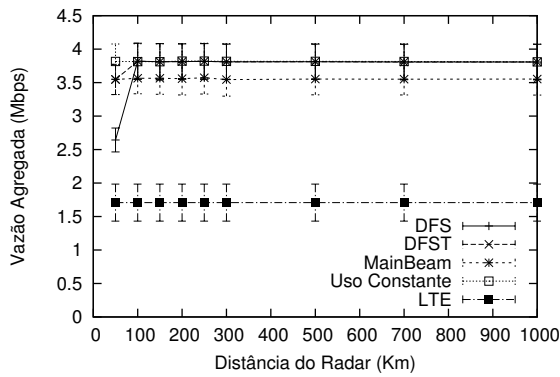
A Figura 5.3 mostra os resultados de vazão agregada dos UEs associados à MeNB, a partir dos mecanismos DSA utilizados pelas femtocélulas quando as mesmas acessam a banda de radar. Analisando os Gráficos 5.3(a) e 5.3(b), resultados de vazão agregada nas zonas 1 e 2 para o *downlink* e *uplink*, respectivamente, pode-se constatar que os mecanismos DFS-T e *MainBeam* foram os que mais se aproximaram do ganho máximo obtido pelo uso constante da banda de radar, a partir das distâncias acima da zona de exclusão. O DFS, pelo fato dos USs estarem localizados na zona de oportunidades temporais, só adquire ganho a partir do período em que os USs usufruem da banda de radar, ou seja, antes do lóbulo principal atingir a região em que os USs se encontram. Mesmo assim, a vazão se mantém 1Mbps acima da banda LTE. Já para as zonas 2 e 3, a partir da análise dos Gráficos 5.3(c) e 5.3(d), os mecanismos DFS e DFS-T possuem o mesmo desempenho do uso constante, devido ao uso das oportunidades espaciais adquiridas a partir das distâncias maiores que 100km, enquanto que o *MainBeam* mantém seu desempenho, com o ganho proveniente apenas das oportunidades temporais de uso da banda de radar.



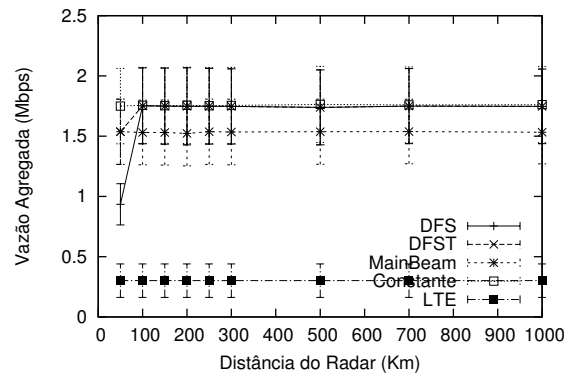
(a) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 1 e 2



(b) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 1 e 2



(c) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 2 e 3



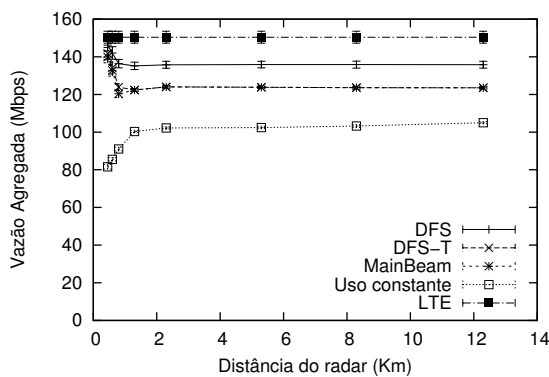
(d) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 2 e 3

Figura 5.3: Vazão agregada do tráfego TCP dos usuários da macrocélula nas zonas 1, 2 e 3 - 100m de cobertura.

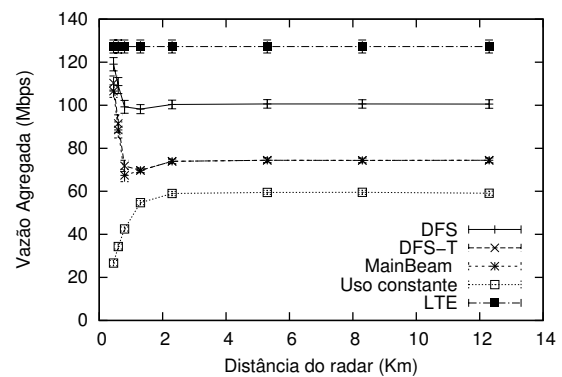
Sob o ponto de vista de uso da banda de radar pelos dispositivos LTE, pode-se concluir que o DFS-T é o mecanismo que obteve um maior ganho, a partir dos usos oportunistas temporais e espaciais do espectro. No entanto, a análise do impacto no sistema de radar se faz necessária, no que concerne à interferência proporcionada pelas transmissões secundárias. Este aspecto será tratado mais adiante, quando se pretende avaliar o desempenho do mecanismo cooperativo proposto.

Conforme verificado na Figura 4.23, para um raio de cobertura acima de 200m, o comportamento da vazão agregada nas bandas de radar e LTE se inverte. Tendo em vista este cenário, foram avaliadas as mesmas métricas obtidas anteriormente a partir do cenário com um raio de cobertura de 300m, para uma instância de 36 femtocélulas, 3 UEs associados em cada uma, e 36 UEs associados à macrocélula. As Figuras 5.4 e 5.5 mostram os resultados obtidos. Como pode ser visto, a vazão agregada das femtocélulas proveniente dos mecanismos DSA estão abaixo da vazão para o canal LTE comum. Isto se dá devido ao ganho no uso deste canal para raios de cobertura acima de 200m, conforme visto anteriormente. O DFS, por utilizar por um período maior a banda LTE, foi o mecanismo que obteve os melhores resultados. No

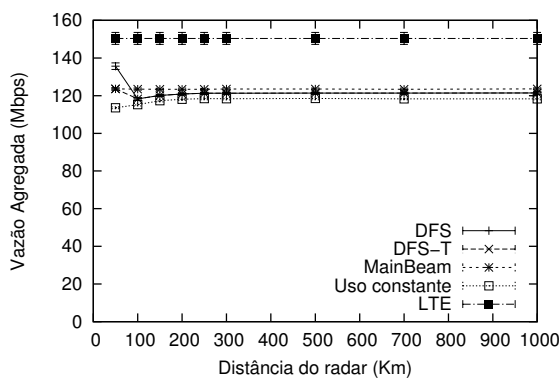
entanto, os usuários da macrocélula são fortemente impactados pelas transmissões das femtocélulas na banda LTE, com uma vazão média que varia em torno de 1Mbps no *downlink* e praticamente todos os dados transmitidos no *uplink* são perdidos. Com o uso da banda de radar, a vazão aumenta em até 12 vezes com o uso constante da banda de radar, o que gera um ganho considerável para os usuários *outdoor*. Neste caso, os mecanismos que usufruem a maior parte do tempo das bandas de radar obtiveram um ganho mais próximo do uso contante, com um valor médio de 10Mbps para o *downlink* e 0.8Mbps no *uplink* para o DFS-T e *MainBeam* nas zonas 1 e 2. O DFS passou a ter o mesmo desempenho que o DFS-T a partir da zona 3, devido às oportunidades de uso espacial, com uma vazão de até 12Mbps, alcançando o desempenho do uso constante da banda de radar. Neste caso, mais uma vez o DFS-T se mostrou o mecanismo que utiliza os recursos do espectro de maneira a oferecer um maior ganho nas transmissões dos secundários no primeiro cenário, e dos usuários da macrocélula no segundo cenário.



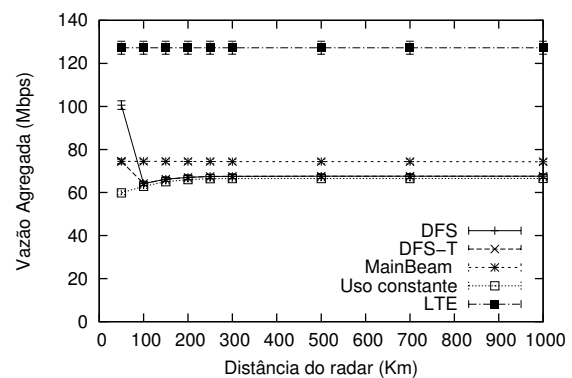
(a) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 1 e 2



(b) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 1 e 2

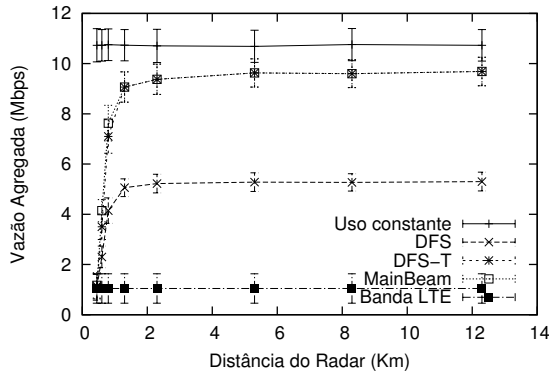


(c) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 2 e 3

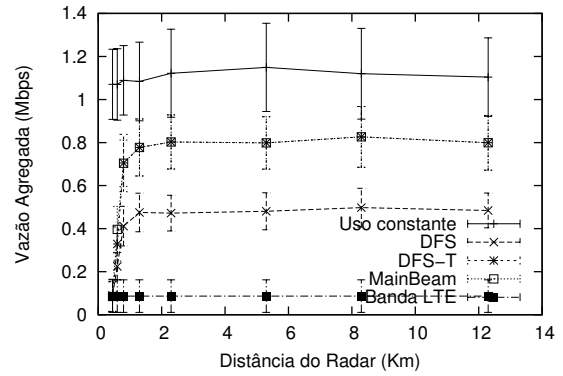


(d) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 2 e 3

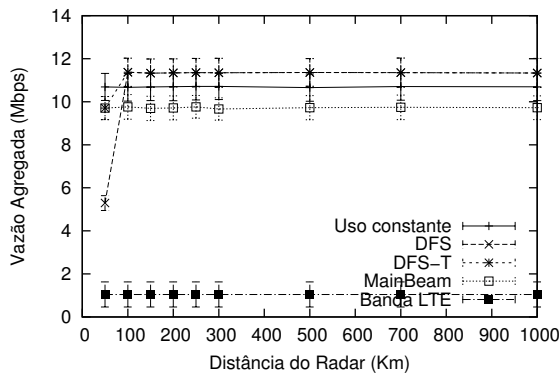
Figura 5.4: Vazão agregada do tráfego TCP dos usuários das femtocélulas nas zonas 1, 2 e 3 - 300m de cobertura.



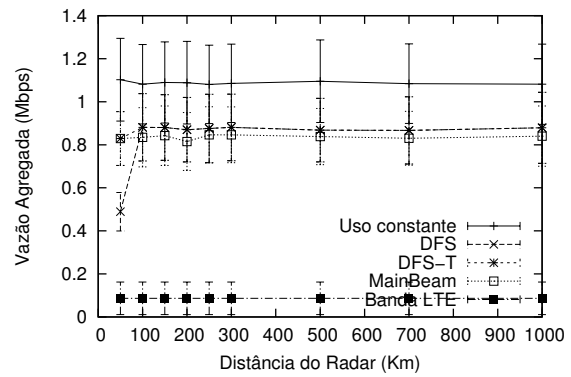
(a) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 1 e 2



(b) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 1 e 2



(c) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 2 e 3



(d) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 2 e 3

Figura 5.5: Vazão agregada do tráfego TCP dos usuários da macrocélula nas zonas 1, 2 e 3 - 300m de cobertura.

## 5.2 Proposta do Mecanismo DSA Cooperativo em Redes LTE

Com a análise de desempenho realizada nas seções anteriores, pode-se constatar as vantagens no uso oportunista das bandas de radar pelos dispositivos LTE, inseridos no contexto de redes heterogêneas, através dos mecanismos DSA propostos até o momento na literatura. No entanto, o problema da interferência agregada estudada anteriormente não foi analisada, tendo em vista, a perspectiva do radar quanto à interferência proporcionada pelos secundários. Levando isto em conta, o mecanismo cooperativo proposto no Capítulo 3, que visa atacar o problema da interferência agregada e manter os ganhos obtidos pelo uso oportunista da banda, é implementado nas redes LTE, a partir da arquitetura SAS proposta na seção a seguir e a modificação do protocolo RRC para o envio e recebimento das mensagens de controle para troca de informações necessárias para o funcionamento do mecanismo cooperativo.

### 5.2.1 Arquitetura SAS proposta

A arquitetura SAS proposta está ilustrada na Figura 5.6. Nela, é definida uma base de dados, cuja troca de mensagens com as HeNBs é realizada a partir do mecanismo de controle de admissão, definido mais adiante, para o gerenciamento do uso aleatório do espectro por múltiplos USs. A partir do comportamento dos UPs e USs, detalhados nos algoritmos 3 e 2, respectivamente, a troca de mensagens de controle entre UPs e USs implementa a atualização do limiar dinâmico utilizado como referência para os USs. A seguir, serão abordados os detalhes sobre a troca de mensagens RRC entre UP/USs e Base de dados/USs, e o mecanismo de controle de admissão, que busca complementar o mecanismo cooperativo.

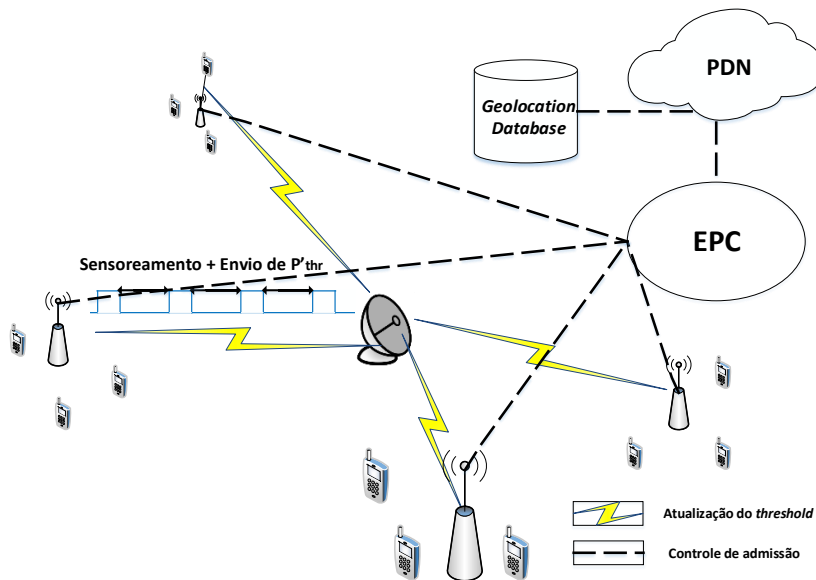


Figura 5.6: Arquitetura SAS proposta para as redes LTE. Utilização do mecanismo cooperativo.

### Protocolo RRC com suporte ao limiar dinâmico

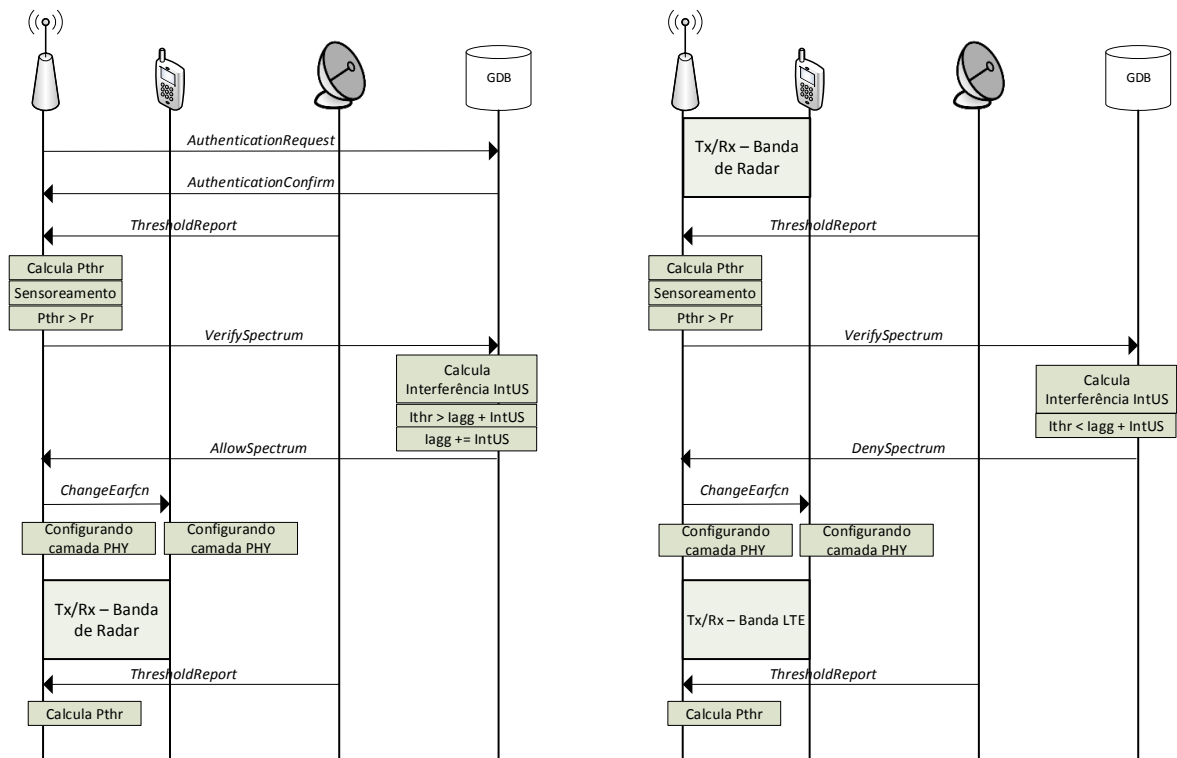
O protocolo RRC em redes LTE possui, dentre suas principais funcionalidades, o suporte ao acesso dinâmico ao espectro, através de mensagens de controle trocadas entre eNB e UEs para a configuração da camada física na frequência em que se deseja operar. Em [33], os autores propõem um mecanismo DSA em bandas de TV e reutilização das bandas de GSM por redes LTE, a partir da modificação do protocolo RRC, adicionando mensagens de controle para suporte ao mecanismo, em conjunto com uma base de dados do tipo *geolocation database* para a permissão de acesso dinâmico ao espectro licenciado.

Para o mecanismo cooperativo proposto, são definidas as seguintes mensagens de controle do protocolo RRC:

- ***ThresholdReport*** - Mensagem utilizada pelo UP para envio das atualizações de limiar dinâmico, contendo o valor de  $P'_{thr}$  atual, definido na Equação 3.6. Enviada a cada atualização do limiar, a partir da variação da interferência agregada no radar.
- ***AuthenticationRequest*** - Autenticação da HeNB na base de dados, contendo informações sobre posição, potência de transmissão, frequência de operação e ganho da antena.
- ***AuthenticationConfirm*** - Confirmação da base de dados à HeNB. Autenticação bem sucedida.
- ***AuthenticationFailure*** - Envio de falha na autenticação pela base de dados à HeNB.
- ***VerifySpectrum*** - Mensagem de verificação do espectro enviada pelo US para a base de dados, informando a frequência de operação que se deseja utilizar de forma oportunista. Utilizada no controle de admissão para uso da banda de radar.
- ***AllowSpectrum*** - Mensagem gerada pelo controle de admissão gerada pela base de dados, dando permissão ao US para utilizar a banda de radar.
- ***DenySpectrum*** - Mensagem do controle de admissão, que impede o uso da banda licenciada pelo US.
- ***ChangeEarfcn*** - Enviada pela eNB aos UEs, informando a frequência de operação a ser utilizada, através da EARFCN.

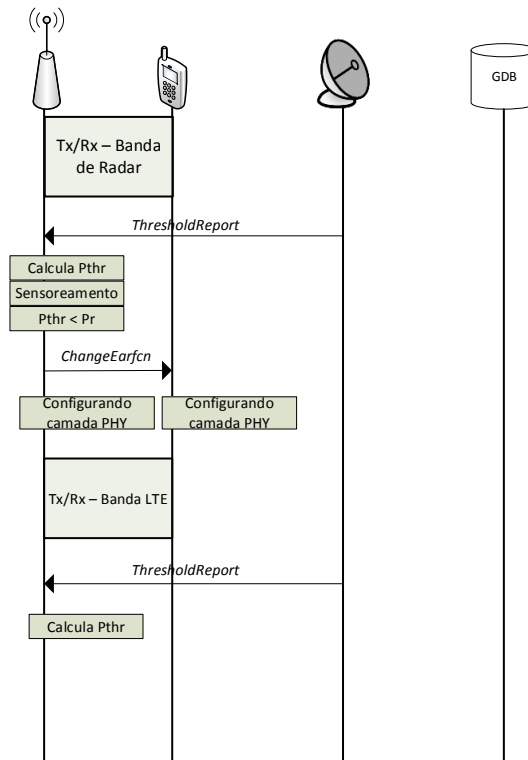
As Figura 5.7 ilustram a operação da troca de mensagens de controle entre as entidades que o compõem o sistema SAS. Em 5.7(a), o US está fora da zona de exclusão e, portanto, é permitido o uso da banda de radar pelo limiar e pela verificação da base GDB. Já, em 5.7(b), o mesmo US, fora da zona de exclusão, recebe a mensagem *DenySpectrum* da base GDB, impossibilitando o uso da banda de radar. Por fim, a figura 5.7(c) ilustra um US dentro da zona de exclusão, impossibilitado de utilizar a banda de radar no momento de sensoreamento do espectro, não havendo troca de mensagens para o controle de admissão neste caso. Logo, com as mensagens definidas para o protocolo RRC, torna-se viável o uso do mecanismo proposto pelos dispositivos LTE. A seguir, serão vistos os detalhes acerca do controle de admissão, definido pela troca de mensagens de controle entre a eNB e a base de dados.





(a) US presente na zona temporal. Permissão de uso da banda de radar pelo controle de admissão.

(b) US presente na zona temporal. Uso da banda de radar negado pelo controle de admissão.



(c) US presente na zona de exclusão. Sensoreamento ED impossibilita o uso da banda de radar

Figura 5.7: Troca de mensagens RRC no mecanismo SAS Cooperativo.

## Controle de admissão

No Capítulo 3, o modelo proposto para o mecanismo cooperativo não leva em conta o acesso aleatório dos USs na banda de radar. A avaliação de desempenho se deu a partir de transmissões que eram iniciadas em ordem decrescente de distância entre US e radar. Através do exemplo da Figura 5.8, é ilustrada a operação do mecanismo cooperativo para o caso em que o US  $x$  utiliza a banda de radar de para sua transmissão. Neste caso, o US  $x$  encontra-se dentro da zona temporal, logo, pode se utilizar desta fatia do espectro para transmitir, enquanto o mesmo não estiver na direção do lóbulo principal. A interferência proporcionada pelo US  $x$  atualiza a interferência agregada, expandindo a zona de exclusão. A partir disso, a nova região que engloba a zona de exclusão acaba por abranger o US  $y$ , que se encontra mais próximo do radar, e que já possuía permissão de acesso à banda. Neste caso, a interferência agregada irá ultrapassar o limiar de interferência enquanto os USs  $x$  e  $y$  estiverem transmitindo simultaneamente. Para que este cenário possa ser evitado, é necessário um controle de admissão que proíba uma transmissão que venha a impactar USs que já estejam transmitindo na banda de radar. Para isto, se faz necessária, após a primeira verificação do limiar de referência utilizado, uma nova verificação da interferência agregada, caso o US que realizou a primeira verificação tenha permissão para transmitir na banda de radar.

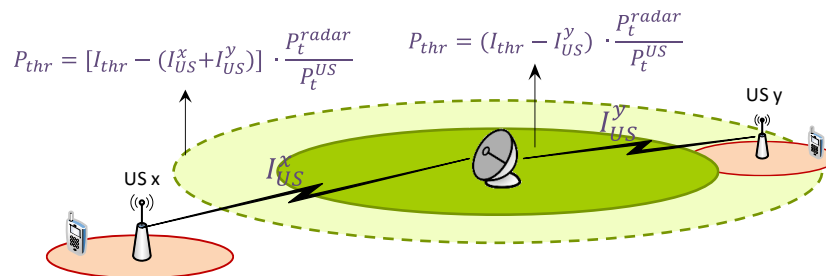


Figura 5.8: Exemplo - problema da atualização do limiar. US  $y$  é inserido na zona de exclusão para o novo limiar calculado, a partir do uso do espectro pelo US  $x$ .

O fluxograma da Figura 5.9 ilustra o comportamento do US para o controle de admissão em conjunto com a base de dados. Inicialmente, o sensoreamento do espectro é realizado para o mecanismo de *energy detection*, a partir da comparação com o limiar dinâmico. Caso o canal esteja livre, uma mensagem RRC do tipo *VerifySpectrum* é enviada para a base de dados. O US espera até que uma resposta seja obtida. Caso o US receba uma mensagem do tipo *AllowSpectrum*, o US inicia a transmissão pela banda de radar, realizando a mesma verificação novamente no próximo *subframe*, após um TTI. Na Figura 5.10, a base de dados, inicialmente,

aguarda o recebimento de uma mensagem do tipo *VerifySpectrum*. A partir disso, a base de dados coleta as informações de posição do US, potência de transmissão e ganho da antena para realizar o cálculo da interferência a ser provocada pelo US na banda de radar. O valor de interferência considerado é o de pior caso, em que eNB e UE estão transmitindo dados simultaneamente nos canais de *downlink* e *uplink*, respectivamente. O cálculo realizado pela base de dados leva em conta um modelo de propagação, alimentado pelas medições de potência recebida do sensoriamento realizado pelos USs. Com o valor de interferência, este é somado à variável que guarda a interferência de todos os USs transmitindo atualmente na banda de radar. A partir disso, uma nova verificação é realizada, comparando o valor de  $IntAgg + IntUS$  com o  $I_{thr}$  do radar. Para  $I_{thr} > IntAgg + IntUS$ , a base de dados permite o uso da banda de radar para o US em questão, enviando a mensagem do tipo *AllowSpectrum*. Caso contrário, quando  $I_{thr} > IntAgg + IntUS$ , significa que a transmissão proveniente da eNB e UE irá ultrapassar o limiar de interferência, indicando o cenário anterior, em que um ou mais USs estarão inseridos na zona de exclusão. Neste caso, a base de dados envia uma mensagem do tipo *DenySpectrum* ao US, impossibilitando que o mesmo utilize a banda de radar durante um TTI. Através do mecanismo de controle de admissão proposto, qualquer tipo de transmissão proibitiva na banda de radar é prevenido, complementando o mecanismo cooperativo que atua na prevenção através do limiar dinâmico.

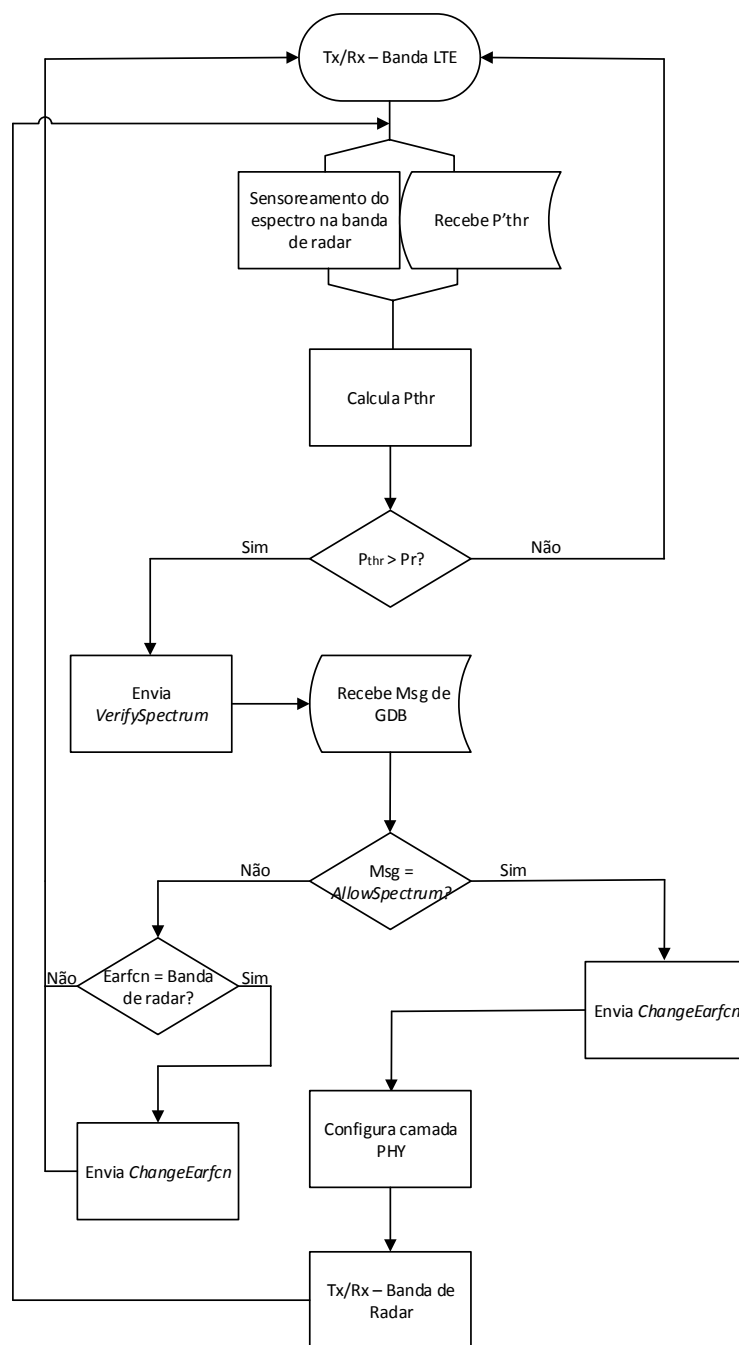


Figura 5.9: Fluxograma esquemático - Operação do controle de admissão pelo US.

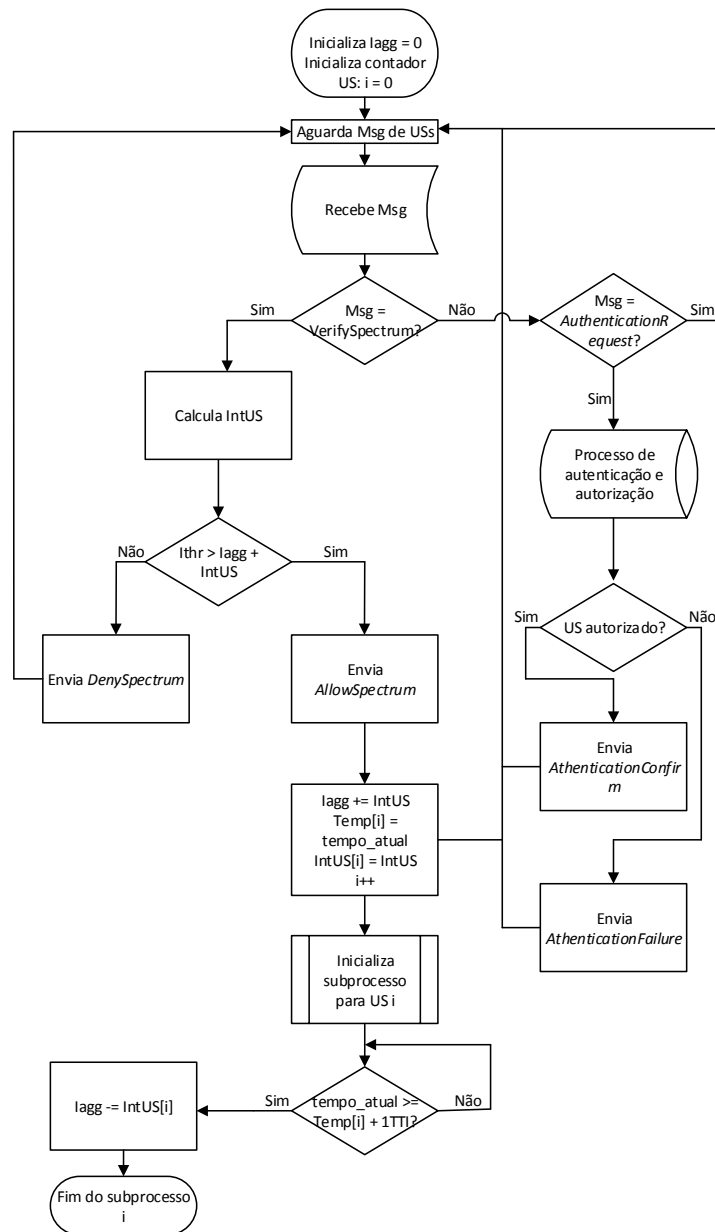


Figura 5.10: Fluxograma esquemático - Operação do controle de admissão pela GDB.

## 5.2.2 Avaliação de Desempenho com o simulador de redes ns-3

A avaliação de desempenho realizada com o simulador de redes ns-3 tem como premissa avaliar o ganho obtido pelo mecanismo DSA cooperativo quando comparado com os mecanismos propostos na literatura sob a perspectiva do tráfego gerado pelos UEs, de forma análoga à análise de desempenho realizada na Seção 5.1. Além da

avaliação de desempenho nos dispositivos LTE, será realizada a análise do impacto das transmissões secundárias no sistema de radar, a partir da coleta das métricas de porcentagem de tempo em que a interferência se mantém acima do limiar -107dBm e o maior nível de interferência agregada provocada para cada um dos mecanismos DSA implementados.

### **Ambiente de simulação**

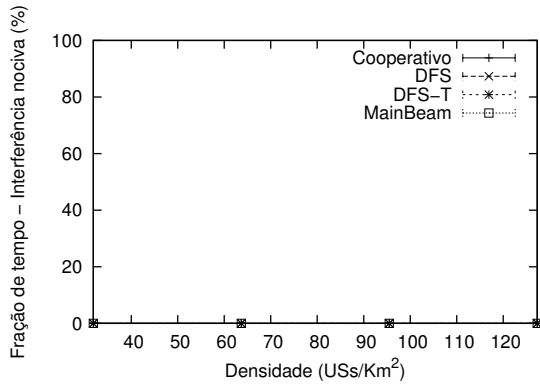
O ambiente de simulação utilizado no mecanismo cooperativo é análogo ao ambiente proposto na avaliação da Seção 5.1, para que haja justiça na comparação entre o desempenho dos mecanismos. A avaliação no impacto dos sistemas de radar também foi realizada a partir deste ambiente. Foram consideradas as regiões de cobertura de 100m e de 300m raio, com 4 femtocélulas e 4 UEs da macrocélula instanciados na primeira região, e 36 femtocélulas e 36 UEs da macrocélula instanciados na segunda região, totalizando a mesma densidade de  $127 \text{ femtocélulas}/\text{Km}^2$  em cada um dos casos.

Busca-se avaliar o desempenho assumindo que o mecanismo cooperativo esteja em seu estado estacionário, com os USs devidamente sincronizados com o radar, a partir do sensoriamento inicial realizado pelos mesmos. O período de sensoriamento se dá a cada TTI, ou seja, em intervalos de 1ms, as operações do mecanismo cooperativo, atrelados com o controle de admissão, se repetem para a verificação de disponibilidade do espectro.

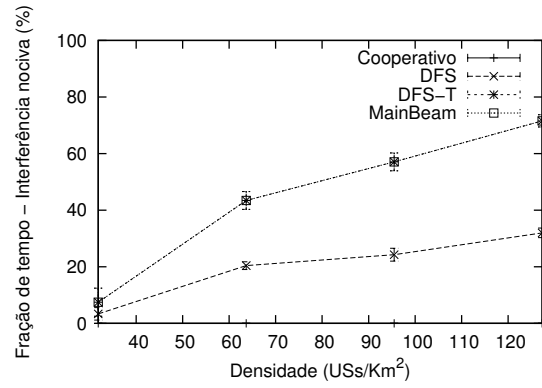
### **Resultados**

Para a região com 100m de raio de cobertura, a Figura 5.12 mostra os resultados coletados para este ambiente de simulação. Os Gráficos 5.11(a) e 5.11(b) mostram o percentual de tempo em que há interferência agregada acima do limiar para cada mecanismo, com os USs inseridos na zona 1 e na distância em que metade da região de cobertura encontra-se dentro da zona 1 e a outra metade dentro da zona 2, respectivamente, variando a densidade de HeNBs dentro da região delimitada pelo raio de 100m, até o valor máximo de  $127 \text{ femtocélulas}/\text{km}^2$ . Os resultados mostram que, para todos os USs inseridos na zona 1, nenhum mecanismo ultrapassou o limiar de interferência, como esperado, devido ao uso proibitivo do espectro dentro da zona de exclusão. Já na Figura 5.11(b), todos os mecanismos ultrapassaram o limiar de interferência, exceto o mecanismo cooperativo proposto, atingindo um máximo de 77% do tempo para os mecanismos DFS-T e *MainBeam*. O DFS, pela troca definitiva de canal realizada na zona 2, ainda consegue causar interferências nocivas ao radar, porém, atingindo um percentual máximo de, aproximadamente 35% do tempo. Para a densidade máxima, os resultados de vazão agregada podem ser

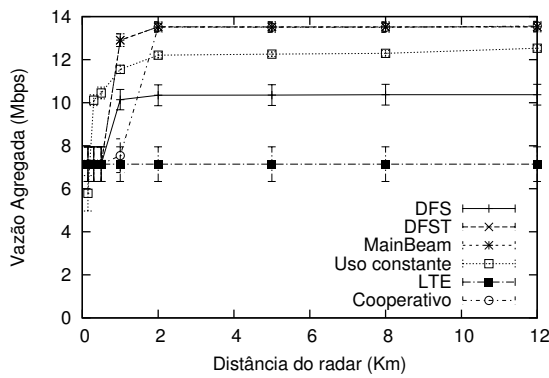
vistos nos Gráficos 5.11(c) e 5.11(d). Para manter a interferência agregada abaixo do limiar, o mecanismo cooperativo mantém sua vazão agregada proporcional à vazão da banda LTE para distâncias muito próximas da zona de exclusão, através da adaptação do limiar que, conseqüentemente, envolve os secundários presentes na zona 2. A partir de 2km, o mecanismo cooperativo alcança o ganho obtido pelo DFS-T e *MainBeam*, porém, garantindo que a interferência agregada não ultrapasse o limiar. A Figura 5.12(a) indica o resultado do percentual de tempo acima do limiar para a distância de 100km do radar, mantendo todos os USs dentro da zona 2, e provando que o mecanismo cooperativo consegue deixar em todo tempo de simulação a interferência agregada abaixo do limiar. Para esta distância, o *MainBeam* também garante uma interferência abaixo do limiar, e vazão agregada das Figuras 5.12(c) e 5.12(d) evidenciam o comportamento similar destes dois mecanismos dentro da zona temporal. No entanto, a partir de 300km, o mecanismo cooperativo volta a ter o ganho de vazão dos mecanismos DFS-T e DFS na zona espacial, mantendo o nível de interferência abaixo do limiar, como mostra a Figura 5.12(b), a um distância de 200km do radar, o que não é garantido para os mecanismos DFS e DFS-T. O *MainBeam* mantém seu comportamento estável e sem interferência nociva para todos os valores de densidade, no entanto, o mecanismo cooperativo oferece um ganho superior na vazão, para distâncias acima de 300km.



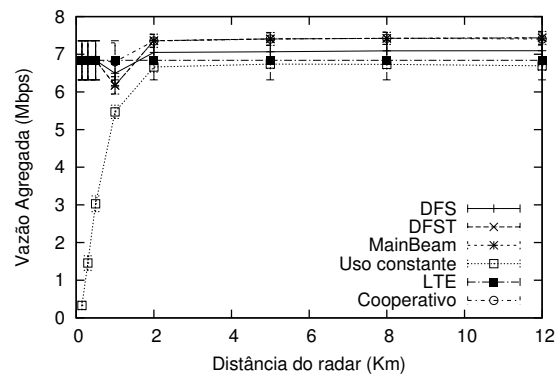
(a) Percentual de tempo acima do limiar de interferência - Zona 1



(b) Percentual de tempo acima do limiar de interferência - Zonas 1 e 2



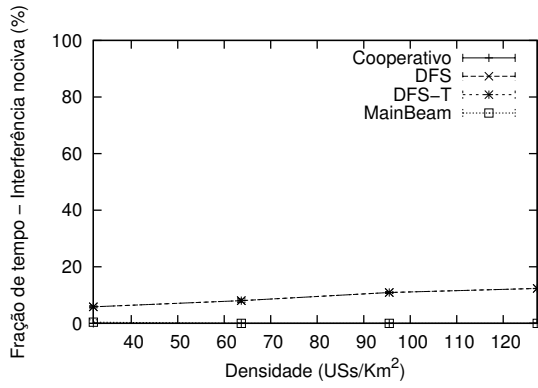
(c) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 1 e 2



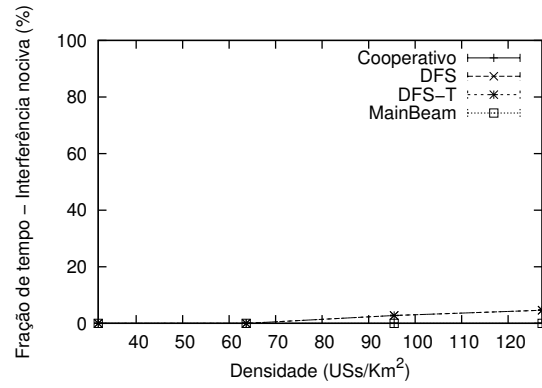
(d) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 1 e 2

Figura 5.11: Porcentagem de tempo em que a interferência ultrapassa o limiar e vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, para as zonas 1 e 2 - 100m de cobertura.

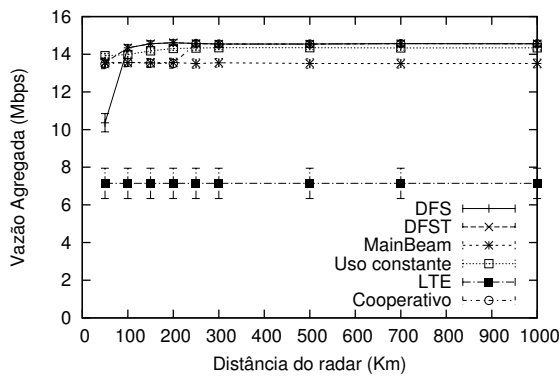




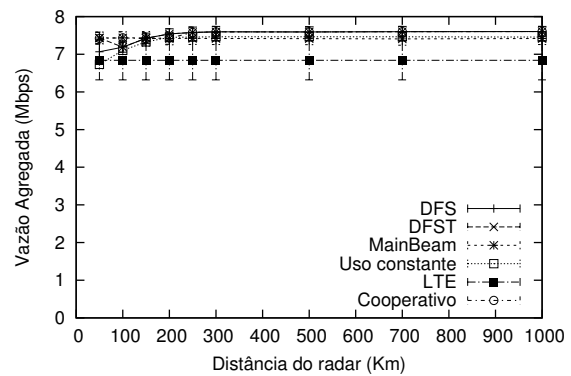
(a) Percentual de tempo acima do limiar de interferência - Zona 2



(b) Percentual de tempo acima do limiar de interferência - Zona 3



(c) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 2 e 3

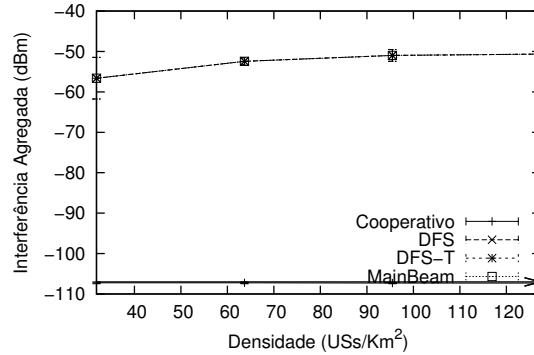


(d) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 2 e 3

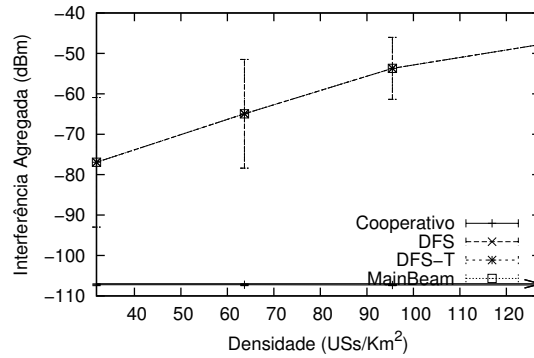
Figura 5.12: Porcentagem de tempo em que a interferência ultrapassa o limiar e vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, para as zonas 2 e 3 - 100m de cobertura.

Através dos gráficos acima, pode-se constatar que o mecanismo cooperativo mantém o ganho na vazão agregada, garantindo que a interferência causada pelos USs não venha a degradar o radar durante todo o tempo de transmissão, até uma densidade de 127 *femtocélulas/km²*, para até 100m de distância da macrocélula. A Figura 5.13 mostra os resultados para os maiores níveis de interferência agregada alcançados para cada densidade em cada um dos mecanismos DSA. Pode ser visto que, em todos os casos, os mecanismos DFS e DFS-T ultrapassaram o limiar de  $-107$  dBm, sendo que o *MainBeam* permaneceu abaixo apenas no cenário da zona 3, para todos os valores de densidade. O comportamento de utilização temporal do espectro para o *MainBeam* na zona 3 contribuiu para o resultado, no entanto, o mecanismo cooperativo manteve a qualidade de uso dos mecanismos DFS e DFS-T para os USs, conforme visto nos Gráficos 5.12(c) e 5.12(d), sem ultrapassar o limiar estipulado, o que torna a interferência agregada superior ao *MainBeam* e, ao mesmo tempo, abaixo do limiar estipulado. Pelo comportamento da interferência agregada

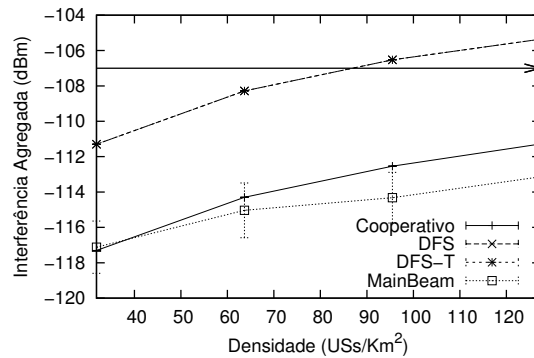
nos Gráficos 5.13(a) e 5.13(b), o mecanismo cooperativo obteve comportamento análogo aos resultados obtidos na Seção 3.6.2, garantindo que a interferência agregada esteja abaixo do limiar para todas as densidades de USs.



(a) Interferência agregada - Zonas 1 e 2



(b) Interferência agregada - Zona 2

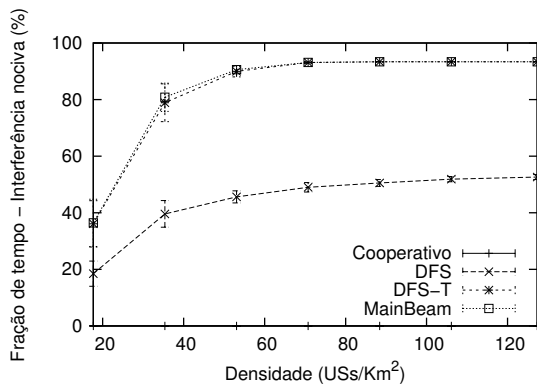


(c) Interferência agregada - Zona 3

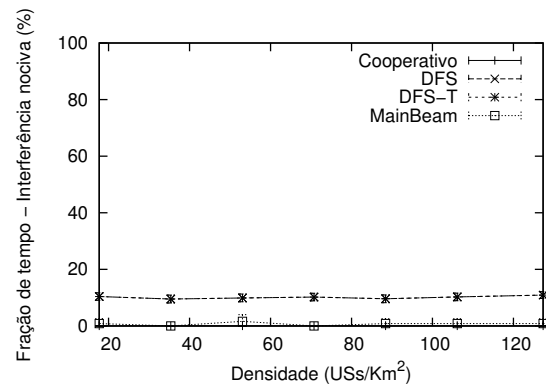
Figura 5.13: Níveis de pico da interferência agregada no sistema de radar para cada densidade de USs - 100m de cobertura.

A partir dos resultados obtidos para o cenário de 300m de cobertura, as Figuras 5.14(a) e 5.14(b) mostram o mesmo comportamento na evolução da porcentagem de tempo em que a interferência permanece acima do limiar para as zonas 1 e 2.

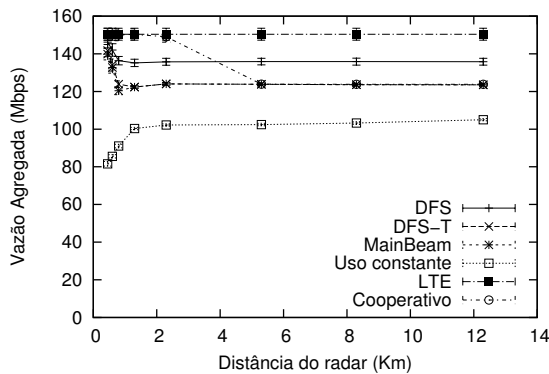
No entanto, devido ao aumento na quantidade de USs transmitindo na área de cobertura de 300m de raio, a porcentagem de tempo obteve um aumento significativo, ultrapassando os 80% nos mecanismos DFS-T e *MainBeam*. O mecanismo cooperativo se manteve com 0% em todos os valores densidade. Da mesma forma que o cenário anterior, a vazão agregada do mecanismo cooperativo se adapta de acordo com o nível de interferência. Para distâncias acima de 6km, com todos os USs já inseridos na zona 2, inicia-se o uso temporal da banda de radar, evidenciado pelo comportamento da vazão. Para distâncias inferiores, o método cooperativo mantém a maior parte dos USs na banda LTE tradicional.



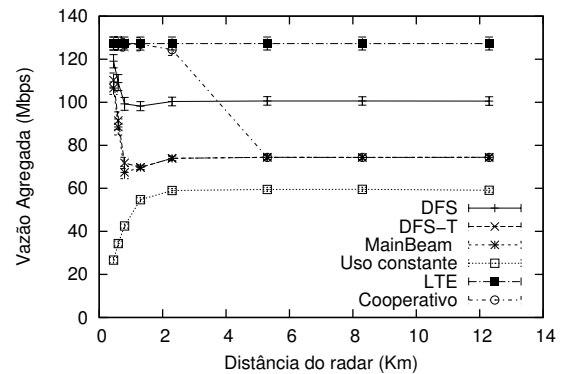
(a) Percentual de tempo acima do limiar de interferência - Zonas 1 e 2



(b) Percentual de tempo acima do limiar de interferência - Zona 2



(c) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 1 e 2

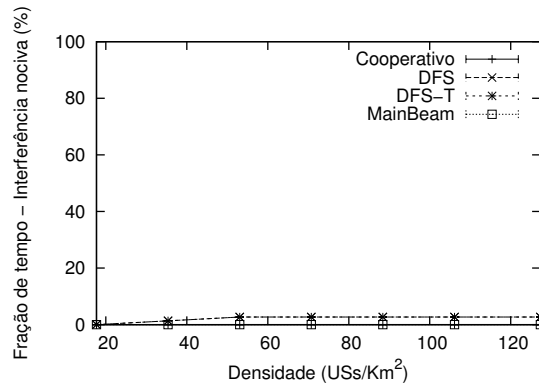


(d) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 1 e 2

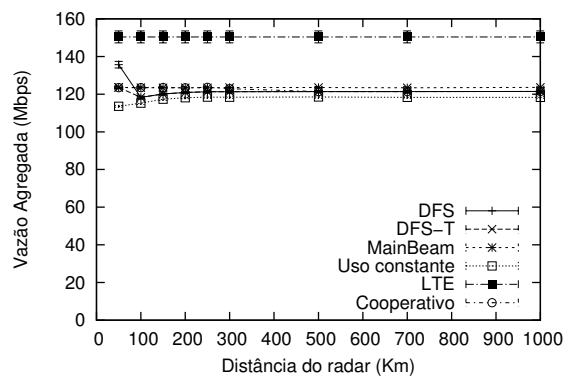
Figura 5.14: Porcentagem de tempo em que a interferência ultrapassa o limiar e vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, para as zonas 1 e 2 - 300m de cobertura.

A Figura 5.15 mostra os resultados obtidos para as distâncias em que os nós se encontram nas zonas 2 e 3. Há redução na porcentagem de tempo de interferência nociva devido às distâncias superiores e, no entanto, um aumento pouco significativo na vazão agregada. Contudo, os resultados da Figura 5.16 justificam o uso da banda de radar. O mecanismo cooperativo consegue alcançar o ganho de 10 vezes o valor

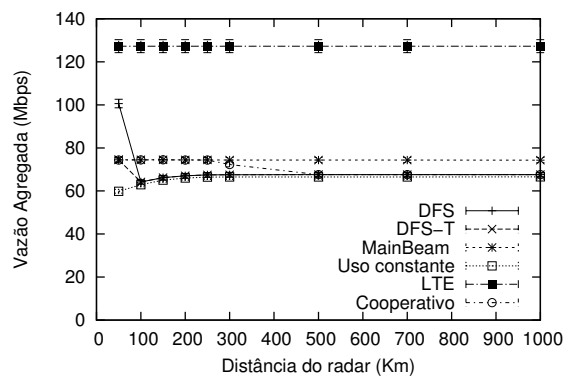
da vazão agregada do uso compartilhado da banda LTE para os usuários da macro-célula, para distâncias acima de 4km, em que os usuários *indoor* passam a utilizar, na maior parte do tempo, a banda de radar, gerando o ganho evidenciado pelo uso temporal e espacial do espectro obtido pelo DFS-T, garantindo que a interferência agregada se mantenha abaixo do limiar estipulado.



(a) Percentual de tempo acima do limiar de interferência - Zona 3

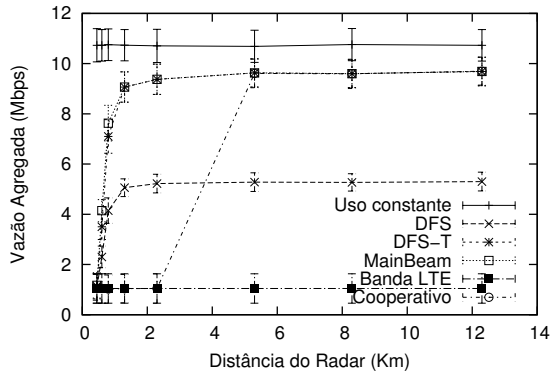


(b) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 2 e 3

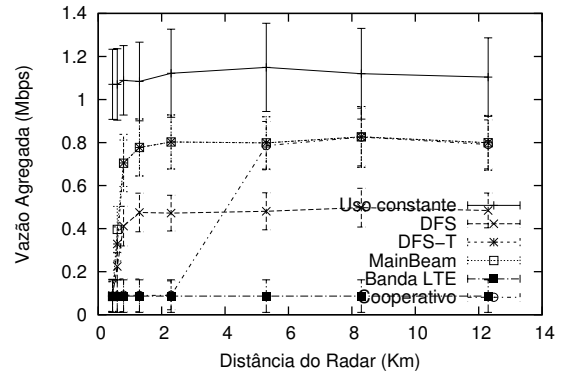


(c) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 2 e 3

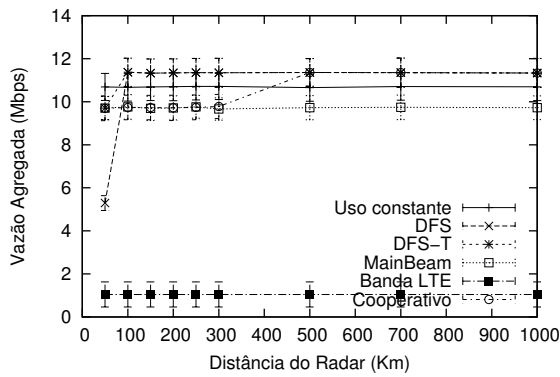
Figura 5.15: Porcentagem de tempo em que a interferência ultrapassa o limiar e vazão agregada do tráfego TCP proveniente dos usuários das femtocélulas, para as zonas 2 e 3 - 300m de cobertura.



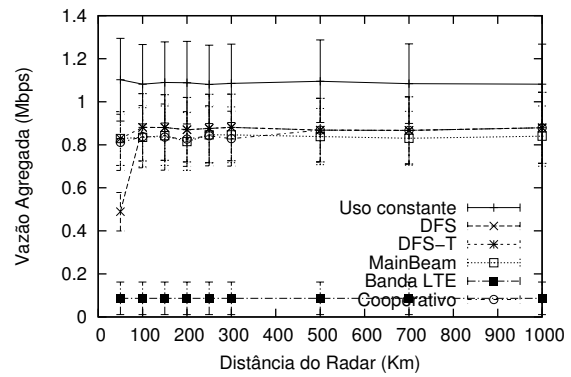
(a) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 1 e 2



(b) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 1 e 2



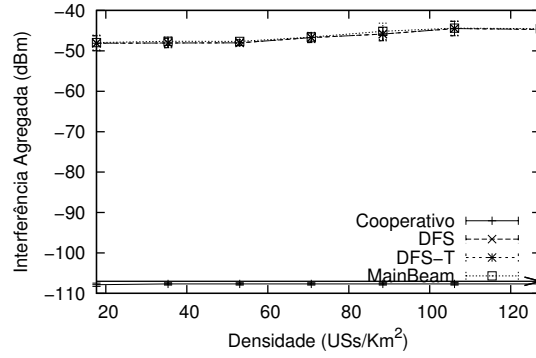
(c) Vazão no canal de *downlink* - Zonas 2 e 3



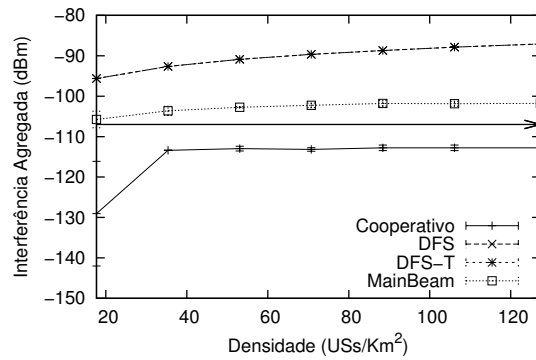
(d) Vazão no canal de *uplink* - Zonas 2 e 3

Figura 5.16: Vazão agregada do tráfego TCP de UEs associados a macrocelula, incluindo o mecanismo cooperativo - 300m de cobertura.

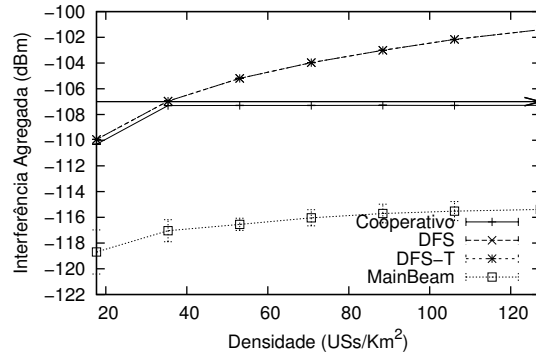
Por fim, os maiores níveis de interferência agregada alcançados neste cenário são ilustrados na Figura 5.17. Pode-se verificar que o mecanismo cooperativo proposto garante seu nível próximo ao limiar. Com o aumento na densidade, para cada uma das zonas de operação, o nível de interferência agregada aumenta até alcançar um valor próximo do limiar, impedindo que uma quantidade massiva de USs utilizem a banda de radar a ponto de tornar a interferência nociva ao primário. Para todos os mecanismos da literatura, o nível de interferência se manteve sempre acima do limiar, exceto para o mecanismo *MainBeam* operando na zona 3, através de seu uso temporal do espectro.



(a) Interferência agregada - Zonas 1 e 2



(b) Interferência agregada - Zona 2



(c) Interferência agregada - Zona 3

Figura 5.17: Níveis de pico da interferência agregada no sistema de radar para cada densidade de USs - 300m de cobertura.

### 5.3 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os detalhes de implementação dos mecanismos DSA expostos na literatura para acesso às bandas de radar. Os mecanismos DFS, DFS-T e *MainBeam* foram implementados nos dispositivos LTE, com intuito de se comparar o desempenho obtido pelos usuários das femtocélulas e macrocélula

quando comparados com o uso constante das bandas de radar e o compartilhamento da banda LTE. Logo em seguida, foi proposto o mecanismo de acesso dinâmico ao espectro em redes LTE, denominado de SAS segundo o FCC, que se utiliza dos conceitos de limiar dinâmico e cooperação com o primário definidos no mecanismo cooperativo. Além disso, foi definido um mecanismo de controle de admissão baseado em uma base de dados, denominada *Geolocation database*, que busca controlar o uso aleatório das bandas de radar por múltiplos secundários, evitando que o mecanismo provoque interrupções de transmissões em andamento na banda de radar ou que possa causar eventuais interferências nocivas ao primário.

Dada a análise inicial realizada somente com os mecanismos DSA propostos na literatura, pode-se concluir, a partir dos resultados obtidos, que o mecanismo capaz de gerar um maior ganho na vazão de dados é aquele que se utiliza das oportunidades temporais na zona 2 e espaciais na zona 3, como o DFS-T. No entanto, para o raio de cobertura de 300m, o resultado obtido foi o oposto, sob a perspectiva do tráfego dos usuários *indoor*, dado o ganho na vazão de dados da banda LTE para distâncias maiores que 200m da macrocélula. No caso dos usuários *outdoor*, o ganho da vazão obtido pelo DFS-T se manteve próximo ao do uso constante da banda de radar, mantendo uma qualidade na rede 4G superior ao uso da banda LTE convencional.

Após a análise de desempenho dos mecanismos da literatura, o mecanismo proposto foi avaliado a partir da comparação com os mecanismos anteriores. Além da análise de desempenho dos usuários secundários, foi verificado o impacto causado pelas transmissões secundárias no sistema de radar. Os resultados mostraram que, o único mecanismo capaz de manter a interferência abaixo do limiar estipulado pela UIT, é o cooperativo, com todos os outros extrapolando a interferência agregada acima do limiar. Além disso, o mecanismo cooperativo manteve o ganho proporcionado pelo DFS-T na vazão de dados dos usuários *indoor*, se utilizando das oportunidades de uso da banda de radar sem causar interferências nocivas ao primário. Com isso, os resultados expostos neste capítulo ratificam o comportamento mostrado no Capítulo 3, quanto à função do limiar dinâmico em manter o limiar de referência proporcional ao nível de interferência agregada sofrida pelos sistemas de radar, em um ambiente realista de uso oportunista de bandas licenciadas, frente a atual demanda de uso dos recursos de acesso ao meio sem fio por redes domésticas.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

O acesso dinâmico e oportunista nas faixas licenciadas do espectro, através de tecnologias baseadas nos conceitos de rádios cognitivos, têm o potencial de solucionar o problema de escassez de espectro, que surge diante do cenário atual de demanda massiva no uso dos recursos do meio sem fio, fruto da ascensão e popularização das tecnologias de redes sem fio, como o padrão IEEE 802.11 e as redes celulares de terceira e quarta geração. No entanto, diversos desafios estão atrelados ao uso oportunista das faixas licenciadas, principalmente o impacto causado pelas transmissões secundárias nos serviços disponibilizados aos usuários primários. Além disso, a qualidade do canal e a frequência com que surgem as oportunidades de transmissões secundárias, são fatores imprescindíveis para que o uso oportunista destes recursos seja vantajoso para os usuários secundários.

Neste sentido, a primeira contribuição desta dissertação foi o estudo acerca das oportunidades de uso dinâmico das faixas licenciadas utilizadas por sistemas de radar. O estudo evidenciou as oportunidades temporais e espaciais que surgem em tais bandas, diante do comportamento dos sistemas de radar do tipo monostático, que podem ser exploradas por mecanismos DSA próprios para a utilização destas bandas. Foram levantados os principais mecanismos propostos na literatura, baseados em sensoreamento do espectro, no qual se mostrou robusta a técnica de escuta do meio por detecção de energia. Além disso, estudos atuais acerca do uso de uma base de dados para acesso à faixas licenciadas mostraram que tal método, possui características complementares ao sensoreamento do espectro em bandas de radar, através da distribuição das características dos sistemas e controle no uso do meio por múltiplos secundários. Com isso, foram estudados os mecanismos DFS, DFS-T e *MainBeam*, e investigados os principais problemas ainda não resolvidos à respeito do acesso dinâmico ao espectro em bandas de radar. São eles: a interferência agregada proporcionada por múltiplos secundários e técnicas de uso oportunista bastante restritivas.

Levando em consideração os desafios enfrentados pelos atuais mecanismos, este



trabalho propôs um mecanismo cooperativo DSA, em que se considera a troca de informações entre primários e secundários para o uso seguro e eficiente da banda licenciada. O mecanismo consiste no envio das informações relacionadas à interferência percebida pelo radar para os secundários que utilizam esta fatia do espectro, com objetivo destes adaptarem seus *thresholds* de referência levando em conta a informação recebida pelo primário. A contribuição do mecanismo cooperativo pôde ser evidenciada através da implementação dos mecanismos da literatura e o proposto neste trabalho, através de um simulador próprio em TCL, do qual foram extraídos os resultados de interferência agregada no radar para cada um dos mecanismos, e verificada a eficiência no uso da banda de radar por parte do mecanismo cooperativo, mantendo a interferência abaixo do limiar estipulado. Além disso, foram verificadas as oportunidades de uso da banda de radar, a partir do percentual de USs presentes em cada uma das zonas de operação, constatando que, para baixas densidades, o mecanismo obteve o comportamento menos restritivo dentre todos no uso da faixa licenciada do radar.

Dados os resultados obtidos no ambiente gerado pelo simulador próprio, a partir do ambiente controlado quanto ao uso da faixa licenciada do radar para transmissões secundárias, o mecanismo cooperativo foi inserido no contexto das redes de quarta geração heterogêneas, em que células domésticas, denominadas de HeNBs, que atendem a demanda por recursos de acesso de usuários *indoor*, pudessem usufruir dos espaços em branco do espectro para suas transmissões, evitando interferências nocivas aos usuários da macrocélula (MeNB). Com isso, foi desenvolvido no simulador de eventos discretos ns-3, um modelo de acesso ao meio na banda de radar, constituído pelo comportamento de uso do espectro por sistemas de radar monostáticos, cujos parâmetros podem ser configurados de acordo com as especificações técnicas extraídas da UIT. Neste sentido, o trabalho proposto promove uma terceira contribuição, modelando no ns-3 o uso da banda de radar, a partir da interferência gerada pelas transmissões do radar nos USs e vice-versa. O modelo foi avaliado, levando em conta as características de operação de um radar meteorológico, operando na banda C, e cujo comportamento foi validado dentro do esperado a partir dos resultados obtidos pelo simulador, enquanto uma femtocélula utilizava a banda de radar para transmitir dados ao UE associado.

A quarta contribuição a ser destacada neste trabalho é o estudo acerca dos ganhos obtidos pelos dispositivos LTE, inseridos no contexto de redes heterogêneas, que utilizaram a banda de radar para a transmissão de um tráfego TCP gerado entre os UEs das femtocélulas e um nó remoto na rede PDN, quando comparado com os resultados de vazão obtidos no uso da banda LTE convencional. Pôde-se verificar que, para um ambiente definido por uma macrocélula com 6 setores, e múltiplas femtocélulas distribuídas em sua área de cobertura, para aquelas que se

concentram em uma região delimitada por um raio de até 200m de alcance, o uso da banda de radar se torna bastante vantajosa para os usuários *indoor*, enquanto que, para alcances maiores, a banda LTE provê uma maior vazão de dados que a banda do radar. No entanto, foi visto que, quanto maior a área de cobertura para uma mesma densidade de femtocélulas e usuários, os UEs *outdoor* obtiveram um baixo desempenho de suas vazões, chegando próximas de zero, devido à interferência do tipo *cross-tier*. Já, com o uso da banda de radar pelas femtocélulas, os usuários da macrocélula obtiveram uma vazão consideravelmente acima da banda LTE, chegando a 12Mbps para a mais alta densidade, e com a vazão agregada se comportando de maneira crescente. Logo, o uso da banda de radar beneficia tanto usuários *outdoor* quanto *indoor*, aumentando a eficiência no uso do espectro.

Por fim, como contribuição final, foram avaliados os mecanismos DSA definidos na literatura nos dispositivos LTE e proposto a implementação do mecanismo cooperativo em redes LTE, a partir das alterações no protocolo RRC e uso de uma base de dados *geolocation* para o controle de admissão no uso do espectro. Os resultados mostraram que o uso oportunista por mecanismos DSA que usufruem das oportunidades temporais e espaciais geram um ganho considerável na vazão dos dados dos usuários *indoor*, para os cenários em que a área de cobertura da macrocélula atinge um raio de até 200m de distância. Para distâncias maiores, as femtocélulas sofrem uma redução na vazão, devido ao ganho obtido pela banda de radar em tais distâncias, no entanto, o resultado não impacta a qualidade da vazão, permanecendo alta. O diferencial se encontra no ganho obtido pelos usuários da macrocélula, que permanecem com uma vazão mais alta que a banda LTE compartilhada, para os mecanismos DSA. Em todos os casos, o mecanismo cooperativo proposto manteve o ganho gerado pelo mecanismo DFS-T, que usufrui das oportunidades temporais e espaciais, além de impedir que a interferência agregada ultrapasse o limiar estipulado, enquanto que os outros mecanismos afetam, em uma porcentagem significativa do tempo, os sistemas de radar, degradando os serviços prestados pelo primário. Neste sentido, pôde-se constatar a eficiência no uso de um mecanismo que considera os impactos da interferência proporcionada por múltiplos secundários nos usuários primários, levando em conta o ponto de vista dos sistemas de radar e dos USs.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, existem diversos caminhos a serem explorados, a partir das contribuições obtidas. Dentre elas, uma proposta de integração do modelo de acesso ao meio do radar para as outras tecnologias de redes sem fio implementadas no ns-3, como as redes IEEE 802.11, WiMAX e os padrões adotados em redes veiculares (VANETs). Além disso, visando complementar o modelo desenvolvido, expandir o

mesmo para outros tipos de radares, que possuem padrões de escaneamento mais complexos, a fim de se verificar os resultados em cada um destes tipos, avaliando àqueles que trazem maiores ganhos aos secundários.

Neste trabalho, a análise de desempenho nas redes LTE se limitou apenas aos cenários constituídos por uma macrocélula de 6 setores. A análise pode ser expandida para outras formas de setorização da macrocélula, a fim de se verificar o impacto gerado nas femtocélulas e comparando com o uso da banda de radar para a vazão dos dados de usuários *indoor*.

Além disso, pretende-se expandir a análise dos mecanismos DSA para cenários maiores, constituídos por múltiplas femtocélulas espalhadas em torno do radar, similar ao cenário implementado no simulador próprio, com um tempo de simulação igual ao período de rotação do radar. Como a duração da simulação das redes LTE começa a aumentar consideravelmente para quantidades de dispositivos instanciados maiores que os aqui utilizados, não foi possível coletar em tempo os resultados para este cenário.

A forma como foi abordado o uso dinâmico do espectro em redes LTE, levou em conta a utilização do protocolo RRC como suporte ao mecanismo DSA proposto. No entanto, uma forma de se atacar este problema pode ser explorado através dos algoritmos de escalonamento de recursos, implementados na camada MAC da eNB. Neste sentido, a alocação de banda poderia ser diferenciada por tráfego, levando em conta as informações da qualidade do canal a ser utilizado, e verificando se o mesmo atende às políticas de QoS definidas nos diferentes *bearers*. Neste caso, o simulador de redes ns-3 também pode ser aproveitado, visto que o mesmo implementa a camada MAC com o escalonador de recursos no módulo LTE. Além disso, o mecanismo cooperativo desenvolvido neste trabalho se baseou no uso de *beacons* por meio do radar para a atualização do limiar dinâmico de referência. Uma outra forma de se implementar esta funcionalidade seria na utilização de uma base de dados, que exerceria o papel de cooperação do UP. Neste caso, uma nova base de dados faria os cálculos de interferência, baseada nas posições dos USs em relação ao radar, e assim, atualizaria o limiar de acordo com a evolução da interferência agregada conhecida pela base. Tal proposta pode ser explorada em trabalhos futuros para se analisar o desempenho da mesma, comparando-a com os outros mecanismos.

Por fim, deseja-se realizar a análise de desempenho do uso dos recursos de rádio da banda de radar por diferentes aplicações, verificando quais tipos de tráfego podem ser usados, de maneira que o usuário final possa ter uma boa qualidade de experiência (QoE). Além disso, o ns-3 possui um modelo de perda por propagação que leva em conta obstáculos encontrados em ambientes domésticos, como paredes e obstruções, levando a uma perda do nível do sinal mais próximo do real. Como trabalhos futuros, é desejável utilizar este módulo, denominado de *Buildings Propagation Loss Model*,

e o modelo de desvanecimento do sinal em ambientes urbanos, no sentido de se criar ambientes de acesso sem fio mais realistas, avaliando o desempenho das bandas de radar em cenários *indoor* que levam em conta este modelo.

# Referências Bibliográficas

- [1] PAISANA, F., MIRANDA, P., MARCHETTI, N., et al. “Database-aided Sensing for Radar Bands”. In: *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 1–6, 2014.
- [2] DE SOUZA LIMA, C., PAISANA, F., FERREIRA DE REZENDE, J., et al. “A cooperative approach for dynamic spectrum access in radar bands”. In: *Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International*, pp. 1–5, Aug 2014. doi: 10.1109/ITS.2014.6947955.
- [3] STEFANIA SESIA, ISSAM TOUFIK, M. B. *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. 1st ed. , John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [4] CTTC. *The LENA ns-3 LTE Module Documentation*. 8 ed. , Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), January 2014.
- [5] 802.11. “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, IEEE Standard, 1999.
- [6] HAYKIN, S. “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”. In: *Journal on Selected Areas in Communications*, fev. 2005.
- [7] AKYILDIZ, I. F., LEE, W.-Y., VURAN, M. C., et al. “NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey”, *Computer Networks*, v. 50, n. 13, pp. 2127–2159, 2006. ISSN: 1389-1286. doi: 10.1016/j.comnet.2006.05.001.
- [8] ZHAO, Q., SADLER, B. M. “A Survey of Dynamic Spectrum Access: Signal Processing, Networking, and Regulatory Policy”, *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 79–89, maio 2007.
- [9] MITOLA, J. “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications”. In: *MoMuC '99: IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, pp. 3–10, nov. 1999.

- [10] MITOLA, J. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Tese de Doutorado, Royal Institute of Technology, maio 2000.
- [11] SHELLHAMMER, S., SADEK, A., ZHANG, W. “Technical challenges for cognitive radio in the TV white space spectrum”. In: *Information Theory and Applications Workshop, 2009*, pp. 323–333, Feb 2009. doi: 10.1109/ITA.2009.5044964.
- [12] FLORES, A., GUERRA, R., KNIGHTLY, E., et al. “IEEE 802.11af: a standard for TV white space spectrum sharing”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 51, n. 10, pp. 92–100, October 2013. ISSN: 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2013.6619571.
- [13] WANG, L., MCGEEHAN, J., WILLIAMS, C., et al. “Radar spectrum opportunities for cognitive communications transmission”. In: *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on*, pp. 1–6, 2008. doi: 10.1109/CROWNCOM.2008.4562496.
- [14] SARUTHIRATHANAWORAKUN, R., PEHA, J., CORREIA, L. “Opportunistic primary-secondary spectrum sharing with a rotating radar”. In: *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012 International Conference on*, pp. 1025–1030, 2012. doi: 10.1109/ICCNC.2012.6167362.
- [15] HAMID, M., BJRSELL, N. “Geo-location Spectrum Opportunities Database in Downlink Radar Bands for OFDM Based Cognitive Radios”. In: *IEEE Conference on Communication, Science And Information Engineering (CCSIE)*, pp. 39–43, 2011.
- [16] PAISANA, F., MARCHETTI, N., DASILVA, L. A. “Radar , TV and Cellular Bands : Which Spectrum Access Techniques for which Bands ?” *IEEE Communications Surveys & Tutorials, to appear*, 2014.
- [17] FCC. “Enabling Innovative Small Cell Use In 3.5 GHz Band NPRM & Order”, *Docket 12-148*, 2012.
- [18] TERCERO, M., SUNG, K. W., ZANDER, J. “Temporal Secondary Access Opportunities for WLAN in Radar Bands”. In: *14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 1–5, 2011.

- [19] LATKOSKI, P., KARAMACOSKI, J., GAVRILOVSKA, L. “Indoor broadband use of 2.7-2.9 GHz radar spectrum : Case of Macedonia”. In: *Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 589–593, 2012.
- [20] FCC FEDERAL COMMUNICATION COMISSION. “Code For Federal Regulations - Title 47 - Part 15 ”. set. 2014.  
<http://www.fcc.gov/encyclopedia/white-space-database-administration> - último acesso em 03/02/2015.
- [21] FCC. “Home | FCC.gov”. 2011. <http://www.fcc.gov> - último acesso em 3/11/2011.
- [22] ITU-R M.1638. “Characteristics of and protection criteria for sharing studies for radiolocation, aeronautical radionavigation and meteorological radars.” Recommendation ITU-R M.1638, 2003.
- [23] AXELL, E., LEUS, G., LARSSON, E., et al. “Spectrum Sensing for Cognitive Radio : State-of-the-Art and Recent Advances”, *Signal Processing Magazine, IEEE*, v. 29, n. 3, pp. 101–116, May 2012. ISSN: 1053-5888. doi: 10.1109/MSP.2012.2183771.
- [24] UNION, I. T. *Dynamic frequency selection in wireless access systems including radio local area networks for the purpose of protecting the radiodetermination service in the 5 GHz band*. 1st ed. , ITU-R Recommendations M.1652-1, may 2011.
- [25] IEEE. “Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications”. IEEE Standard 802.11h, 2003.
- [26] TERCERO, M., SUNG, K. W., ZANDER, J. “Temporal secondary access opportunities for WLAN in radar bands”. In: *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2011 14th International Symposium on*, pp. 1–5, 2011.
- [27] COTTON, M., DALKE, R. “Spectrum Occupancy Measurements of the 3550-3650 Megahertz Maritime Radar Band near San Diego, California”. NTIA Report TR-14-500, 2014.
- [28] JOHANN M. H. MAGALHÃES, P. R. G. “Proposta de um Mecanismo de Escalonamento em Dois Estágios para o Tráfego de Aplicações em Tempo Real para Redes LTE.” In: *32º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC 2014*, pp. 251–264, 2014.

- [29] FADOUA MHIRI, KAOUTHAR SETHOM, R. B. “A survey on interference management techniques in femtocell self-organizing networks”. In: *Journal of Network and Computer Applications*, pp. 58–65, 2011.
- [30] ns-3. “ns-3 Network Simulator”. 2015. Disponível em: [\url{http://www.nsnam.org/}](http://www.nsnam.org/)>. Último acesso em 26-abril-2015.
- [31] MEHLFÜHRER, C., COLOM COLOM IKUNO, J., ŠIMKO, M., et al. “The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011(1):29, 2011. doi: 10.1186/1687-6180-2011-29. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/1687-6180-2011-29>>.
- [32] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception*. Sp-65 ed. , 3GPP TS 36.101, September 2014.
- [33] DEATON, J. D., IRWIN, R. E., DASILVA, L. A. “Dynamic spectrum access in LTE-advanced networks”, *Physical Communication*, v. 10, n. 0, pp. 127 – 143, 2014. ISSN: 1874-4907. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phycom.2013.11.001>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490713000773>>.