



Rui Manuel de Jesus Luís

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

**Estudo de Desempenho de Protocolos
Distribuídos de Acesso ao Meio em Redes
de Rádio Cognitivo**

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores, pela Universidade Nova
de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Orientador : Rodolfo Oliveira, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Bernardo

Arguentes: Prof. Doutor Tiago Cardoso

Vogais: Prof. Doutor Rodolfo Oliveira

Prof. Doutor Pedro Amaral



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2014

Título

Copyright © Rui Manuel de Jesus Luís, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais...

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Rodolfo Oliveira pela excelente orientação prestada no decorrer desta dissertação e pela sua inconfundível qualidade como docente e pessoa. Demonstrou-se sempre disponível para me ajudar a resolver os problemas que surgiram e me esclarecer nas dúvidas que tive. Agradeço também a sua revisão pormenorizada desta dissertação.

Agradeço pelo apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, através dos projectos NEUF PTDC/EEA- TEL/120666/2010, ADIN PTDC/EEI-TEL/2990/2012 e MANY2COMWIN EXPL/EEI-TEL/0969/2013.

Quero agradecer aos docentes da área de telecomunicações pelo conhecimento que me foi transmitido e pelo bom ambiente vivido durante todo este curso.

Quero agradecer aos meus colegas Gonçalo Albino, Pedro Cândido, Fábio Viegas e Bruno Viana pelo convívio, apoio e diversão que me proporcionaram ao longo do curso.

Aos meus amigos Tiago Duarte e Nelson Duarte, quero agradecer-lhes o companheirismo ao longo da minha vida.

Agradeço à minha namorada, Sofia Olival, pela pessoa espectacular que é, pelo seu apoio, companheirismo e paciência.

Aos meus padrinhos e tio José Luís, agradeço o apoio, carinho e preocupação que demonstraram ao longo da minha vida.

Por último e mais importante, quero agradecer aos meus pais e irmãos pelo seu apoio incondicional.

A todos, obrigado ...

Sumário

As comunicações sem fios assumem hoje em dia um papel importante na sociedade. A sobreutilização do espectro rádio-eléctrico por parte das redes licenciadas limita o desenvolvimento de novos sistemas de comunicações sem fios. No entanto, a eficiência com que as redes licenciadas (ou primárias) utilizam o espectro rádio-eléctrico é muito baixa. Nesse sentido, algumas redes não licenciadas (ou secundárias) utilizam sistemas de rádio cognitivo para aumentar a eficiência com que o espectro é utilizado. Nos sistemas de rádio cognitivo é comum considerar que a ocupação das redes licenciadas observada pela rede secundária é praticamente igual para todos os nós. No entanto, existem factores que podem afectar diferenciadamente as transmissões da rede primária, introduzindo diferentes níveis de heterogeneidade na observação que os nós da rede secundária efectuem relativamente à actividade da rede primária.

Nesta dissertação propõe-se uma metodologia de análise de desempenho de protocolos de controlo de acesso ao meio em redes de rádio cognitivo. A metodologia inclui aspectos relacionados com o *sensing* espectral, a localização dos nós das redes secundária e primária e a ocorrência de fenómenos de propagação, de forma a obter cenários com diferentes níveis de heterogeneidade. Posto isto, o desempenho dos protocolos é caracterizado em diferentes cenários através de resultados obtidos por simulação. Os resultados indicam que o efeito da heterogeneidade tem um impacto negativo no desempenho dos protocolos, nomeadamente na métrica de maior importância, o débito útil. Este estudo conclui que a não consideração da heterogeneidade na avaliação do desempenho de protocolos MAC pode sobrestimar o desempenho das redes secundárias, nomeadamente em termos de débito útil.

Palavras Chave: Rádio cognitivo, Protocolos MAC, Heterogeneidade.

Abstract

Nowadays wireless communication plays an important role in society daily life. The overuse of the radio-electric spectrum by several licensed networks limits the development of new wireless communication systems. However, the spectrum's usage efficiency of the licensed networks (or primary networks) is very low. In that sense, some of the non-licensed networks (or secondary networks) use radio cognitive systems to increase the spectrum's usage efficiency. In cognitive radio systems it is common to consider that the occupation of the spectrum observed by secondary networks is the same for every non-licensed user. However, there are several effects that impact in the transmissions of the primary network, which causes heterogeneity in the observations of the channel activity gathered by the secondary users.

In this dissertation we propose a method to analyse the performance of MAC protocols in radio cognitive networks. The method includes several assumptions in terms of the spectrum sensing, the localization of the primary and secondary users and the propagation phenomena, in order to obtain several scenarios with different levels of heterogeneity. The performance of the protocols is characterized in different scenarios through simulation. The simulation results show that the level of heterogeneity causes a negative impact in the protocol's performance, namely in the throughput achieved by the secondary users. It is shown that by neglecting the heterogeneity, the performance of the protocols is overestimated.

Keywords: Radio cognitive, MAC Protocols, Heterogeneity.

Acrónimos

ACK *Acknowledgement*

AP *Access Point*

AWGN *Additive White Gaussian Noise*

CRAHN *Cognitive Radio Ad Hoc Network*

CR-ALOHA *Cognitive Radio-ALOHA*

CR-CSMA *Cognitive Radio-Carrier Sense Multiple Access*

CR-CSMA/CA *Cognitive Radio-Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

CSMA *Carrier Sense Multiple Access*

CSMA/CA *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

CSR *Carrier Sensing Range*

CTS *Clear-To-Send*

DIFS *Distributed Interframe Space*

DCF *Distributed Coordination Function*

EBS *Energy Based Sensing*

MAC *Medium Access Control*

OSI *Open Systems Interconnection*

PTS *Prepare-To-Sense*

QoS *Quality of Service*

RF *Radio Frequency*

RTS *Request-To-Send*

SAP *Secondary Access Point*

SIFS *Short Interframe Space*

SNR *Signal-to-Noise Ratio*

UHF *Ultra High Frequencies*

VHF *Very High Frequencies*

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Sumário	v
Abstract	vii
Acrónimos	ix
1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objectivos e Contribuições	4
1.3.1 Objectivos	4
1.3.2 Contribuições	4
1.4 Estrutura da Dissertação	5
2 Trabalho Relacionado	7
2.1 Conceitos básicos em Rádio Cógnitivo	7
2.1.1 <i>Spectrum Sensing</i>	8
2.1.2 <i>Spectrum Decision</i>	9
2.1.3 <i>Spectrum Sharing</i>	10
2.1.4 <i>Spectrum Mobility</i>	11
2.2 <i>Sensing</i> Espectral	12
2.3 Protocolos MAC distribuídos em Sistemas Multi-canal	15
2.4 Protocolos MAC distribuídos em Sistemas de Canal único	19
2.4.1 Protocolo A - <i>Single Stage of Contention</i>	20
2.4.2 Protocolo B - <i>Double Stage of Contention</i>	20
2.4.3 Protocolo C - <i>Double Stage with Reservation</i>	20
2.4.4 Protocolo <i>slotted ALOHA</i>	22
2.4.5 Protocolo CR-CSMA	25
2.4.6 Protocolo CR-CSMA/CA	27

3	Metodologia Aplicada	31
3.1	Descrição dos cenários	31
3.2	Comportamento dos PUs	39
3.3	Condições de propagação	39
3.4	<i>Framing</i> do protocolo de acesso dos SUs	40
3.4.1	CR-ALOHA	41
3.4.2	CR-CSMA	41
3.4.3	CR-CSMA/CA	42
3.5	<i>Spectrum Sensing</i>	42
4	Caracterização do desempenho	45
4.1	Caracterização	45
4.1.1	<i>slotted</i> CR-ALOHA	45
4.1.2	CR-CSMA	47
4.1.3	CR-CSMA/CA	50
4.1.4	Comparação dos protocolos num cenário homogéneo	52
4.2	Caracterização em cenários heterogéneos	58
4.2.1	<i>slotted</i> CR-ALOHA	58
4.2.2	CR-CSMA	63
4.2.3	CR-CSMA/CA	70
4.3	Diferentes filosofias de contenção para o protocolo CR-CSMA/CA	76
5	Conclusões	81
5.1	Trabalho Futuro	83
	Bibliografia	84
A	Implementação do protocolo Slotted CR-ALOHA	87
B	Implementação do protocolo CR-CSMA	101
C	Implementação do protocolo CR-CSMA/CA	121
D	Publicações	143

Lista de Figuras

2.1	Critérios em função de γ ($SNR = -5\text{dB}$) [LFO ⁺ 12a].	13
2.2	Critérios em função de γ ($SNR = 5\text{dB}$) [LFO ⁺ 12a].	14
2.3	Interferência causada à rede primária [LFO ⁺ 12b].	16
2.4	Seleção da sequência de canais [WH11].	18
2.5	Débito normalizado dos protocolos considerados para uma ocupação de primários igual a 30 % [LFO ⁺ 12b].	21
2.6	Topologia da rede [CYCMWC11].	22
2.7	Estrutura da trama [CYCMWC11].	23
3.1	Cenário homogêneo com 30 SUs.	33
3.2	Cenário heterogêneo de baixa dissemelhança com 30 SUs.	34
3.3	Cenário heterogêneo de média dissemelhança com 30 SUs.	35
3.4	Cenário heterogêneo de alta dissemelhança com 30 SUs.	36
3.5	Estrutura da trama no protocolo CR-ALOHA.	41
3.6	Estrutura da trama no protocolo CR-CSMA.	41
4.1	Débito obtido para caracterização do protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA.	47
4.2	Rácio de colisões protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA, $R_{col} = T_C/T_X$	48
4.3	Débito obtido para caracterização do protocolo CR-CSMA.	49
4.4	Rácio de colisões protocolo CR-CSMA, $R_{col} = T_C/T_X$	49
4.5	Débito obtido para caracterização do protocolo CR-CSMA/CA.	51
4.6	Débito útil dos três protocolos com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.	53
4.7	Período de colisões dos três protocolos com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.	54
4.8	Período de ocupação dos três protocolos com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.	55
4.9	Débito útil dos três protocolos com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.	56
4.10	Período de colisões dos três protocolos com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.	57

4.11	Período de ocupação dos três protocolos com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.	57
4.12	Débito do protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	59
4.13	Débito útil no protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	60
4.14	Período de colisões no protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	61
4.15	Período de ocupação da rede secundária para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	62
4.16	Débito do protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	62
4.17	Débito útil no protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	63
4.18	Período de colisões no protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	64
4.19	Período de ocupação no protocolo <i>slotted</i> CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	64
4.20	Débito do protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	65
4.21	Débito útil do protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	66
4.22	Período de colisões no protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	66
4.23	Período de ocupação no protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	67
4.24	Débito do protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	68
4.25	Débito útil do protocolo CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	68
4.26	Período de colisões no protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	69
4.27	Período de ocupação no protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	69
4.28	Débito do protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	70
4.29	Débito útil do protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	71
4.30	Período de colisões no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	72

4.31	Período de ocupação no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.	73
4.32	Débito do protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	74
4.33	Débito útil do protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	75
4.34	Período de colisões no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	75
4.35	Período de ocupação no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.	76
4.36	Débito útil obtido pelos três protocolos.	78
4.37	Período de colisões obtido pelos três protocolos.	79
4.38	Período de ocupação obtido pelos três protocolos.	80
A.1	Ciclo dos TPs em CR-ALOHA	99
A.2	Ciclo dos SUs em CR-ALOHA	100
B.1	Ciclo dos TPs em CR-CSMA	108
B.2	Ciclo dos SUs em CR-CSMA	120
C.1	Ciclo dos SUs	127
C.2	Ciclo do SAP	128

Lista de Tabelas

2.1	Comparação de protocolos descritos no capítulo: (1)CR-ALOHA; (2)CR-CSMA; (3)CR-CSMA/CA; (4) <i>Double Stage with Reservation</i> ; (5)Acesso estocástico.	29
3.1	Parâmetros do cenário homogéneo com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.	36
3.2	Parâmetros do cenário heterogéneo de baixa dissemelhança com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.	37
3.3	Parâmetros do cenário heterogéneo de média dissemelhança com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.	37
3.4	Parâmetros do cenário heterogéneo de alta dissemelhança com aproximadamente 10 % de ocupação da rede primária.	37
3.5	Parâmetros do cenário homogéneo com aproximadamente 31 % de ocupação da rede primária.	38
3.6	Parâmetros do cenário heterogéneo de baixa dissemelhança com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.	38
3.7	Parâmetros do cenário heterogéneo de média dissemelhança com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.	38
3.8	Parâmetros do cenário heterogéneo de alta dissemelhança com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.	39
3.9	Parâmetros de propagação.	40
4.1	Parâmetros de caracterização de <i>slotted</i> CR-ALOHA	46
4.2	Parâmetros de caracterização de CR-CSMA	48
4.3	Parâmetros de caracterização do protocolo CR-CSMA/CA	50
4.4	Duração dos pacotes do protocolo CR-CSMA/CA	51
4.5	Ocupação média observada pela rede secundária proveniente da rede primária.	78
4.6	Duração dos pacotes nos três protocolos	78

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

As comunicações sem fios assumem hoje em dia um papel fundamental no funcionamento da sociedade moderna. Estas permitem comunicação sem existência de interligação física (por exemplos cabos eléctricos ou fibra óptica) sendo evidentes as suas vantagens no que diz respeito à mobilidade dos nós. Com a evolução observada nas duas últimas décadas nas comunicações sem fios, o espectro rádio-eléctrico foi sendo cada vez mais utilizado, sendo hoje em dia um recurso sobreutilizado, o que limita o lançamento e a exploração de novos sistemas de comunicação sem fios. Este facto exige uma gestão muito eficiente do espectro disponível, o que na verdade não se verifica atualmente.

As redes licenciadas, denominadas redes primárias, utilizam uma parte significativa do espectro disponível. Contudo, não o utilizam de forma eficiente, pois as bandas são atribuídas de forma estática, sendo utilizadas em exclusivo pelos rádios que constituem a rede primária. O rádio cognitivo é apontado como uma tecnologia capaz de melhorar a eficiência de gestão de utilização do espectro. No conceito de redes de rádio cognitivo, as redes secundárias, não licenciadas, aproveitam de uma forma oportunística o espectro não utilizado, tanto a nível temporal como espacial. Porém, é necessário que as redes licenciadas sejam protegidas da interferência provocada pelos nós secundários. Através do rádio cognitivo, as redes secundárias realizam o sensoriamento, designado daqui em diante *sensing*, para identificarem as bandas em que podem transmitir de forma a garantirem o nível de protecção exigido pelas redes primárias. Esta pesquisa é feita de forma dinâmica,

o que possibilita maior eficiência na utilização do espectro.

Existem diversos protocolos clássicos de acesso ao meio (MAC) já propostos para sistemas de rádio cognitivo, estando devidamente adaptados às limitações impostas pelas redes primárias. Geralmente, antes de uma transmissão é necessário efectuar o *sensing* de forma a avaliar se existe alguma transmissão da rede primária a decorrer, de forma a que não lhe seja causada interferência. Os utilizadores equipados com rádios cognitivos não possuem a capacidade de realizar o *sensing* e transmitir simultaneamente. Por isso, alguns protocolos operam de forma cíclica. O seu modo de operar intercala o período de *sensing* com o período de transmissão, para que periodicamente consiga ter informação relativa à utilização do espectro por parte dos utilizadores primários. Quando um utilizador da rede primária pretende transmitir, os utilizadores da rede secundária dispõem de um período de tempo limitado para libertar o canal de comunicações, sendo o canal somente utilizado pelos utilizadores licenciados após esse período.

Geralmente considera-se que os utilizadores secundários estão sujeitos às transmissões dos mesmos utilizadores primários, ou seja, todos os utilizadores secundários que se encontram no raio de alcance dos mesmos utilizadores primários têm uma visão bastante semelhante da ocupação do espectro por parte dos utilizadores primários. Este trabalho considera heterogeneidade nas percepção que os Secondary Users (SUS) têm do canal. A heterogeneidade pode ter origem em três fontes: desempenho da técnica de *sensing*, condições de propagação e posicionamento dos SUs e Primary Users (PUs).

As diferentes técnicas de *sensing* podem apresentar diferentes desempenhos dependendo do contexto considerado. Cada técnica atinge um determinado desempenho de detecção, dependendo dos parâmetros utilizados.

As condições de propagação introduzem heterogeneidade devido aos fenómenos de propagação sofridos durante a transmissão, os quais são variáveis no tempo. Consideram-se os efeitos *path loss*, que atenua a potência do sinal recebido consoante a distância entre os rádios transmissor e receptor e o *fading*, o qual é originado pelos obstáculos que se encontram entre o emissor e receptor e pela existência de múltiplos caminhos de propagação.

O posicionamento dos SUs e dos PUs também influencia a visão dos SUs. Cada SU

ocupa uma posição no espaço que é única e por isso tem diferentes distâncias aos PUs, ficando mais influenciado por alguns PUs do que por outros.

1.2 Motivação

A transição da televisão analógica para a televisão digital reduziu a ocupação do espectro radio-eléctrico. As frequências que ficaram disponíveis abrangem as bandas designadas por VHF/UHF. Na Europa encontram-se entre 470 MHz e 790 MHz, e nos Estados Unidos entre 54 MHz e 698 MHz em bandas não contínuas [FGK13]. Com esta redução, ficaram disponíveis bandas de espectro bastante desejadas devido às suas características de propagação. Por serem inferiores a 1 GHz são menos susceptíveis aos fenómenos de atenuação por efeitos de propagação.

Tendo em consideração a limitação das redes não licenciadas, nomeadamente em termos dos requisitos de protecção das redes licenciadas, diferentes entidades de normalização concluíram o processo de normalização de alguns protocolos, entre eles o 802.11af e 802.22. Estes protocolos são baseados nos princípios do rádio cognitivo mas apresentam diferenças nos níveis físico, MAC e cognitivo. A iniciativa IEEE 802.11af é um protocolo que deriva do standard 802.11. Este funciona como um "Super Wi-Fi" ou "White-fi". "Super" devido às suas capacidades cognitivas e "White" devido às bandas ocupadas [LM12]. Tem aplicação em ambientes interiores (<100 m) e exteriores (<5 km) e o protocolo IEEE 802.22 é aplicado tipicamente em ambientes rurais, quando se pretende comunicar a uma distância na ordem dos quilómetros (entre 17 e 30 km desde a estação base até ao utilizador [LM12]). Estes protocolos utilizam uma estação base central que coordena a actividade da rede secundária com a ajuda de uma base de dados. A base de dados contém a actividade das redes primárias a nível temporal e espacial. O rádio cognitivo é implementado com base nessas informações.

Ao contrário dos dois protocolos referidos anteriormente, este trabalho foca-se em protocolos descentralizados, os quais não necessitam de uma estação central que os coordene. Cada SU toma decisões dependendo do que observa em seu redor. Essas observações derivam exclusivamente da técnica de *sensing* utilizada.

1.3 Objectivos e Contribuições

1.3.1 Objectivos

O objectivo principal desta dissertação consiste em caracterizar o desempenho de vários protocolos distribuídos de acesso ao meio para redes de rádio cognitivo. O primeiro passo é a implementação em MATLAB de três protocolos MAC apresentados em [CYCMWC11], [CYCMWC09] e [CYCMWC13]. Os protocolos *slotted* CR-ALOHA, CR-CSMA e CR-CSMA/CA baseiam-se em protocolos MAC clássicos, sendo adaptados a um cenário de rádio cognitivo através da observação e avaliação do estado de ocupação do canal por utilizadores primários. Estes protocolos operam de forma descentralizada não recorrendo a qualquer entidade que regule o comportamento da sua rede e observando o meio/canal exclusivamente a partir da técnica de *sensing*. Pretende-se caracterizar os protocolos através do desempenho e variando vários aspectos relativos aos cenários de redes de rádio cognitivo, com especial atenção à heterogeneidade na visão que os SUs têm da ocupação do meio por parte da rede primária. Pretende-se definir cenários com diferentes níveis de heterogeneidade, através dos resultados de *sensing* adoptando a técnica de *sensing* baseado em energia. A heterogeneidade é originada pelos fenómenos de propagação e posicionamento dos nós da rede secundária e primária. Pretende-se ainda definir uma métrica que caracterize a heterogeneidade. Os protocolos são estudados através do seu desempenho nos diferentes cenários, homogéneo e heterogéneos, e pretende-se perceber e justificar o impacto da heterogeneidade no desempenho dos protocolos.

Partindo do facto de alguns protocolos adoptarem diferentes heurísticas no mecanismo de regulação de contenção no acesso ao meio, pretende-se ainda avaliar o impacto de diferentes heurísticas através do débito útil atingido pela rede secundária.

1.3.2 Contribuições

Esta dissertação compara diferentes resultados de desempenho de redes de rádio cognitivo obtidos através da simulação de múltiplos protocolos de acesso ao meio.

As contribuições deste trabalho situam-se em diferentes domínios. No primeiro, menciona-se o desenvolvimento de software que implementa os diferentes protocolos avaliados, bem como um conjunto de ferramentas auxiliares que permitem avaliar o desempenho dos

protocolos através do tratamento estatísticos dos resultados obtidos. No domínio da comparação e interpretação de resultados, a dissertação introduz alguns conceitos inovadores, de onde se destaca:

- A especificação de cenários *sensing* heterogéneos;
- O estudo dos protocolos considerando os cenários heterogéneos;
- A caracterização do impacto da alteração das heurísticas de regulação de acesso ao meio.

O trabalho apresenta ainda uma métrica para classificação dos níveis de heterogeneidade dos cenários, a qual permite quantificar o nível de dissemelhança do estado de ocupação do canal obtido pelos diferentes nós secundários através de um escalar.

Finalmente, destaca-se o facto dos resultados alcançados no decorrer deste trabalho terem contribuído para uma comunicação científica (Apêndice D), a qual se encontra em estado de revisão.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco Capítulos e quatro apêndices. Os apêndices contêm os códigos em linguagem MATLAB referentes aos três protocolos e a comunicação científica submetida à conferência internacional.

O Capítulo 2 apresenta uma introdução ao trabalho já desenvolvido na área do rádio cognitivo. Começa por introduzir quais os aspectos a ter em conta na concepção deste tipo de redes. Em seguida são abordados mais pormenorizadamente alguns conceitos de maior influência na dissertação. Primeiro aborda-se o estudo realizado pelo grupo na área de *sensing* espectral. Introduce-se depois o exemplo de um protocolo distribuído de acesso ao meio em sistemas Multi-Canal e ainda um protocolo distribuído desenvolvido pelo grupo de investigação para sistemas de canal único com dois estágios e reserva. Por fim, descreve-se o funcionamento dos três protocolos avaliados neste estudo: CR-ALOHA, CR-CSMA e CR-CSMA/CA.

O Capítulo 3 descreve pormenorizadamente os cenários definidos para a subsequente caracterização de desempenho. Descreve-se ainda o comportamento dos PUs no que diz

respeito à utilização do canal, bem como os modelos de geração de tráfego dos PUs e as condições de propagação que têm um efeito directo nas suas transmissões. Analisa-se o *framing* utilizado pelos SUs nos três protocolos implementados e acaba-se descrevendo matematicamente o modelo de *sensing* considerado.

O Capítulo 4 analisa e compara o desempenho dos protocolos em dois cenários homogéneos com diferentes níveis de ocupação da rede primária. Em seguida, analisa o efeito da heterogeneidade nos três protocolos, considerando os cenários desenvolvidos no Capítulo 3. Neste Capítulo cada protocolo é avaliado para dois níveis de ocupação da rede primária. Implementa ainda diferentes tipos de contenção para o protocolo CR-CSMA/CA. São ainda apresentadas duas filosofias de contenção baseadas em heurísticas e comparado o seu desempenho com o protocolo original.

Finalmente, o Capítulo 5 termina a dissertação, enumerando as principais conclusões do trabalho.

Capítulo 2

Trabalho Relacionado

2.1 Conceitos básicos em Rádio C3gnitivo

Existem v3rios conceitos a considerar na caracteriza33o das redes *ad hoc* com radio cognitivo, do ingl3s: Cognitive Radio Ad Hoc Networks (CRAHN). Esta introdu33o tem como base o trabalho apresentado em [ALRC09] e visa expor uma grande parte desses conceitos.

Nas CRAHNs, os utilizadores secund3rios (SUs) procuram utilizar o espectro licenciado que pertence aos utilizadores prim3rios (PUs) de uma forma oportunista. Quer isto dizer que embora o espectro esteja licenciado para os PUs, os SUs poder3o utiliz3-lo desde que n3o seja utilizado pelos PUs num determinado instante temporal e numa dada localiza33o espacial. As oportunidades de utiliza33o do espectro, tamb3m denominadas de "buracos", podem ser aproveitados mas tendo sempre em conta o n3vel de interfer3ncia causado 3 rede prim3ria, pois os PUs t3m sempre prioridade no acesso ao meio.

Nestas redes, os utilizadores (n3s) s3o m3veis e podem comunicar directamente entre si (vizinhos directos) ou por interm3dio de outros n3s (*multihop*). Como n3o existe uma entidade central de controlo, os SUs t3m que decidir as suas ac33es atrav3s da observa33o do meio que os rodeia. Para isso t3m que realizar quatro fun33es essenciais: Sensoriamento de espectro (*spectrum sensing*), decis3o de ocupa33o de espectro (*spectrum decision*), partilha de espectro (*spectrum sharing*) e mobilidade no espectro (*spectrum mobility*). Cada t3pico referido cont3m diversos sub-t3picos.

Dada a falta de uma entidade central de controlo que tenha conhecimento das carac-

terísticas da rede, como por exemplo a topologia, é essencial a cooperação entre os vários SUs. Para um melhor conhecimento da rede, os SUs além da observação que fazem do meio, podem trocar essa informação uns com os outros afim de estabelecerem determinada cooperação, dando assim a conhecer aos outros nós o que rodeia cada um. Esse tipo de informação, quando utilizada, é disseminada através de um canal de controlo comum aos SUs. Este canal pode ter dois tipos de implementação: em banda ou fora de banda. Em banda as mensagens são enviadas nos canais usados para transmissão de dados. No caso fora de banda é estabelecido um canal dedicado fora da banda licenciada.

Segue-se a descrição das funções essenciais referidas anteriormente.

2.1.1 *Spectrum Sensing*

Spectrum Sensing consiste na análise de utilização do espectro. Desta forma um SU analisa a efectiva ocupação espectral por parte dos utilizadores licenciados. Cada SU pode assim determinar a presença de uma ou mais transmissões de PU(s) e a própria disponibilidade do espectro. Nesta área são estudadas as seguintes funcionalidades.

- **Detecção de PUs** - A detecção de PUs pode ser feita através de diversas técnicas. Resume-se de seguida as principais técnicas utilizadas na detecção dos PUs.

- *Sensing* baseado na detecção de energia (EBS) - Esta técnica é baseada na medição da quantidade de energia observada no canal durante um período de *sensing*. São retiradas N_G amostras do canal, quadradas e somadas. Por fim a decisão advém da comparação da energia obtida com um limiar que indica a presença de uma ou mais transmissões de PUs. No decorrer desta dissertação é realizada uma análise mais detalhada desta técnica.
- *Sensing* baseado na forma de onda - Necessita do conhecimento *a priori* dos diferentes tipos de sinal a identificar. O valor de M provém da correlação entre o sinal recebido e o sinal esperado. Quanto mais correlacionado estiver o sinal recebido com o sinal esperado maior será o valor de M . Se o sinal recebido for composto apenas por ruído M terá um valor baixo. Assim é possível definir um limiar e decidir se existe ou não transmissão de PU(s) dependendo do valor de M .

- *Sensing* baseado na ciclo-estacionariedade - Este método aproveita o facto de alguns dos sinais utilizados nas comunicações sem fios serem ciclo-estacionários e o ruído (AWGN) ser estacionário. O sinal recebido é analisado e a partir das suas características é concluído se existe ou não transmissão de PU(s). Uma característica a analisar pode ser a média. Enquanto que no ruído (sinal estacionário) a média é constante, num sinal ciclo-estacionário a média pode ser vista como um sinal periódico com uma ou mais harmónicas.
- *Sensing* utilizando *matched-filter* - Com o conhecimento do canal é possível inverter o efeito do mesmo numa transmissão. O sensing através desta técnica utiliza o conhecimento das características do canal para que se houver uma transmissão de PU(s) o efeito do canal seja cancelado e obtido o sinal transmitido. Desta forma é possível identificar se existe ou não transmissão de PU(s).
- **Controlo de Sensing** - A funcionalidade do controlo de *sensing* procura explorar dois tópicos: o tempo necessário para encontrar canais disponíveis e com que frequência e duração se deve analisar o espectro.

2.1.2 *Spectrum Decision*

Esta área incide sobre a decisão de qual a melhor banda de espectro a utilizar dentro das disponíveis. Deve apresentar quatro funcionalidades.

- **Caracterização de espectro** - Através de frequências rádio (RF), os SUs caracterizam o espectro disponível considerando a potência do sinal, o nível de interferência e o número de utilizadores. Esta caracterização deve ter em conta a heterogeneidade da rede e o seu dinamismo pois as características do espectro variam no espaço e no tempo.
- **Seleção de Espectro** - Tendo em conta a disponibilidade do espectro, são escolhidas as bandas que melhor satisfazem os requisitos necessários para a ligação. É de notar que a escolha da banda de espectro pode estar bastante relacionada com os protocolos de encaminhamento. Uma ligação entre dois SUs pode passar por vários nós sendo necessário considerar a heterogeneidade do espectro ao longo da rota e

conciliar a escolha da rota com a escolha da banda de espectro.

- **Protocolo de Encaminhamento** - O protocolo de encaminhamento tem que considerar a disponibilidade espectral dos nós que poderão fazer parte da rota de encaminhamento. É necessário traçar a rota considerando também a disposição geográfica dos PUs e a possível interferência, evitando-a. De uma forma geral, esta funcionalidade decide entre procurar uma rota que evite a actividade dos PUs, contornando a sua área de actividade ou escolher uma rota mais directa alterando a utilização do espectro.
- **Reconfiguração** - Dado o dinamismo da rede, os SUs têm que alterar o seu comportamento adaptando-o às novas condições. Quando um canal é selecionado para transmissão é necessário enquadrar a transmissão nos parâmetros do canal, como a largura de banda a utilizar, nível de potência, etc.

2.1.3 *Spectrum Sharing*

Esta área procura distribuir o acesso ao espectro entre SUs de uma forma justa sem causar interferência aos PUs. Consideram-se as seguintes funcionalidades.

- **Alocação de recursos** - Através da observação do meio, o SU escolhe os parâmetros da transmissão que mais lhe convém. Contudo, não pode esquecer que existem outros SUs e os recursos precisam ser partilhados de uma forma justa. Esta partilha pode ser feita através de cooperação entre os nós.

Uma questão importante é a escolha da potência a usar para transmitir devido à interferência que pode causar às transmissões dos PUs e de outros SUs.

Para uma distribuição justa dos recursos tem sido utilizada frequentemente a teoria de jogos. Um nó tem que escolher os recursos que vai utilizar prevendo a resposta dos outros SUs. Com esta abordagem é possível atingir o *Nash equilibrium* (justiça na distribuição dos recursos) mas não o *Pareto optimum* (eficiência em termos da utilização total dos recursos disponíveis).

- **Acesso ao Espectro** - Nas CRAHNS consideram-se três tipos de protocolos: acesso aleatório, *slotted* e híbrido. No acesso aleatório os dados e as mensagens de controlo

são transmitidos pelo canal de forma oportunista. No *slotted* existem *slots* fixos para o período de mensagens de controlo e para a transmissão de dados. No modelo híbrido as mensagens de controlo têm um período fixo mas os dados são transmitidos oportunisticamente.

- **Sincronização** - Alguns protocolos MAC necessitam de uma sincronização rígida enquanto outros só sincronizam os períodos de mensagens de controlo. É difícil obter sincronização em redes muito amplas o que leva a problemas de escalabilidade. Para além disso, nalguns protocolos *slotted* os SUs percorrem os canais fazendo *broadcast* de mensagens *Hello* o que resulta num desperdício de banda.
- **Suporte de *Sensing* do Espectro** - Para melhorar a área de *sensing* as transmissões dos PUs devem ser distinguidas das realizadas pelos SUs. Como a detecção através de EBS não distingue a origem do sinal, uma possível abordagem é utilizar receptores distintos para controlo, dados e tons de ocupado. Quando um SU transmite num canal deve emitir um sinal noutra canal. Este outro canal pode ser consultado pelos SUs que ficam a saber se existe de facto uma transmissão no canal correspondente, minimizando a probabilidade de falso alarme.

2.1.4 *Spectrum Mobility*

Quando um SU tem uma transmissão a decorrer e um PU requisita os recursos dessa transmissão, a transmissão do SU precisa ser transferida para outra parte do espectro que esteja disponível. Esta área estuda a adaptação das transmissões a decorrer face às alterações da rede.

- **Handoff no Espectro** - Este conceito baseia-se na transferência de uma transmissão a decorrer numa banda do espectro para outra banda. Esta acção pode ser desencadeada por mobilidade dos SUs, mobilidade dos PUs ou degradação da ligação. Nas CRAHNS, para além dos problemas das redes *ad hoc* convencionais, existe a particularidade de uma transmissão que foi estabelecida inicialmente ter de ser alterada devido à possível interferência que causará a uma transmissão de um PU.

Quando uma transmissão falha devido à presença de PUs, o SU pode não chegar a fazer *handoff* devido a grande parte do espectro estar indisponível. Nesta situação o melhor é traçar uma nova rota que ligue os dois pontos da rota quebrada.

- **Gestão de ligações** - A gestão de ligações tem como objectivo gerir os parâmetros dos protocolos das diferentes camadas (OSI) a fim de manter a qualidade de serviço (QoS) ou minimizar a degradação da ligação na mudança de banda. Quando a informação sobre a nova banda a utilizar estiver disponível, é possível adaptar os parâmetros dos diferentes protocolos para minimizar a degradação da ligação.

2.2 *Sensing* Espectral

Expostos os problemas gerais a ter em conta na caracterização das CRAHNs, aborda-se de seguida um aspecto mais específico: o *sensing espectral*.

O trabalho apresentado em [LFO⁺12a] caracteriza qual o melhor limiar de energia γ a considerar para decidir a presença ou ausência de uma transmissão de um PU. Os autores consideram um par de SUs e um par de PUs. Por simplicidade assumem que o início das transmissões dos PUs coincidem com o início das tramas SUs e conseqüentemente com o início do período de *sensing*. Para além disso assume-se que o período de transmissão dos PUs é sempre maior que as tramas SUs, não alterando assim o seu comportamento até ao fim de uma trama SU.

A técnica de *sensing* utilizada foi EBS. A escolha de γ é baseada nos 5 critérios descritos em seguida:

- **1º Critério** - Encontrar o limiar de energia em que se atinge a máxima probabilidade de interferência (P_I) entre as transmissões SU e PU.
- **2º Critério** - Minimizar P_I ao mesmo tempo que maximiza a probabilidade de acesso ao meio dos SUs.
- **3º Critério** - Parametrizar γ de forma a maximizar a capacidade de avaliação do meio por parte dos SUs. Baseia-se em maximizar a probabilidade de detecção P_D e minimizar a probabilidade de falso alarme P_{FA} .

- **4º Critério** - Como o meio tem uma probabilidade de estar ocupado associada, este critério procura atribuir aos SUs a uma probabilidade de acesso igual à probabilidade do meio estar disponível para transmitir.
- **5º Critério** - Maximizar a P_D juntamente com a probabilidade de acesso dos SUs.

A Figura 2.1 representa os diversos critérios, assim como P_D e P_{FA} para um valor de $SNR = -5dB$.

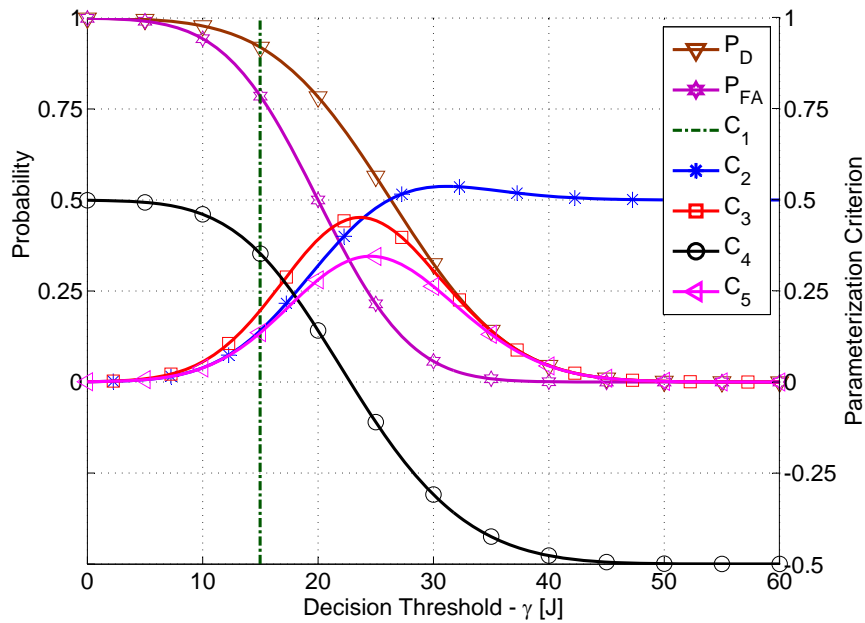


Figura 2.1: Critérios em função de γ ($SNR = -5dB$) [LFO⁺12a].

Para um caso de SNR baixo não é possível ter o *sensing* a operar próximo das condições ideais, pois não se encontra um valor de γ em que se obtenha simultaneamente $P_D \approx 1$ e $P_{FA} \approx 0$.

O valor de SNR tem um papel muito importante no desempenho do *sensing* do tipo EBS. A Figura 2.2 demonstra os resultados obtidos considerando um valor de $SNR = 5dB$. Para um valor de $\gamma \approx 40J$, na Figura 2.2, obtém-se um ponto de funcionamento próximo do óptimo, $P_D \approx 1$ e $P_{FA} \approx 0$. Para além deste trabalho utilizar os vários critérios afim de parametrizar o limiar de energia, explora também, através dos mesmos critérios, o rendimento dos SUs e a interferência causada pelas transmissões dos SUs às transmissões dos PUs variando a relação entre o período de *sensing* e o período da trama SU.

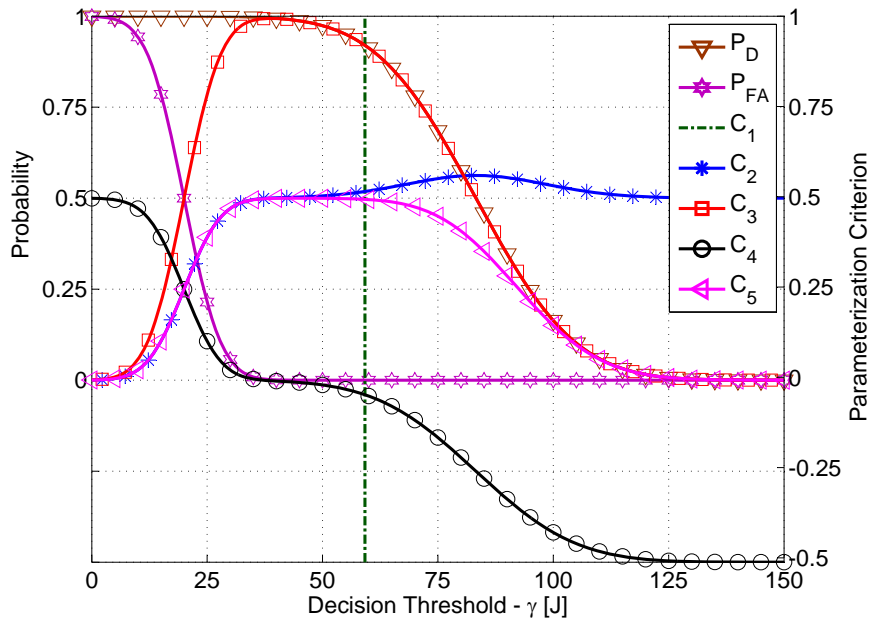


Figura 2.2: Critérios em função de γ ($SNR = 5\text{dB}$) [LFO+12a].

O cenário considerado em [LFO+12a] pressupõe uma rede primária "bem comportada" pois as suas transmissões encontram-se sincronizadas com as tramas dos SUs. No trabalho realizado em [LFO+12b] procura-se ajustar os modelos existentes à realidade, não limitando o início das transmissões dos PUs apenas ao início das tramas SU. Assim os PUs podem transmitir em qualquer instante temporal das tramas SU, podendo isso acontecer em qualquer momento do período de *sensing* ou de transmissão. O objectivo do trabalho em [LFO+12b] é analisar o nível de interferência que as transmissões dos PUs sofrem considerando que não existe sincronismo. Foi tido em conta um par de PUs e um par de SUs. É ainda considerado um período de trama SU menor que o tempo que os PUs podem alterar duas vezes o seu estado, o que significa que durante uma trama SU os PUs só alteram uma única vez o seu estado. A actividade dos PUs é modelada segundo os seguintes cenários:

- **Cenário A** - o PU está a transmitir no início do período de *sensing* e pára durante esse período. Neste caso não acontecerá interferência pois o PU não está a transmitir durante o tempo de transmissão de SU.
- **Cenário B** - O PU está a transmitir no início do período de *sensing* e pára de transmitir já no período de transmissão. A possibilidade de sofrer interferência vai

dependem da probabilidade de detecção (P_D).

- **Cenário C** - A transmissão de PU ocorre durante toda a trama de SU. A possibilidade de interferência depende também de P_D .
- **Cenário D** - O PU está inactivo e começa a transmitir durante o período de transmissão de SUs. A interferência vai depender da probabilidade de falso alarme (P_{FA}), o que significa que não houve transmissão durante o período de *sensing* mas o sistema EBS considerou, erradamente, que havia transmissão nesse período.
- **Cenário E** - Este é o caso especial que o PU começa a transmitir no ultimo *slot* do período de *sensing*. A interferência vai depender de P_D .
- **Cenário F** - A transmissão de PU começa durante o período de *sensing*. A possibilidade de interferência depende de P_D .

Para medir o nível de interferência os autores consideraram um período de trama SU de 21.3ms e variaram a razão do período de *sensing* com o período da trama SU. Fizeram três simulações variando a relação do período da trama SU com o período de uma trama PU, tempo de transmissão de PU.

Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 2.3.

Considera-se $T_F^{SU} = \min(T_F^{PU}, \overline{T_F^{PU}})/\delta$, em que T_F^{SU} , T_F^{PU} e $\overline{T_F^{PU}}$ designam o período da trama SU, período que o PU transmite e período que não transmite respectivamente.

Observa-se que para valores menores de δ e menores períodos de *sensing* o nível de interferência é maior.

2.3 Protocolos MAC distribuídos em Sistemas Multi-canal

Após realizar o sensing, os SUs ficam a saber se existe ou não transmissões da rede primária que possam sofrer interferência. Se não existirem, os nós secundários poderão aceder ao meio consoante o protocolo adoptado.

Dado o dinamismo (mobilidade) e a diversidade de utilizadores das redes de rádio cognitivo, esta dissertação considera apenas protocolos distribuídos e sem canais de controlo.

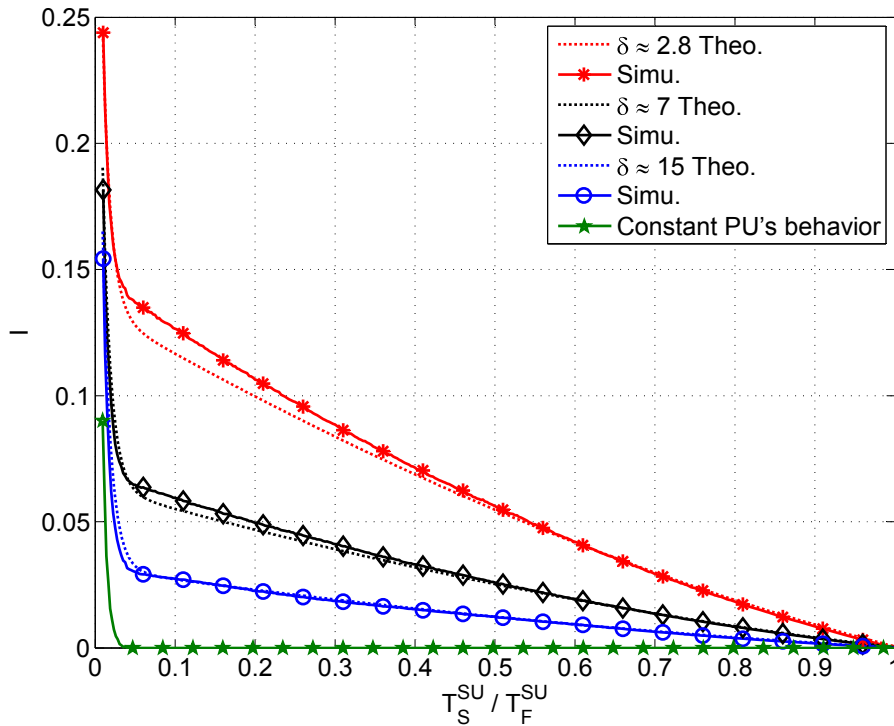


Figura 2.3: Interferência causada à rede primária [LFO⁺12b].

Ou seja, protocolos que operam sem um nó central que coordene a rede, e onde as acções tomadas pelos SUs são baseadas exclusivamente no *sensing* que estes realizam. Embora seja referida anteriormente a possibilidade dos nós da rede secundária cooperarem entre si, esta dissertação não inclui nenhum protocolo que o faça.

O grande desafio destes protocolos consiste em atingir o débito máximo para a rede secundária, sem causar interferência à rede primária, funcionando de uma forma descentralizada e sem canais de controlo comuns. No entanto, o débito deve ser obtido de forma justa, partilhando o espectro radio-eléctrico entre todos os SUs. Existem protocolos que operam em sistemas multi-canal e outros em canal único.

Num sistema multi-canal, existe um grande desafio por parte de rede secundária na escolha dos canais a utilizar. A mobilidade dos nós, tanto da rede primária como da secundária, faz com que a ocupação do espectro seja bastante dinâmica e por isso difícil a escolha dos canais. Existem abordagens na escolha dos canais como *channel hopping* ou mesmo a utilização de um canal de controlo comum.

No trabalho realizado em [WH11] é proposto um novo protocolo estocástico de acesso

ao meio. Propõe-se um esquema de selecção de canais baseado no método Markov-Chain Monte-Carlo. Este é um protocolo descentralizado que funciona sem canais de controlo comuns. Seguem-se as especificações utilizadas na implementação do protocolo.

Considera-se uma largura de banda total de W Hz. Esta está dividida em M canais (não necessariamente iguais) sem sobreposição. Os canais podem ser utilizados por N SUs que procuram oportunidades para transmitir. O canal é sujeito a um desvanecimentos de *Rayleigh*.

O *sensing* do espectro é realizado através da técnica EBS em cada canal. Existe uma vasta largura de banda (W), mas para o *sensing* ser fiável precisa ser feito numa banda estreita do espectro. Podia-se então adoptar um sistema de *sensing* em vários canais simultaneamente, contudo neste trabalho é efectuado um *sensing* sequencial aos M canais. Considera-se também a realização de uma das actividades de cada vez por parte dos SUs: *sensing* ou transmissão de dados.

É definida uma interferência máxima admitida às transmissões de um PU. Logo, os SUs têm que ajustar a sua potência de transmissão para não exceder o nível de interferência.

Como referido anteriormente, não são utilizados canais de controlo, logo é necessário encontrar dinamicamente canais para negociação. Para realizar a negociação é procurada uma sequência de canais disponíveis (para o emissor SU) afim de eventualmente o receptor (SU) receber a proposta num deles.

A abordagem mais directa para a selecção desses canais seria a determinação da disponibilidade dos canais baseado apenas em EBS, mas este processo é impreciso. Para obter uma decisão fiável sobre a disponibilidade do canal é necessário obter dados suficientes sobre o canal, o que é bastante difícil. Deve-se ter em conta também a forma dinâmica como o espectro é ocupado, o que piora ainda mais a precisão deste processo (EBS). Este problema é abordado em [WH11] através da implementação do método Markov-Chain Monte-Carlo onde a distribuição alvo é a disponibilidade do canal. Essa disponibilidade pode ser aproximada utilizando os resultados do método EBS. A escolha do canal seguinte para pertencer à sequência de canais do SU que pretende transmitir depende da probabilidade de disponibilidade do canal P_d proposto (proposto com base numa distribuição aleatória) e de P_d do canal actual. Quando um canal é proposto (aleatoriamente) a sua

P_d é comparada à P_d do canal actual. A probabilidade do canal proposto ser aceite é proporcional ao rácio entre P_d do canal proposto e P_d do canal actual. Quanto maior for o rácio maior a probabilidade do canal ser aceite. Desta forma selecciona-se a sequência de canais óptima dentro dos M canais. Existe um número máximo de tentativas para a escolha da sequência. A escolha da sequência é ilustrada na Figura 2.4

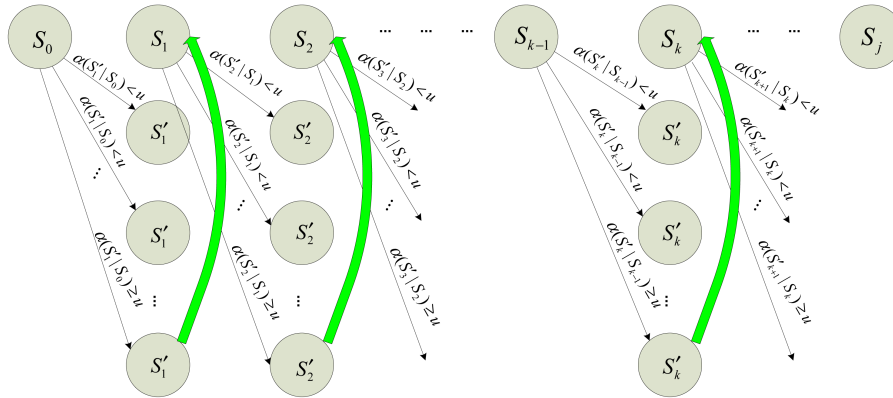


Figura 2.4: Selecção da sequência de canais [WH11].

Ao chegar a uma rede com espectro licenciado o SU começa por procurar um canal livre onde permanece caso não venha a detectar actividade de PUs ou transmissões de outros SUs. Se pretender transmitir dados para outro SU faz a escolha da sequência θ considerando como o primeiro canal aquele em que se encontra.

O SU emissor (A) começa por transmitir uma mensagem RTS no canal livre que escolheu quando chegou à rede. Nesta mensagem são enviados os parâmetros referentes à transmissão assim como a sequência de canais θ que lhe são favoráveis.

Se o SU receptor (B) não receber mensagem RTS no primeiro canal não reenvia CTS. Como A não recebe CTS, vai voltar a enviar a mensagem RTS em todos os canais da sequência θ . Quando B receber a mensagem num dos canais, vai analisar todos os canais da sequência θ e escolher os canais que lhe sejam favoráveis. Envia uma mensagem CTS em todos os canais que escolheu informando A da sua escolha θ' .

A transmissão de dados é efectuada no conjunto de canais que B escolheu $\theta' \subset \theta$. Se o pacote de dados for demasiado longo é necessário ser fragmentado. Isto por duas razões: quanto maior for o pacote, mais tempo demora a transmitir, maior a probabilidade de um PU requisitar o canal; a outra razão deve-se ao facto de ocupar o canal por demasiado

tempo ir contra a política de acesso ao meio, pois este deve ser partilhado de forma justa.

Caso haja colisão na transmissão, o pacote é simplesmente retransmitido sem que haja a usual contenção. Esta solução deriva do facto de um período de contenção poder atrasar demasiado a transmissão do pacote aumentando assim a probabilidade de colisão com um PU. Assim o procedimento para reenvio do pacote que colidiu é a repetição do esquema proposto.

O desempenho deste protocolo é comparado com duas outras abordagens: *channel hopping* e o uso de um canal de controlo comum.

Nos vários parâmetros comparados pelos autores do protocolo, o uso de um canal de controlo comum e o esquema proposto têm um melhor desempenho que o *channel hopping*. O esquema proposto, quando comparado com o uso do canal de controlo comum, apresenta melhor desempenho numas situações e pior noutras. No entanto, apresenta a vantagem de não usar largura de banda adicional para controlo.

Em termos de débito o esquema proposto é estudado para 2, 3 e 4 tentativas de negociação da sequência de canais, observando-se que à medida que o número de tentativas aumenta o débito diminui. Também é observado o débito para diferentes probabilidades que um SU tem de permanecer num canal com sucesso de negociação. Observa-se que o débito decresce à medida que essa probabilidade diminui, assim como também decresce à medida que o tráfego da rede primária aumenta, como era de esperar.

2.4 Protocolos MAC distribuídos em Sistemas de Canal único

Como referido anteriormente existem protocolos que operam em sistemas multi-canal e outros em sistemas de canal único. Nos sistemas de canal único as redes primária e secundária coexistem na mesma banda de espectro radio-eléctrico. Tal como nas redes sem fios descentralizadas clássicas, é sabido que adoptando um determinado protocolo de canal único, o débito máximo obtido numa rede de radio cognitivo é limitado [OBV13]. O trabalho realizado em [OBV13] propõe três protocolos MAC baseados em contenção aleatória, apresentando uma análise comparativa do seu desempenho. Os três protocolos apresentam uma filosofia de acesso ao meio do tipo distribuído (sem necessidade de um coordenador central) e não necessitam de canais de controlo comuns. Os SUs estão

sincronizados por tramas e realizam o *sensing* espectral no início de cada trama. São considerados um par de PUs e múltiplos SUs. Considera-se também a sincronização entre as tramas SU e as tramas de transmissão dos PUs. As três metodologias de acesso, denominadas "Single stage of contention", "Double Stage of Contention" e "Double stage of contention with reservation" são descritas seguidamente.

2.4.1 Protocolo A - *Single Stage of Contention*

Neste esquema os SUs começam por verificar no período de *sensing* se existe ou não transmissão de PUs. Caso exista não acedem ao canal. Caso não exista o SU vai transmitir numa das próximas tramas livres. A escolha da trama é realizada aleatoriamente sendo escolhida para transmissão com probabilidade $1/cw$, em que cw designa o valor da janela de contenção.

2.4.2 Protocolo B - *Double Stage of Contention*

São consideradas duas fases de contenção.

A primeira fase começa na primeira trama em que não é detectada actividade de PUs. O seu período de transmissão é dividido em cw_1 *mini-slots*. Cada SU demonstra a sua intenção de transmitir, transmitindo um *mini-packet* num desses *mini-slots*.

A selecção dos SUs que passam à segunda fase de contenção é feita através do seguinte critério: os SUs que transmitiram no primeiro *mini-slot* ocupado passam à segunda fase. Um SU sabe se passou ou não à segunda fase dependendo se ouviu ou não uma transmissão antes da sua. Esta selecção tem como objectivo reduzir o número de SUs a competir pelo acesso ao meio.

A segunda fase é implementada segundo o protocolo anterior, *Single Stage of Contention*, mas apenas com os SUs seleccionados na primeira fase.

2.4.3 Protocolo C - *Double Stage with Reservation*

Tal como o esquema anterior, este protocolo também é dividido em duas fases, mas ao contrário do anterior, as tramas detectadas disponíveis na segunda fase são sempre ocupadas, o que melhora o rendimento dos SUs. Como no protocolo anterior os SUs

demonstram a sua intenção de transmitir no período de transmissão da primeira trama disponível. Esta é também dividida em cw_1 *mini-slots*. O critério de selecção para a segunda fase é igual ao protocolo anterior.

A segunda fase dá-se na segunda trama detectada disponível que é dividida em cw_2 *mini-slots*. Os SUs seleccionados acedem a um dos cw_2 *mini-slots* procedendo a uma reserva de uma das próximas trama disponíveis. A ordem pela qual os SUs acedem aos cw_2 *mini-slots* vai ser a ordem pela qual vão transmitir nas próximas trama. Como o que interessa é a ordem pela qual transmitem, os SUs ocupam todas as tramas detectadas livres pela ordem solicitada durante os *mini-slots* de reserva. A quantidade de tramas utilizadas na fase de transmissões é igual ao número de reservas efectuadas na segunda fase. Se dois SUs acederem ao mesmo *mini-slot* as suas transmissões vão colidir na trama correspondente.

O débito obtido através dos três protocolos descritos é demonstrado na Figura 2.5

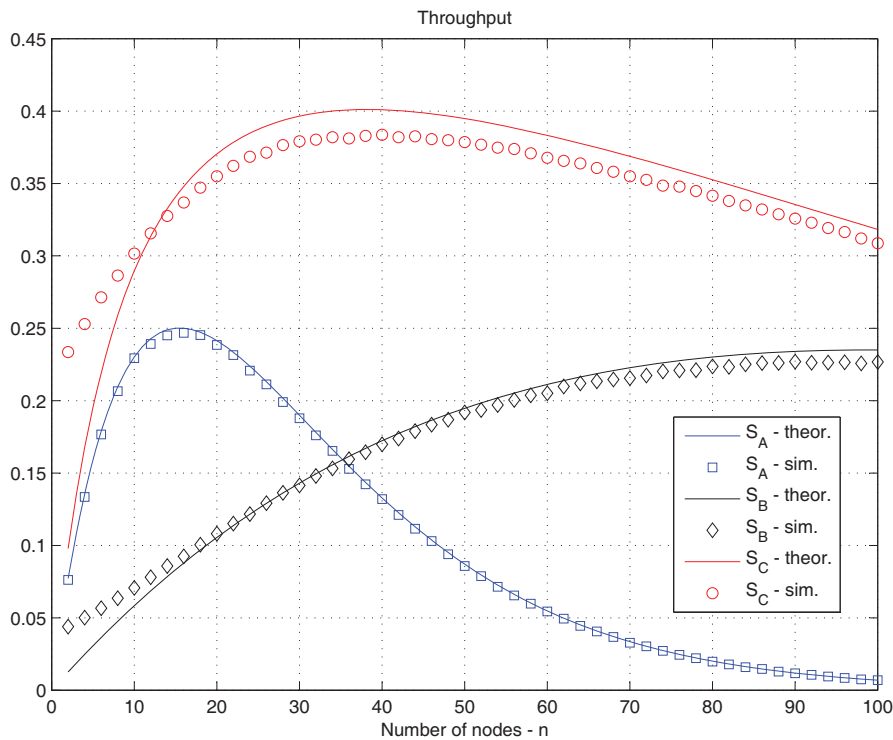


Figura 2.5: Débito normalizado dos protocolos considerados para uma ocupação de primários igual a 30 % [LFO+12b].

Tal como se observa, o débito obtido pelo protocolo C é superior ao obtido com os protocolos *Single Stage of Contention* e *Double Stage of Contention*, devido ao facto do protocolo C aumentar a utilização de tramas onde não é detectada actividade da rede

primária.

2.4.4 Protocolo *slotted* ALOHA

Os três protocolos seguintes, denominados *slotted* CR-ALOHA, CR-CSMA e CR-CSMA/CA têm especial importância nesta dissertação, pois foram implementados e caracterizados em termos de desempenho, foram escolhidos por diversas razões: são protocolos distribuídos e sem canais de controlo; realizam *sensing* espectral e os SUs encontram-se sincronizados entre si.

O primeiro protocolo, *slotted* CR-ALOHA, é apresentado em [CYCMWC11]. São consideradas duas redes: uma de PUs (primária) e outra de SUs (secundária). Ambas partilham a mesma banda de espectro e considera-se apenas um canal de transmissões. A rede primária é constituída por um emissor e vários receptores e a rede secundária é constituída por N SUs e um ponto de acesso (SAP). Os SUs e o SAP encontram-se dentro do alcance das transmissões do emissor primário. A topologia é demonstrada na Figura 2.6.

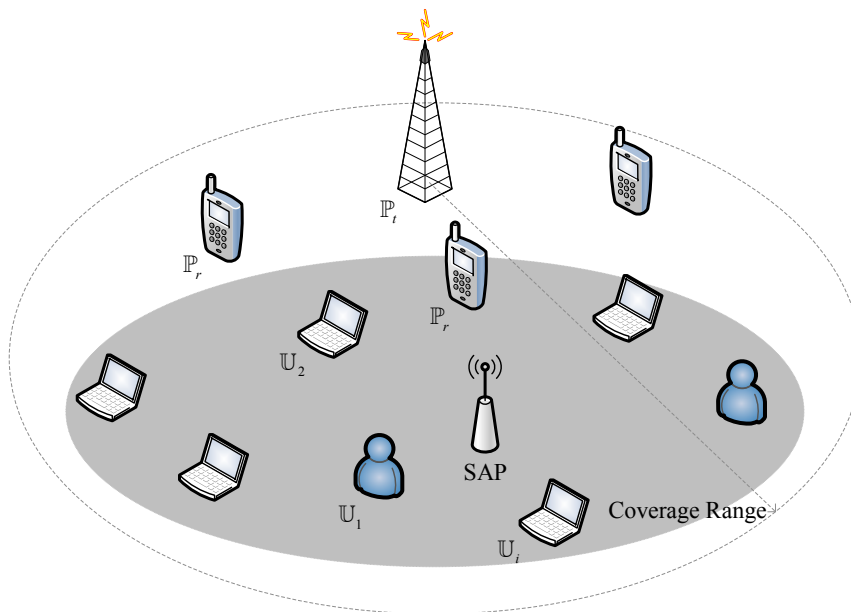


Figura 2.6: Topologia da rede [CYCMWC11].

O tempo é dividido em tramas que são compostas como demonstra a Figura 2.7. Como se pode observar, a trama divide-se em dois grandes períodos: o período de *sensing*

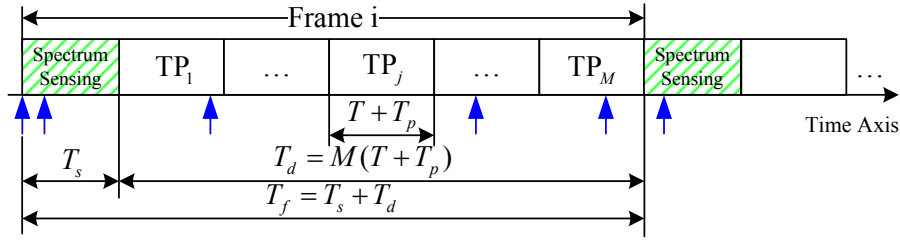


Figura 2.7: Estrutura da trama [CYCMWC11].

seguido do período de transmissão.

A trama é dividida num período T_s utilizado para *sensing* e noutro período T_d dedicado à transmissão. O período de transmissão é composto M períodos de transmissão (TP). Por sua vez, cada TP é composto por um intervalo com duração T utilizado na transmissão de cada pacote e noutro intervalo de duração T_p que representa o tempo de propagação. O *sensing* do espectro é realizado com a técnica EBS.

Para a rede primária os autores consideram que as hipóteses de um PU estar activo e inactivo seguem duas distribuições exponenciais, com parâmetros λ_{ON} e λ_{OFF} respectivamente. A rede primária não tem em conta a trama utilizada pela secundária existindo a possibilidade de uma transmissão da rede primária alterar o seu estado a meio da trama. Na rede secundária cada SU gera pacotes seguindo uma distribuição de *Poisson* com rácio de λ_i por TP , logo é esperado um pacote a cada $\frac{1}{\lambda_i}TP$. Supondo que o parâmetro λ assume o mesmo valor para todos os SUs então o tráfego total gerado pela rede secundária poderá ser visto como $G = N\lambda$.

Existem quatro hipóteses de comportamentos por parte do PU durante cada período de trama T_f :

\mathcal{H}_1 : O PU mantém-se inactivo durante T_s .

\mathcal{H}_2 : O PU mantém-se activo durante T_s .

\mathcal{H}_3 : O PU está inactivo durante T_s mas fica activo durante T_d .

\mathcal{H}_4 : O PU mantém-se inactivo durante T_f .

Adicionalmente são observados dois parâmetros: o factor de interferência definido como

$$IF = (1 - P_d^N)P_{\mathcal{H}_1} + (1 - P_f^N)P_{\mathcal{H}_2}, \quad (2.1)$$

que representa casos de falha na detecção (*misdetecção*) e quando não ocorre falso alarme na hipótese \mathcal{H}_3 ; e o factor de agilidade, que caracteriza quão rápido é o SU a libertar o canal quando um PU passa a estar activo. Este factor é definido por

$$AF = Tf/Tv, \quad (2.2)$$

sendo Tv o tempo máximo que um SU tem para deixar o canal disponível após um PU requisitar o canal.

Este protocolo segue o modelo clássico com a diferença de ser implementado em intervalos discretos. Estes intervalos acontecem devido à estrutura da trama (que considera a interferência). Cada transmissão tem a duração de um TP , e o acesso ao meio processa-se da seguinte forma:

- Se o canal estiver disponível e chegar um pacote para ser transmitido durante o $M - \text{ésimo slot}$ ou durante o tempo de *sensing* será transmitido no próximo *slot*;
- Se o canal estiver ocupado qualquer pacote que chegue será guardado e transmitido na próxima trama disponível com uma janela de contenção;
- A transmissão é bem sucedida quando é enviado apenas um pacote, caso contrário ocorrerá um colisão e terá que ser retransmitido com um tempo de contenção aleatório;
- Qualquer pacote que chegue para ser transmitido no $M - \text{ésimo slot}$ será transmitido na próxima trama.

Os autores obtêm uma expressão para o débito em função do número de SUs e do período de *sensing*. Para um período de *sensing* fixo, igual a 1 TP, o débito aumenta até $G = 1$ ($N = 50$), onde atinge o seu máximo e começa a diminuir à medida que o número de SUs aumenta. É apresentada uma expressão para o cálculo do período de *sensing* óptimo de forma a que o débito se mantenha para $G > 1$. Apesar do débito depender do valor da janela de contenção, o seu valor não é mencionado pelos autores, apenas se refere que deve ser suficientemente elevado para que não hajam colisões sucessivas.

É apresentada uma expressão para o cálculo do atraso médio de cada pacote transmitido. Ou seja, desde que é gerado o pacote até que é transmitido com sucesso. É apresentada também uma expressão para o cálculo do período de *sensing* que minimiza este atraso. Este parâmetro cresce linearmente até $G = 1$. Quando $G > 1$, o atraso médio aumenta linearmente para um período de *sensing* ótimo e aumenta exponencialmente quando utilizado um período de *sensing* não ótimo. Para um período de *sensing* não ótimo, o débito atingido pela rede secundária começa a diminuir após atingir o seu máximo porque o canal fica saturado com o tráfego gerado. Quanto mais tráfego, maior o número de colisões e menor o débito obtido.

2.4.5 Protocolo CR-CSMA

O protocolo *slotted* CR-ALOHA realiza *sensing* apenas à rede primária. No protocolo CR-CSMA, para além do *sensing* à rede primária, os SUs verificam se existem transmissões da rede secundária antes de transmitirem, o que evita algumas colisões.

O protocolo CR-CSMA, apresentado em [CYCMWC09], considera a utilização de Carrier Sense Multiple Access (CSMA) como modo de acesso dos SUs ao canal de transmissões. Os intervenientes são um PU e N SUs que partilham a mesma banda de espectro. É um protocolo descentralizado e sem canais de controlo comuns. A estrutura da trama utilizada neste protocolo é a mesma utilizada no protocolo anterior e representada na Figura 2.7.

Novamente, a interferência causada à rede primária é o grande limite a impor às transmissões dos SUs. As probabilidades de detecção (P_D) e falso alarme (P_{FA}) devem ser ajustadas (variando o limiar de energia γ) considerando essa interferência. Visto que o tempo de *sensing* influencia P_D e P_{FA} , que por sua vez influenciam as transmissões dos SUs, o tráfego geral pode ser ajustado alterando a duração desse período. Seguido ao período de *sensing* vem o de transmissão onde é implementado o protocolo CR-CSMA.

Os SUs estão sincronizados e comunicam com uma ponto de acesso (que também se encontra dentro da área de cobertura) quando não é detectada a presença de comunicações provenientes dos PUs. Quando o PU quer iniciar uma transmissão, os SUs têm que libertar o canal dentro de Td segundos, logo é necessário que o período da trama seja inferior ou igual a Td para que seja feito *sensing* a cada Td segundos ou menos.

O protocolo adopta *sensing* espectral baseado em energia (EBS). Fixa-se uma P_D que resulta da escolha da probabilidade de não ocorrer colisão com uma transmissão de PU: P_{noc} através da relação $P_{noc} = P_D^N$. Daí resulta $P_D = P_{noc}^{1/N}$. Define-se também uma P_{FA} que depende de P_D , τ (tempo de *sensing*), da frequência de amostragem e da relação sinal-ruído (SNR). Notar que P_{FA} é inversamente proporcional a τ e τ_{Max} impõe a P_{FA} mínima.

Cada SU gera pacotes seguindo uma distribuição de *Poisson* com média λ num intervalo de tempo TP . Pode-se então considerar novamente um ritmo médio de tráfego $G = N\lambda$. Considera-se um esquema de ACK igual ao do protocolo anterior. Além disso cada SU tem no máximo um pacote para transmitir a cada momento.

É adoptada uma estrutura parecida com o esquema DCF adoptada no protocolo 802.11. Um pacote TP consiste em m *slots* (ST) e considera-se que as transmissões de SUs começam no início de cada *slot*. Quando o PU é detectado inactivo, é utilizado o período Td para a transmissão de dados onde o acesso ao canal é feito através do protocolo CSMA. Neste caso:

1. Se chegar um pacote para ser transmitido no último ($M_{ésimo}$) TP ou durante o período de *sensing*, é transmitido no primeiro (próximo) TP da trama corrente.
 - (a) Se chegar no j -ésimo $\neq M_{ésimo}$ TP e o canal estiver disponível, será transmitido no próximo ST .
 - (b) Se o canal estiver ocupado o SU fará *sensing* do canal e tentará transmitir no próximo TP .
2. Se o canal estiver ocupado com uma transmissão do PU, qualquer pacote que chegue para ser transmitido durante essa trama será guardado até à próxima trama. Qualquer pacote que chegue no TP M será guardado para ser transmitido na próxima trama.

Os autores deste trabalho fazem uma análise semelhante ao protocolo anterior. É obtida uma expressão para o cálculo do débito em função do período de *sensing* e do número de SUs. O débito tem um comportamento semelhante ao obtido no protocolo *slotted* CR-ALOHA, embora apresente valores superiores.

2.4.6 Protocolo CR-CSMA/CA

Mesmo verificando se existem transmissões de outros SUs antes de um SU transmitir, o protocolo CR-CSMA [CYCMWC13] tem um elevado número de colisões para um período de *sensing* fixo, o que faz com o seu débito decaia após atingir o seu máximo. De forma a erradicar as colisões nas transmissões de dados, é proposto um esquema RTS/CTS antes de aceder ao meio. Desta forma são evitadas as colisões nas transmissões de dados e minimiza-se o problema do nó escondido. Embora possa existir colisões nos pacotes RTS e CTS, estas têm um impacto muito menor no débito do protocolo.

Como habitual, este protocolo visa proteger as transmissões da rede primária. É referida a capacidade deste protocolo operar num sistema multi-canal, porém só é demonstrada a análise do mesmo num sistema de canal único.

É introduzido um novo pacote antes dos usuais RTS/CTS, o *Prepare-To-Sense* (PTS). Este pacote é um pedido aos vizinhos SUs para que não utilizem o espectro de forma a que um dado SU possa avaliar o seu estado de ocupação. De seguida, os SUs (transmissor e receptor) realizam *sensing*. Este procedimento visa eliminar o problema do terminal escondido referente à rede primária, e possibilitar aos SUs distinguir entre transmissões de SUs e PUs.

É também proposto a adição de um tempo de bloqueio aos SUs juntamente com o já utilizado período de contenção exponencial para proteger as actividades dos PUs.

O sistema considerado é constituído por M SUs e múltiplos PUs, todos na mesma área. Como é habitual em rádio cognitivo, os SUs partilham a mesma banda de espectro que os PUs mas utilizam apenas os *slots* livres. Os SUs comunicam entre si e com um SAP mas nunca com os PUs.

A utilização de Carrier Sensing Range (CSR) é pouco eficiente quando os PUs se encontram fora do alcance dos SUs que utilizam esta técnica. É necessário a utilização de uma técnica de *sensing* que evite a interferência como o EBS e a detecção de característica ciclo-estacionária.

Para protecção dos PUs são estabelecidos dois limites para P_D e outro para P_{FA} . O tempo de *sensing* utilizado depende da técnica de *sensing* considerada. Como é óbvio, se ocorrer *misdetecção* a transmissão PU sofrerá interferência.

É possível também que os PUs iniciem actividade após o tempo de *sensing* (durante uma transmissão SU) mas ambos os casos são desprezados dada a baixa utilização do espectro por parte dos PUs e alta P_D dos SUs. Para além disso, como foi referido no artigo [CYCMWC09], com um tamanho de trama apropriado é possível desocupar o canal num tempo admissível quando o PU requisita o canal inesperadamente.

O tempo é dividido em *slots*. Quando um SU tem um pacote para transmitir espera até que o canal seja detectado disponível. De seguida faz *broadcast* de um pacote PTS para informar os outros SUs que vai fazer *sensing* durante um intervalo de tempo. Após ouvir o PTS, o SU receptor e o transmissor vão cada um fazer *sensing* do canal durante um determinado período.

Se o emissor detectar actividade (proveniente de PUs) vai bloquear a sua transmissão por um determinado período e posteriormente inicializa um temporizador com um período aleatório. Esse temporizador vai decrescer quando o canal estiver disponível e bloquear quando estiver ocupado. Se não detectar actividade, envia um pacote RTS para o receptor.

Se o SU receptor não receber o RTS, o transmissor vai tomar conhecimento disso depois de passar o tempo que era suposto ter recebido o CTS (adicionado um intervalo DIFS). Nesse caso o transmissor vai bloquear a sua actividade e inicializar um temporizador de contenção. O transmissor comporta-se da mesma forma quando o SU receptor recebe o RTS mas não pode responder por ter detectado actividade de um PU próximo, pois iria causar interferência.

Se o receptor enviar um pacote CTS, o transmissor vai iniciar a transmissão dos dados depois de um Short Interframe Space (SIFS). Acabada a transmissão é enviado um ACK para o transmissor. Se dois SUs iniciarem o processo de transmissão ao mesmo tempo, ambos vão enviar o pacote PTS ao mesmo tempo, dando-se uma colisão.

Cada SU que disputa um canal inicializa um temporizador com um tempo aleatório dentro de uma janela de contenção. Este temporizador é decrementado por cada *slot* que o canal é detectado disponível. À medida que os temporizadores expiram os SU realizam as transmissões. Quando um temporizador expira, o SU correspondente acede ao meio e os outros SUs suspendem a sua contagem e reiniciam-na quando o SU terminar a transmissão.

A janela de contenção é inicializada com um valor e este é duplicado a cada contenção

até um limite máximo previamente definido. O pacote é descartado caso esse limite seja atingido. Os SUs têm que suspender os seus temporizadores, por um período pré-definido, sempre que é detectada actividade da rede primária.

Os autores apresentam expressões e resultados para quatro parâmetros de desempenho em função da carga gerada pela rede, para 10, 30 e 50 SUs. Observa-se que a partir dos 0.6-0.8 Mbits/sec os parâmetros mudam a sua tendência. O débito, que cresce linearmente até este ponto, estabiliza. O atraso médio dos pacotes dispara abruptamente tal como o tamanho da fila de espera. O tempo de serviço sobe significativamente. Este ponto de funcionamento tem um grande impacto no desempenho do protocolo pois é quando a rede atinge o ponto de saturação em termos de tráfego gerado pela rede secundária.

Com o mecanismo de PTS/RTS/CTS, as colisões só acontecem nos pacotes PTS e RTS o que representa um período bastante curto face às transmissões com sucesso, que incluem o pacote de dados. Assim as colisões têm um impacto muito menor do que no CR-ALOHA e CR-CSMA o que faz com que o seu débito seja superior.

Em jeito de conclusão, a Tabela 2.1 compara algumas características dos diversos protocolos referidos anteriormente.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Sincronização entre SUs (slotted)	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Sincronização entre SUs e PUs	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Tipo de Sensing	EBS	EBS	EBS	EBS	EBS
Sincronização no sensing	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Contenção	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Canal de controlo comum	Não	Não	Não	Não	Não
Suporte para múltiplos canais	Não	Não	Sim	Não	Sim

Tabela 2.1: Comparação de protocolos descritos no capítulo: (1)CR-ALOHA; (2)CR-CSMA; (3)CR-CSMA/CA; (4)*Double Stage with Reservation*; (5)Acesso estocástico.

Capítulo 3

Metodologia Aplicada

3.1 Descrição dos cenários

Nos protocolos que operam em canal único, é comum considerar-se que os SUs têm uma visão igual da ocupação do canal, proveniente da rede primária. Estes cenários são considerados homogêneos relativamente à ocupação do canal por parte dos SUs. Por vezes, considera-se alguma dissemelhança resultante apenas da técnica de *sensing*, mas estes casos podem não ter impacto no desempenho do protocolo, pois podem depender muito da taxa de ocupação do canal por parte dos PUs. No entanto, para além da dissemelhança inserida pela técnica de *sensing*, existem outros factores que podem contribuir para a dissemelhança na avaliação do canal, tais como: diferentes distâncias aos utilizadores primários, que provocam diferentes atenuações devido aos efeitos de propagação; diferentes níveis de ocupação do canal por partes dos utilizadores primários; ou ainda a existência de obstáculos que provoquem fortes atenuações nas transmissões dos utilizadores primários. Estes factores criam cenários heterogêneos quanto à visão que os SUs têm do canal. Nesta dissertação pretende-se estudar os efeitos destes factores no desempenho dos protocolos implementados.

Os cenários heterogêneos são classificados segundo uma característica que meça a dissemelhança na observação do estado de ocupação do canal por parte dos diferentes nós secundários. A dissemelhança é definida através da média das correlações entre as visões dos diferentes SUs. No entanto, no desenvolvimento destes cenários considera-se também o desvio padrão das correlações de cada um, que deve ser inferior a um determinado limite,

e a disponibilidade do canal, que deve ser semelhante para todos os SUs de forma a que a média de ocupação do canal avaliada pelos SUs seja muito semelhante entre eles..

São considerados quatro tipos de cenários: um cenário homogéneo, em que todos os SUs têm a mesma visão do canal, e três cenários heterogéneos com diferentes níveis de dissemelhança:

- Baixa dissemelhança
- Média dissemelhança
- Alta dissemelhança

Para cada tipo de cenário anteriormente descrito, são criados dois cenários em que se varia a disponibilidade do canal proveniente da ocupação dos PUs. Para todos os tipos de cenários são colocadas diferentes quantidades de SUs, sempre dispostos especialmente de uma forma aleatória. Apenas um SU é colocado propositadamente, o *Secondary Access Point* (SAP). Esta opção deriva do facto do SAP ser o receptor de todas as transmissões da rede secundária e portanto a sua visão do canal tem um grande impacto no débito útil. Para além disso, o SAP não realiza transmissões.

Ao contrário dos SUs, os PUs são colocados propositadamente de forma a obter a heterogeneidade e disponibilidade do canal pretendidas.

Os cenários heterogéneos são criados com uma topologia diferente do homogéneo.

Cenário homogéneo

No cenário homogéneo é colocado um PU no centro de um quadrado e os SUs são colocados de forma aleatória dentro desse quadrado. A Figura 3.1 ilustra um exemplo de um cenário homogéneo com 30 SUs.

Ao colocar todos os SUs dentro do raio de cobertura do PU, estes detectam o PU sempre que ele transmite e nunca o detectam quando ele não transmite. Desta forma todos os SUs têm uma visão igual em termos da ocupação da banda em que operam.

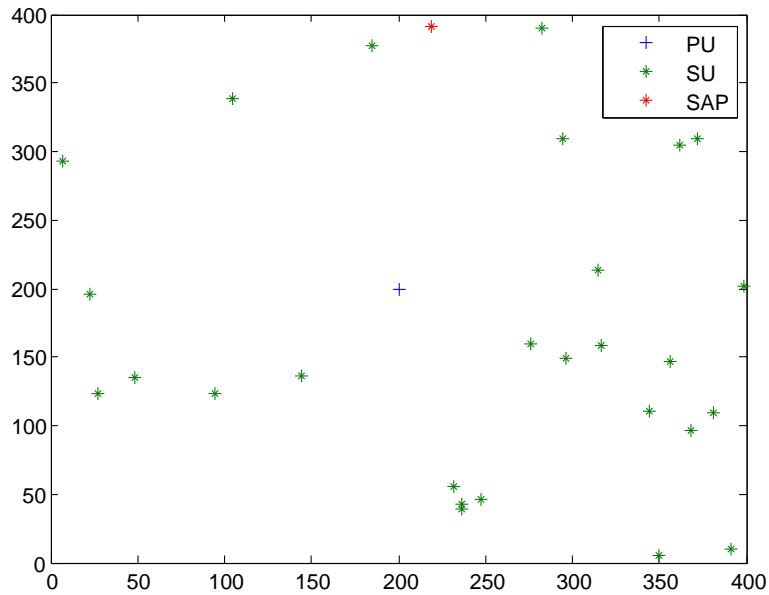


Figura 3.1: Cenário homogêneo com 30 SUs.

Cenário heterogêneo de baixa dissemelhança

Como referido, nos cenários heterogêneos o SAP foi colocado propositadamente no centro do cenário de simulação. Desta forma evita-se que o SAP fique posicionado aleatoriamente em pontos em que pode observar maior ou menor ocupação da rede primária, o que causa um grande impacto no débito útil, em que se considera o sucesso na recepção.

O cenário heterogêneo de baixa dissemelhança contém dois PUs a diferentes distâncias dos SUs. O comportamento do PU mais próximo tem maior influência na visão dos SUs sobre o canal. Existe uma grande semelhança entre o comportamento deste PU e a visão dos SUs do canal. As transmissões do PU mais longínquo sofrem bastante atenuação devido aos efeitos de propagação, introduzindo assim uma pequena dissemelhança na avaliação do estado de ocupação do canal realizado pelos SUs. Com uma elevada contribuição de um PU e reduzida de outro, a correlação entre as visões dos SUs é alta, representando um cenário de baixa dissemelhança.

A Figura 3.2 ilustra um exemplo de um cenário heterogêneo de baixa dissemelhança com 30 SUs.

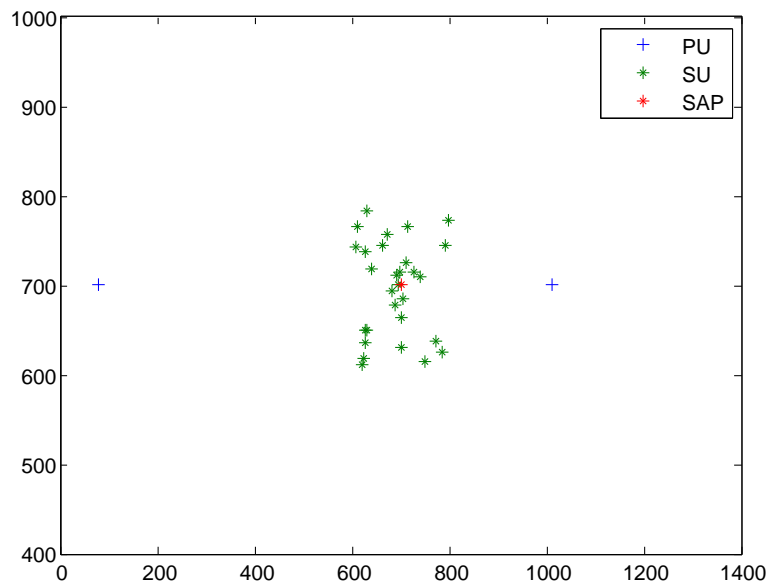


Figura 3.2: Cenário heterogéneo de baixa dissimilaridade com 30 SUs.

Cenário heterogéneo de média dissimilaridade

Neste cenário são utilizados 3 PUs. Dois são colocados à mesma distância do quadrado que delimita a área dos SUs e outro mais próximo. Novamente, o PU mais próximo tem maior influência na visão dos SUs, porém não tem tanta como no cenário de baixa dissimilaridade. A Figura 3.3 demonstra um exemplo de cenário de média dissimilaridade para 30 SUs.

Cenário heterogéneo de alta dissimilaridade

O cenário de alta dissimilaridade inclui 4 PUs posicionados simetricamente na área de simulação, tal como representado na Figura 3.4. Os SUs são posicionados de forma a que o sinal recebido dos PUs sofra elevada atenuação. Logo, existe uma grande variação nas observações do estado de ocupação do canal levadas a cabo pelos diferentes SUs. Como pretendido, este facto provoca a alta dissimilaridade entre as visões dos diferentes SUs. O cenário heterogéneo de alta dissimilaridade pode ser observado na Figura 3.4.

Note-se que embora se aumente o número de PUs à medida que se aumenta a heterogeneidade, a disponibilidade do canal para cada SU mantém-se constante. A geração de tráfego de cada PU é sempre igual em todos os cenários (quando se considera o mesmo

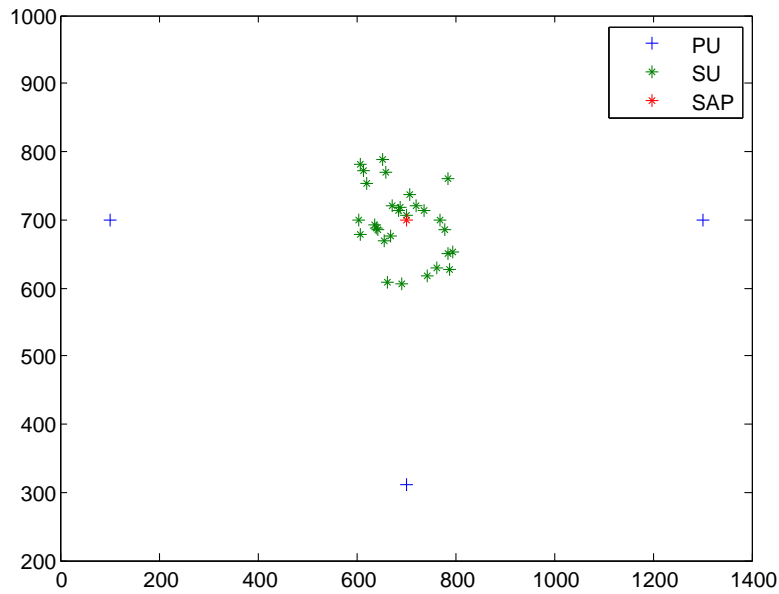


Figura 3.3: Cenário heterogêneo de média dissemelhança com 30 SUs.

valor de disponibilidade do canal). Quando se aumenta o número de PUs, aumenta-se também a distância destes aos SUs, caso contrário a disponibilidade do canal diminuía, e assim é possível aumentar a heterogeneidade mantendo a mesma disponibilidade do canal para cada SU.

Como referido anteriormente a heterogeneidade é avaliada com base nos resultados de *sensing* de cada SU. Considere-se \vec{P}_i o vector que contém as l decisões de um SU durante um determinado período temporal. É adoptado o coeficiente de correlação produto-momento de *Pearson* entre o vector \vec{P}_i de cada SU com os restantes, obtendo-se a matriz de correlação

$$R = \begin{bmatrix} \sqrt{r_{1,1}^2} & \sqrt{r_{1,2}^2} & \dots & \sqrt{r_{1,n}^2} \\ \sqrt{r_{2,1}^2} & \sqrt{r_{2,2}^2} & \dots & \sqrt{r_{2,n}^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{r_{n,1}^2} & \sqrt{r_{n,2}^2} & \dots & \sqrt{r_{n,n}^2} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde $r_{i,j}$ designa o coeficiente de correlação de *Pearson* entre os SUs i e j calculado segundo a expressão

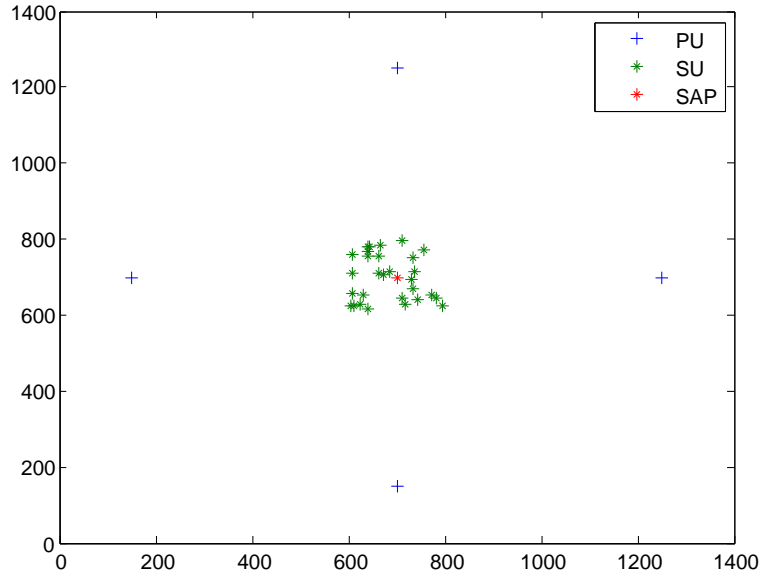


Figura 3.4: Cenário heterogêneo de alta dissimilaridade com 30 SUs.

$$r_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^l (\vec{P}_i(k) - \mathbb{E}[\vec{P}_i]) (\vec{P}_j(k) - \mathbb{E}[\vec{P}_j])}{\sqrt{\sum_{k=1}^l (\vec{P}_i(k) - \mathbb{E}[\vec{P}_i])^2} \sqrt{\sum_{k=1}^l (\vec{P}_j(k) - \mathbb{E}[\vec{P}_j])^2}}, \quad (3.2)$$

representando \mathbb{E} o valor esperado do vector com as l decisões.

Para cada cenário criado considerando n nós, \bar{R} é a medida de dissimilaridade dada pela média da matriz triangular superior de R sem considerar os valores da diagonal (que são iguais a 1). O desvio padrão de R é designado por σ . Tendo em conta o impacto dos resultados de *sensing* do SAP, as Tabelas 3.1-3.8 representam, para além de \bar{R} e σ , a ocupação vista pelo SAP e a média da ocupação vista por todos os SUs, \bar{x} , para todos os cenários criados.

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{x}	0,096	0,101	0,097	0,103	0,103	0,101	0,101	0,096	0,102	0,104

Tabela 3.1: Parâmetros do cenário homogêneo com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.

Num cenário homogêneo, dado que as visões dos SUs do canal são todas iguais, \bar{R} é igual a 1 e o σ é igual a 0. No cenário de baixa dissimilaridade obtêm-se aproximadamente valores entre 0.71-0.87 para \bar{R} . Os resultados encontram-se representados na Tabela 3.2. Existe uma pequena oscilação, cerca de 1%, na visão que o SAP tem da ocupação do canal

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{R}	0,781	0,868	0,807	0,824	0,757	0,725	0,711	0,781	0,760	0,768
σ	0,082	0,047	0,088	0,067	0,112	0,106	0,109	0,105	0,098	0,099
SAP	0,101	0,098	0,102	0,107	0,106	0,106	0,109	0,106	0,109	0,101
\bar{x}	0,107	0,098	0,101	0,105	0,101	0,101	0,103	0,103	0,105	0,097

Tabela 3.2: Parâmetros do cenário heterogéneo de baixa dissemelhança com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.

em todos os cenários de ocupação da rede primária próxima de 10%. O mesmo acontece na ocupação média, \bar{x} .

No cenário de média dissemelhança, \bar{R} varia entre 0.46-0.52, como mostra a Tabela

3.3. O cenário de alta dissemelhança é o que apresenta a menor oscilação de \bar{R} . Os valores

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{R}	0,514	0,487	0,460	0,508	0,461	0,487	0,460	0,522	0,492	0,501
σ	0,099	0,088	0,101	0,127	0,108	0,087	0,094	0,111	0,104	0,113
SAP	0,103	0,104	0,102	0,105	0,097	0,101	0,010	0,101	0,101	0,108
\bar{x}	0,104	0,100	0,097	0,104	0,096	0,102	0,096	0,105	0,010	0,107

Tabela 3.3: Parâmetros do cenário heterogéneo de média dissemelhança com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.

encontram-se bastante próximos de 0.3 como se verifica na Tabela 3.4.

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{R}	0.300	0.303	0.302	0.297	0.305	0.305	0.305	0.299	0.304	0.301
σ	0.019	0.026	0.020	0.022	0.021	0.027	0.029	0.027	0.023	0.026
SAP	0.097	0.096	0.097	0.092	0.098	0.101	0.101	0.101	0.097	0.097
\bar{x}	0.100	0.101	0.099	0.098	0.102	0.105	0.106	0.105	0.102	0.103

Tabela 3.4: Parâmetros do cenário heterogéneo de alta dissemelhança com aproximadamente 10 % de ocupação da rede primária.

O parâmetro σ , que representa o desvio padrão de R para cada cenário com n SUs, tem sempre um valor suficientemente baixo, indicando que a dispersão da heterogeneidade é aproximadamente igual para todos os SUs.

A criação dos cenários com maior ocupação da rede primária é feita alterando o tráfego gerado pelos PUs. Para além disso, são feitos apenas alguns pequenos ajustes nas posições dos PUs, de forma a que o SAP tenha uma visão da ocupação do canal muito semelhante em todos os cenários. Pretende-se com isso, avaliar apenas o impacto da heterogeneidade

sem influência da ocupação do canal, vista pelo SAP. Os dados referentes aos cenários com maior ocupação da rede primária estão contidos nas Tabelas 3.5-3.8.

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{x}	0,330	0,315	0,321	0,313	0,318	0,320	0,315	0,303	0,309	0,321

Tabela 3.5: Parâmetros do cenário homogêneo com aproximadamente 31 % de ocupação da rede primária.

Dada a natureza dos cenários, existe sempre uma oscilação na percentagem de ocupação do canal pelos PUs (\bar{x}) e na ocupação do canal vista pelo SAP. Os cenários de maior ocupação da rede primária apresentam uma oscilação ligeiramente superior aos de menor ocupação, próxima de 3%. O cenário de baixa dissemelhança apresenta para \bar{R} valores semelhantes ao seu homólogo de menor ocupação, como se verifica na a Tabela 3.6.

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{R}	0,727	0,754	0,709	0,800	0,762	0,731	0,702	0,755	0,747	0,785
σ	0,109	0,099	0,099	0,089	0,104	0,115	0,117	0,010	0,107	0,102
SAP	0,325	0,309	0,314	0,317	0,323	0,325	0,317	0,304	0,314	0,319
\bar{x}	0,313	0,300	0,300	0,312	0,314	0,311	0,300	0,300	0,302	0,313

Tabela 3.6: Parâmetros do cenário heterogêneo de baixa dissemelhança com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.

Os parâmetros referentes ao cenário de média dissemelhança com maior ocupação da rede primária encontram-se na Tabela 3.7. Neste caso, o intervalo em que estão compreendidos os valores de \bar{R} é ligeiramente superior ao seu homólogo. Os valores estão compreendidos entre 0.48 e 0.55 como se verifica na Tabela 3.7.

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{R}	0,535	0,494	0,545	0,551	0,499	0,522	0,539	0,506	0,551	0,484
σ	0,058	0,082	0,089	0,075	0,076	0,088	0,078	0,097	0,091	0,091
SAP	0,309	0,314	0,307	0,304	0,303	0,311	0,312	0,312	0,313	0,311
\bar{x}	0,309	0,312	0,321	0,318	0,302	0,315	0,319	0,310	0,326	0,304

Tabela 3.7: Parâmetros do cenário heterogêneo de média dissemelhança com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.

No cenário de alta dissemelhança os valores de \bar{R} encontram-se muito próximos de 0.35, como se verifica na Tabela 3.8.

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{R}	0,349	0,350	0,350	0,351	0,344	0,348	0,349	0,349	0,351	0,344
σ	0,011	0,014	0,024	0,015	0,022	0,020	0,019	0,024	0,021	0,022
SAP	0,314	0,314	0,306	0,305	0,316	0,321	0,303	0,314	0,313	0,313
\bar{x}	0,319	0,318	0,319	0,311	0,325	0,332	0,314	0,323	0,323	0,324

Tabela 3.8: Parâmetros do cenário heterogêneo de alta dissemelhança com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.

3.2 Comportamento dos PUs

Geração de tráfego dos PUs

O tráfego gerado por cada PU é composto por duas distribuições geométricas de médias λ_{OFF} e λ_{ON} . Uma distribuição para o período *OFF* (em que o PU não está a transmitir) e outra para o período *ON* (em que está a transmitir). A probabilidade de um PU transmitir num determinado instante é dada por $P_{ON}^{PU} = \lambda_{ON}/(\lambda_{ON} + \lambda_{OFF})$ e de não transmitir é dada por $P_{OFF}^{PU} = \lambda_{OFF}/(\lambda_{ON} + \lambda_{OFF})$. Estes períodos acontecem intercaladamente. Cada PU é uma fonte independente de tráfego para o canal e todos têm em média a mesma ocupação. Quando um PU transmite, este emite uma potência P_{TX} .

3.3 Condições de propagação

As transmissões dos PUs são afectadas por três fenómenos, são eles:

Path loss

É utilizado o modelo de *path loss* de espaço livre segundo a expressão:

$$L = \frac{1}{d^\alpha} \quad (3.3)$$

com $\alpha = 2$ em que L é a atenuação sofrida pela transmissão à distância d do PU que transmite.

Slow fading

O *slow fading* (desvanecimento lento) G_{SF} é modelado por uma distribuição log-normal com média μ e desvio padrão σ , cuja função de densidade de probabilidade (PDF) é dada por $f_X(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$, $x > 0$.

Fast fading

O *fast fading* (desvanecimento rápido) G_{FF} é modelado através de uma distribuição de Rayleigh com desvio padrão σ , com PDF $f_X(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$, $x \geq 0$

Num dado instante, a potência que chega a um SU proveniente de uma transmissão de um PU é dada por

$$P_{PU} = P_{TX} \times L \times G_{FF} \times G_{SF} \quad (3.4)$$

Considerando que no mesmo instante existem n PUs a transmitir, a potência captada por um SU é dada por

$$P = P_{PU1} + P_{PU2} + \dots + P_{PU_n} + Z \quad (3.5)$$

em que Z representa o ruído modelado a partir de uma distribuição normal com média nula e desvio padrão σ , $Z = \mathcal{N}(0, \sigma)$.

A Tabela 3.9 sumariza as parametrizações utilizadas para os efeitos de propagação.

	Fast Fading	Slow Fading	Z
μ	-	3	0
σ	3	1.2	1

Tabela 3.9: Parâmetros de propagação.

3.4 *Framing* do protocolo de acesso dos SUs

Neste trabalho é utilizado como unidade de tempo o *slot*. Considera-se a sincronização entre SUs ao nível do *slot*. Entre PUs existe uma sincronização ao nível das tramas. Os três

protocolos implementados têm ligeiras diferenças quanto ao *framing* utilizado. De seguida será explicado esse processo em cada um dos três protocolos por ordem de complexidade.

3.4.1 CR-ALOHA

A trama utilizada neste protocolo tem a estrutura representada na Figura 3.5.

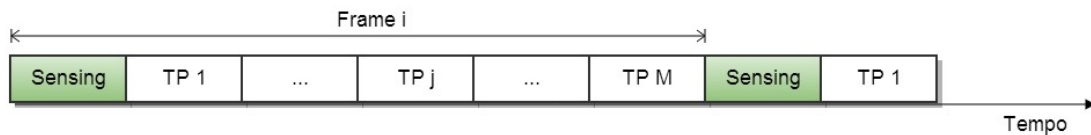


Figura 3.5: Estrutura da trama no protocolo CR-ALOHA.

A trama é constituída por um *slot* de *sensing* e M *slots* de transmissão, neste caso designados por períodos de transmissão (TP). As transmissões dos PUs começam no início da trama e prolongam-se até ao final desta, nunca alterando o seu estado durante o decorrer da trama. Os SUs reservam o primeiro *slot* para realizar o *sensing* e decidir se existe ou não transmissões de PUs nessa trama. Por sua vez as transmissões dos SUs têm lugar nos TPs e ocupam um TP por transmissão.

3.4.2 CR-CSMA

Neste protocolo a estrutura da trama é semelhante. Os TPs foram divididos em *slots* como ilustra a Figura 3.6

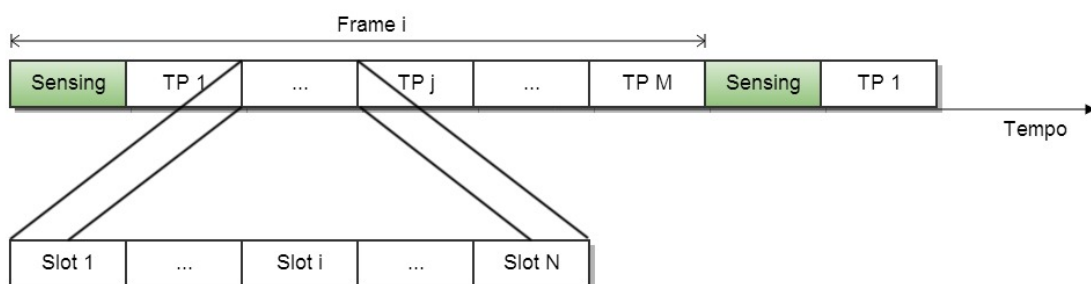


Figura 3.6: Estrutura da trama no protocolo CR-CSMA.

Ao contrário das transmissões dos SUs no protocolo anterior, neste podem começar

em qualquer *slot*, não estando sincronizadas com os *TPs*. Contudo estas têm a mesma duração (um *TP*), ou seja N *slots*.

3.4.3 CR-CSMA/CA

Embora se mantenha a estrutura *slotted*, neste protocolo a estrutura das tramas anteriores foi parcialmente abandonada. Neste caso apenas existe sincronização dos *slots*. É alterada também a estrutura cíclica das tramas pois o *sensing* é feito pelos SUs apenas quando existe intenção de transmitir, ou seja de forma assíncrona.

As transmissões de dados dos SUs ocupam um determinado número de *slots* predefinido, assim como as transmissões dos PUs. Neste cenário os PUs mantêm-se sincronizados entre eles e os *slots* dos SUs estão sincronizados com as transmissões dos PUs.

3.5 Spectrum Sensing

O *sensing* é realizado através da técnica de *sensing* EBS. Foi escolhida pela sua simplicidade. Como referido anteriormente, esta técnica baseia-se na amostragem da potência do canal. Para cada decisão o SU retira N_S amostras e calcula a energia recebida segundo a expressão

$$Y = \sum_{i=1}^{N_S} |P(i)|^2, \quad (3.6)$$

em que $P(i)$ representa a potência recebida na amostra i considerada na equação (3.5).

Para cada amostra existem duas hipóteses possíveis

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_0 : P(i) &= w(n) & n &= 1, 2, \dots, N_S \\ \mathcal{H}_1 : P(i) &= w(n) + s(n) & n &= 1, 2, \dots, N_S \end{aligned} \quad (3.7)$$

onde $w(n)$ representa o ruído branco aditivo Gaussiano (AWGN) com média nula e variância unitária, isto é, $w(n) = \mathcal{N}(0, 1)$ e $s(n)$ representa o sinal transmitido pelos PUs. Considerando que a quantidade de PUs que transmitem num instante de amostragem é suficientemente elevada é possível afirmar que $s(n)$ segue uma distribuição Gaussiana. Assim considera-se que $s(n)$ segue uma distribuição Gaussiana com média μ e desvio padrão σ , ou seja, $s(n) = \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$.

A condição \mathcal{H}_0 representa a ausência de transmissões provenientes de PUs e \mathcal{H}_1 a condição em que existe uma ou mais transmissões de PUs. A decisão do SU para uma trama resulta da comparação de Y com um determinado limiar γ .

Sob a hipótese \mathcal{H}_0 a variável Y segue uma distribuição chi-quadrado centralizada com $2N_S$ graus de liberdade. Sob a hipótese \mathcal{H}_1 , Y segue uma distribuição chi-quadrado descentralizada, com o parâmetro de descentralização λ representando a relação sinal-ruído (SNR).

Se N_S for suficientemente elevado, é possível utilizar o Teorema do Limite Central e aproximar a distribuição de chi-quadrado à Gaussiana

$$Y \sim \begin{cases} \mathcal{N}(N_S, 2N_S), & \mathcal{H}_0, \\ \mathcal{N}(N_S + \lambda, 2(N_S + 2\lambda)) & \mathcal{H}_1. \end{cases} \quad (3.8)$$

Então, para um único SU a probabilidade de detecção P_D e probabilidade de falso alarme P_{FA} são representadas por

$$P_D = Pr(y > \gamma | \mathcal{H}_1) = \mathcal{Q}\left(\frac{\gamma - (N_S + \lambda)}{\sqrt{2(N_S + 2\lambda)}}\right) \quad (3.9)$$

$$P_{FA} = Pr(y > \gamma | \mathcal{H}_0) = \mathcal{Q}\left(\frac{\gamma - N_S}{\sqrt{2N_S}}\right) \quad (3.10)$$

onde $\mathcal{Q}(\cdot)$ representa a função de distribuição acumulada complementar.

Capítulo 4

Caracterização do desempenho

Este Capítulo, começa por caracterizar o desempenho obtido pelos diferentes protocolos num cenário homogéneo. Estuda-se ainda o efeito que a heterogeneidade das decisões de ocupação do canal por parte dos SUs tem no desempenho dos protocolos CR-ALOHA, CR-CSMA e CR-CSMA/CA. Os protocolos são caracterizados, através do débito obtido, em cenários iguais aos propostos nos artigos onde os protocolos foram originalmente apresentados e posteriormente simulados nos cenários descritos no Capítulo 3.

4.1 Caracterização

4.1.1 *slotted* CR-ALOHA

Após realizar o *sensing*, se não for detectada nenhuma transmissão de PU(s), é implementado o acesso da rede secundária ao meio através do protocolo *slotted* CR-ALOHA, durante uma trama, como representado na Figura 3.5. Como referido anteriormente, a técnica de *sensing* utilizada é o EBS. Os autores do protocolo definem uma probabilidade de detecção P_D , e uma probabilidade de falso alarme P_{FA} . O tráfego gerado por um PU é composto por duas distribuições geométricas. Estas são compostas pelos parâmetros λ_{ON} , período em que o PU está activo, e λ_{OFF} , período em que está inactivo. Por simplificação, considera-se que o início das tramas da rede secundária e o início das transmissões da rede primária estão sincronizadas. No caso da rede secundária, cada SU é uma fonte independente de tráfego. O ritmo da sua geração de pacotes por TP , é modelado por uma

distribuição de *Poisson*, com parâmetro λ_i . Cada simulação é composta por N_f tramas e cada trama contém N_{TP} *TPs*. Cada cenário composto por n SUs é simulado M vezes. A parametrização utilizada é apresentada na Tabela 4.1

P_D	P_{FA}	λ_{ON}	λ_{OFF}	λ_i	N_f	N_{TP}	M
0.95	0.1	0.99	0.01	0.02	5000	50	15

Tabela 4.1: Parâmetros de caracterização de *slotted* CR-ALOHA

Quando chega um pacote para ser transmitido, o SU tentará transmiti-lo no *TP* seguinte. Caso aconteça uma colisão entre a transmissão de dois ou mais SUs, estes vão entrar num período de contenção. A duração da contenção é aleatória e segue uma distribuição uniforme. Não é descrito o valor da janela de contenção em [CYCMWC11]. No entanto, dados os valores de débito obtidos no artigo, esse valor é ajustado em função do número de SUs que caracterize o protocolo. Através de simulações com diferentes valores para a janela de contenção, chega-se à conclusão que um valor de janela muito elevado, provoca um aumento de débito pouco acentuado, pois o canal encontra-se livre durante muito tempo. Pelo contrário, um valor de janela muito baixo, faz com que o débito aumente muito rapidamente quando o número de SUs é baixo, ou que diminua abruptamente quando o número de SUs é elevado. Este comportamento justifica-se dada a persistência com que tentam transmitir, o que com poucos SUs provoca uma grande ocupação do meio e com muitos SUs aumenta o número de colisões. O valor da janela de contenção adoptado pelos seus autores é 100 *TPs*. A Figura 4.1 ilustra o débito obtido com as parametrizações que se encontram na Tabela 4.1. O débito é calculado segundo a expressão $S = T_S/T_T$ em que T_S designa o período de transmissões com sucesso, em que apenas 1 SU transmite, com ou sem interferência da rede primária, e T_T o período total de simulação.

Considerando $G = n\lambda_i$, o tráfego gerado pela rede secundária, observa-se na Figura 4.1 que o débito atinge o seu máximo em $n = 50$, ou seja, $G = 1$. Este é o ponto de saturação da geração de tráfego dos nós secundários. Para $n < 50$ o canal ainda não se encontra saturado. Por isso, o débito aumenta com o aumento de n . Para $n > 50$, o canal fica saturado e o aumento de n provoca o aumento das colisões e a diminuição do débito. Considerando T_X o período em que o canal está ocupado por transmissões da rede

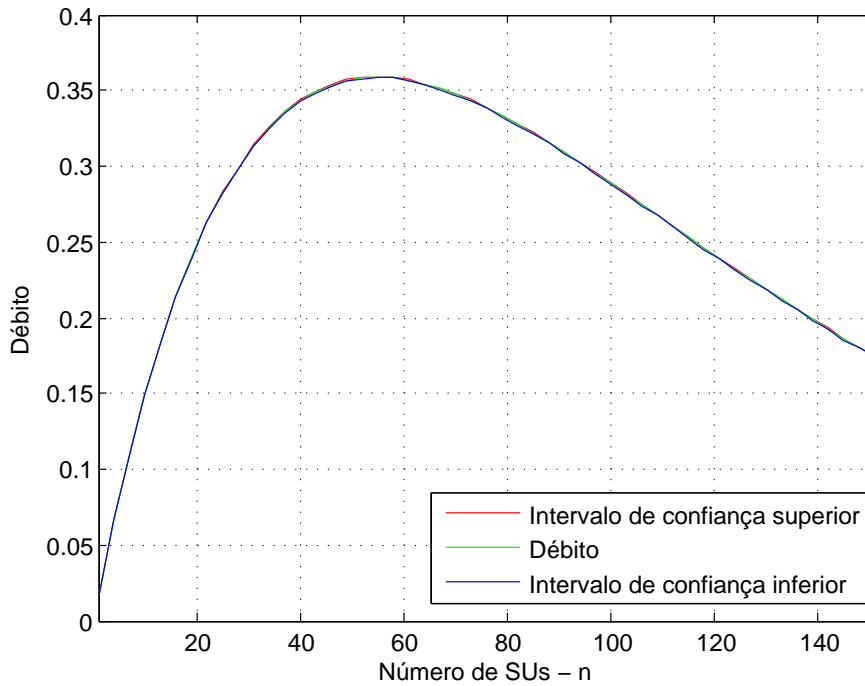


Figura 4.1: Débito obtido para caracterização do protocolo *slotted* CR-ALOHA.

secundária e T_C o período em que ocorrem colisões nas transmissões da rede secundária, então o rácio de colisões é dado por $R_{col} = T_C/T_X$. Como era de esperar, R_{col} aumenta quase linearmente até a saturação do canal. Após a saturação, continua a aumentar, embora mais lentamente. A Figura 4.2 ilustra a evolução de R_{col} .

4.1.2 CR-CSMA

Como referido no Capítulo 2, o protocolo CR-CSMA apresenta menos colisões nas transmissões da rede secundária do que o *slotted* CR-ALOHA devido ao *sensing* realizado pelos nós da rede secundária. No protocolo CR-CSMA [CYCMWC09], a probabilidade de detecção é calculada através da expressão $P_D = P_{noc}^{1/n}$ em que P_{noc} designa a probabilidade de uma transmissão da rede secundária não colidir com uma transmissão da rede primária e n o número de SUs. O *sensing* é realizado durante um TP . O tráfego gerado pela rede primária e secundária seguem as mesmas distribuições e sincronização que no protocolo *slotted* CR-ALOHA. Cada simulação é realizada durante N_f tramas. Cada trama é composta por N_{TP} TP s. Por sua vez, cada TP é composto por M_{ST} $slots$, o que não acontece no protocolo *slotted* CR-ALOHA. Cada cenário composto por n SUs é simulado

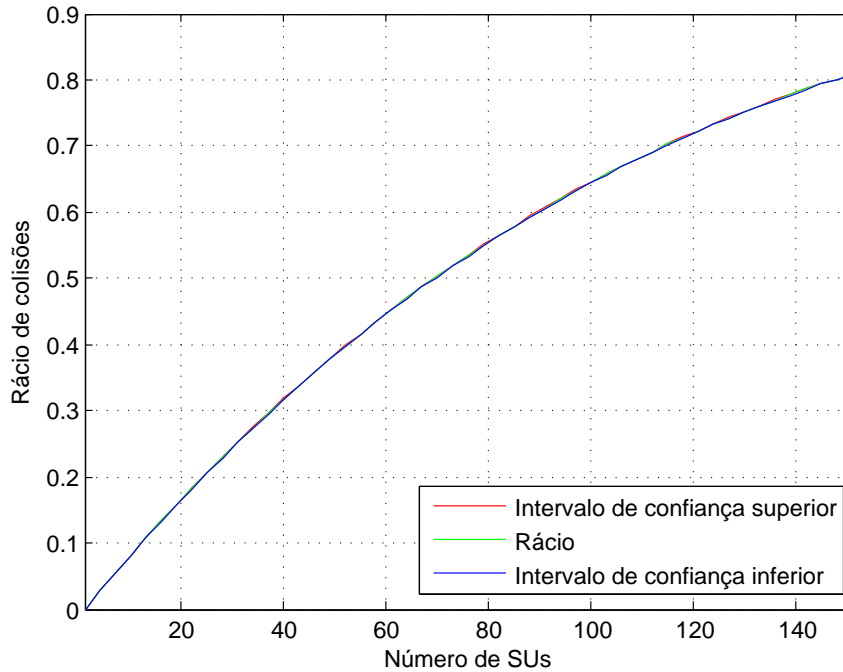


Figura 4.2: Rácio de colisões protocolo *slotted* CR-ALOHA, $R_{col} = T_C/T_X$.

M vezes. A parametrização está demonstrada na Tabela 4.2. Tal como o protocolo *slotted* CR-ALOHA, o CR-CSMA é caracterizado através do débito obtido, calculado da mesma forma.

P_{noc}	P_{FA}	λ_{ON}	λ_{OFF}	λ_i	N_f	N_{TP}	M_{ST}	M
0.9	0.1	0.99	0.01	0.02	2000	50	20	15

Tabela 4.2: Parâmetros de caracterização de CR-CSMA

Neste protocolo os autores também não especificam o valor da janela de contenção. Esse valor é obtido da mesma forma que no protocolo *slotted* CR-ALOHA pois o débito apresenta o mesmo comportamento em função da janela de contenção. O valor utilizado é 1700 *slots*. Considerando $G = n\lambda_i$ o tráfego gerado pela rede primária, o débito máximo é atingido em $G = 1$, tal como no protocolo *slotted* CR-ALOHA e pelas mesmas razões. O débito obtido pode ser observado na Figura 4.3. Embora a curva do débito apresente um comportamento semelhante ao protocolo CR-ALOHA, é de realçar que o protocolo CR-CSMA apresenta valores de débito mais elevados. Este valor é explicado pelo *sensing* realizado antes das transmissões, o que permite evitar colisões. A diminuição de colisões nas transmissões da rede secundária pode ser observada na Figura 4.4, que demonstra o

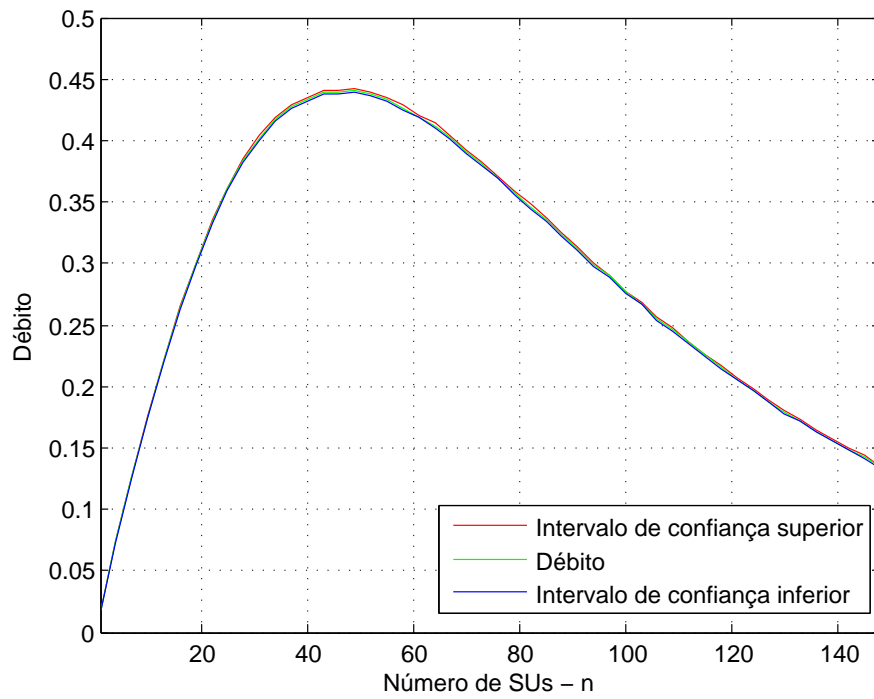


Figura 4.3: Débito obtido para caracterização do protocolo CR-CSMA.

rácio de colisões.

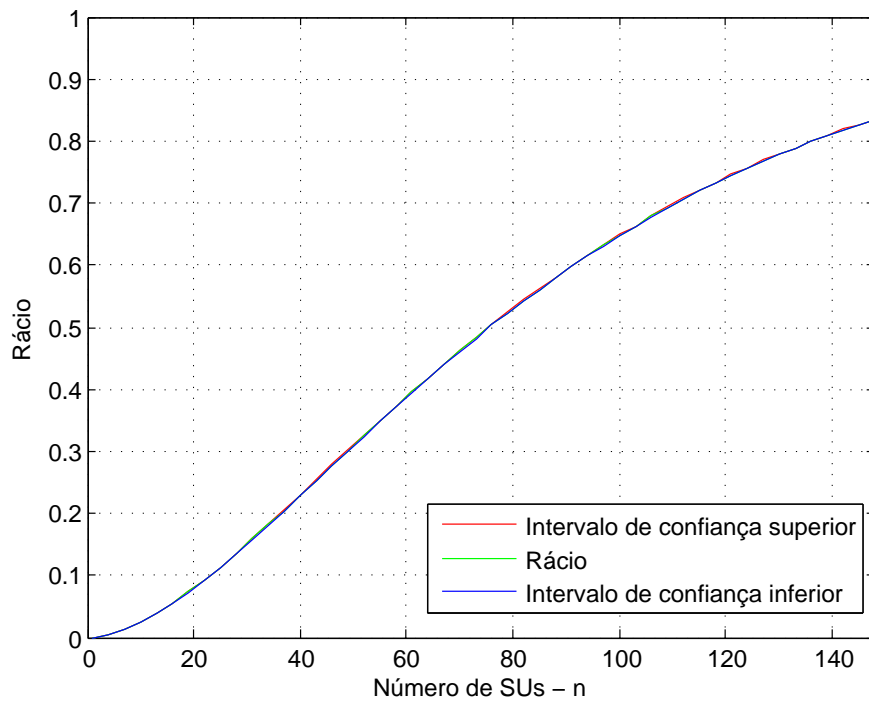


Figura 4.4: Rácio de colisões protocolo CR-CSMA, $R_{col} = T_C/T_X$.

Como se pode observar, o rácio de colisões é menor enquanto o tráfego gerado não satura o canal de transmissões. Próximo da saturação, o rácio de colisões aumenta bastante e de seguida tem um comportamento semelhante ao rácio de colisões apresentado pelo protocolo *slotted* CR-ALOHA.

Como foi referido no Capítulo 2, o protocolo CR-CSMA/CA em [CYCMWC13], apresenta colisões entre transmissões de SUs apenas nos pacotes PTS e RTS e nunca entre pacotes de dados, o que representa um período de colisão bastante inferior ao período de transmissão de dados. Esta é uma das razões pela qual o protocolo CR-CSMA/CA apresenta um débito superior aos outros dois protocolos.

4.1.3 CR-CSMA/CA

Para a caracterização do protocolo CR-CSMA/CA, considera-se que as actividades da rede primária seguem as mesmas distribuições que nos protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA. Apesar da estrutura das tramas ter sido abandonada, cada transmissão de um PU dura múltiplos de 1000 *slots*. Os parâmetros λ_{ON} e λ_{OFF} tomam os valores 0.09 e 0.01 respectivamente. A alteração destes valores, embora se mantenha a mesma relação, advém do facto dos valores utilizados para os dois protocolos anteriores provocarem a alteração do comportamento dos PUs mais frequentemente. Ao alterarem o seu comportamento mais frequentemente, existe uma maior probabilidade de ser detectada actividade da rede primária durante o período de *sensing* da rede secundária o que provoca a diminuição do débito deste protocolo. A actividade da rede secundária tem um comportamento diferente dos protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA. Os SUs têm sempre um pacote para transmitir, o que faz com que o protocolo seja caracterizado através do débito máximo para cada quantidade de SUs. A Tabela 4.3 descreve os parâmetros utilizados nas simulações.

P_D	P_{FA}	N_f	M
0.9	0.01	10000	10

Tabela 4.3: Parâmetros de caracterização do protocolo CR-CSMA/CA

Antes de realizar uma transmissão de dados, existe uma troca de pacotes entre o SU transmissor e o SAP. A Tabela 4.4 apresenta a duração dos pacotes utilizados assim como a janela de contenção inicial (CW), duração do *Sensing* espectral (SS), número de

tentativas de transmissão de um pacote (m) e duração do bloqueio após a detecção de actividade da rede primária (BP).

$slots$	PTS	RTS	CTS	Dados	Ack	DIFS	SIFS	CW	SS	m	BP
	15	18	15	400	15	3	1	32	25	5	988

Tabela 4.4: Duração dos pacotes do protocolo CR-CSMA/CA

O protocolo CR-CSMA/CA é caracterizado através do débito obtido, tal como os protocolos anteriores. Este está ilustrado na Figura 4.5.

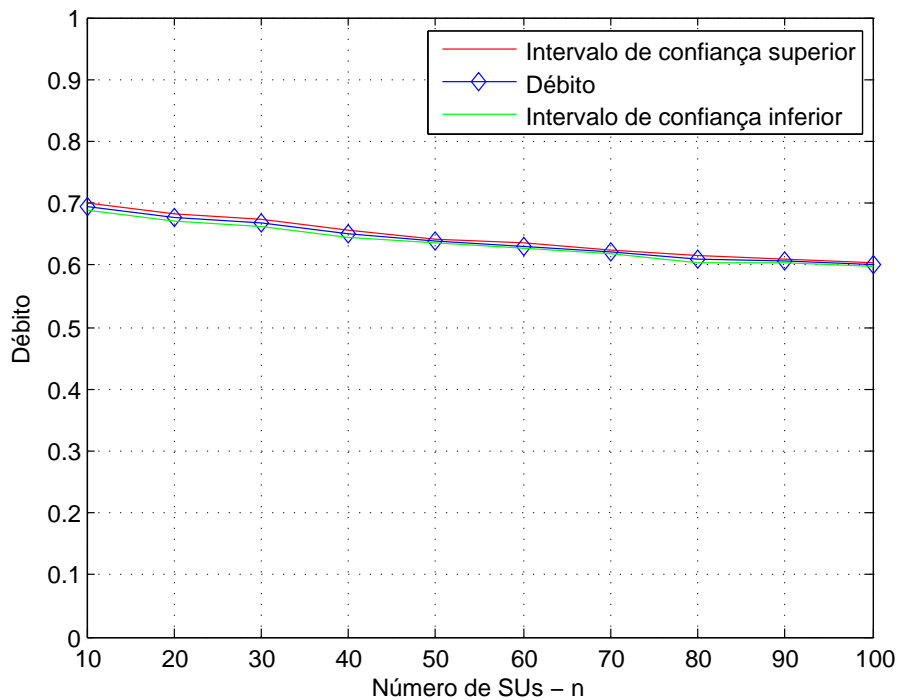


Figura 4.5: Débito obtido para caracterização do protocolo CR-CSMA/CA.

Para além de não apresentar colisões entre transmissões de SUs nos pacotes de dados, o protocolo CR-CSMA/CA funciona de modo assíncrono. Esta característica beneficia o débito obtido, na medida em que a probabilidade de acesso em cada $slot$ é igual para todos os $slots$, o que não acontece nos protocolos CR-ALOHA e CR-CSMA. Comparando o CR-CSMA/CA com os protocolos anteriores, o facto dos protocolos anteriores considerarem uma trama composta pelo período de *sensing* seguido do período de acesso, aumenta a probabilidade de acesso no segundo TP . Isto porque qualquer pacote que chegue para ser transmitido no último TP ou no período de *sensing*, será agendado para o primeiro

TP da trama seguinte o que aumenta a probabilidade de colisão entre pacotes. Outra característica que evita as colisões no protocolo CR-CSMA/CA é a paragem dos temporizadores de contenção enquanto se realiza uma transmissão da rede secundária. Ou seja, sempre que um SU se encontra em estado de contenção, este pára a sua contagem quando outro SU começa a transmitir. Assim a probabilidade de acesso aos *slots* seguintes a uma transmissão não aumenta, pois os temporizadores não expiram durante a transmissão. Observa-se que o débito apresenta uma ligeira diminuição com o aumento do número de SUs. Com a geração constante de tráfego por parte dos SUs, o protocolo vai operar no limite. Na mesma situação, $G > 1$, os outros dois protocolos apresentam uma diminuição de débito bastante superior. O débito deste protocolo diminui mais lentamente pois as colisões ocorrem apenas nos pacotes PTS e RTS. Logo, dada a duração muito inferior destes pacotes em relação ao pacote de dados, as colisões representam uma duração total muito inferior ao período de transmissão de dados.

4.1.4 Comparação dos protocolos num cenário homogéneo

Os protocolos são caracterizados através de diferentes métricas. Para uma comparação justa, altera-se o tráfego da rede secundária em todos eles, de forma a que todos os SUs tenham em qualquer instante um pacote para transmitir. Altera-se também a janela de contenção dos protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA para $CW = 4 * (n - 1)$, sendo $n - 1$ o número de SUs transmissores. Numa transmissão, é necessária a sua recepção com sucesso. Tendo isso em conta, compara-se também o débito útil, considerando como sucesso apenas as transmissões recebidas pelo SAP sem colisões da rede secundária e sem interferência de transmissões da rede primária. Num cenário homogéneo, o débito e o débito útil são iguais para os protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA. São iguais pois os SUs só transmitem se não detectarem, através do *sensing*, ocupação primária. Como a decisão no *sensing* é homogénea, só são realizadas transmissões quando o SAP está sem interferência, e conseqüentemente todas as transmissões são recebidas com sucesso. No protocolo CR-CSMA/CA o débito útil é ligeiramente inferior ao débito. Esta pequeno desvio é justificado pelo facto de a rede primária poder começar a sua actividade durante uma transmissão de dados da rede secundária. Considera-se um desempenho da técnica

de *sensing* óptimo, ou seja, $P_D = 1$ e $P_{FA} = 0$. O período de transmissões é de 20 TPs para os protocolos CR-ALOHA e CR-CSMA. Cada simulação consiste em 50000 tramas. Para cada n SUs são feitas duas simulações. O débito útil obtido pelos três protocolos num cenário homogéneo encontra-se ilustrado na Figura 4.6

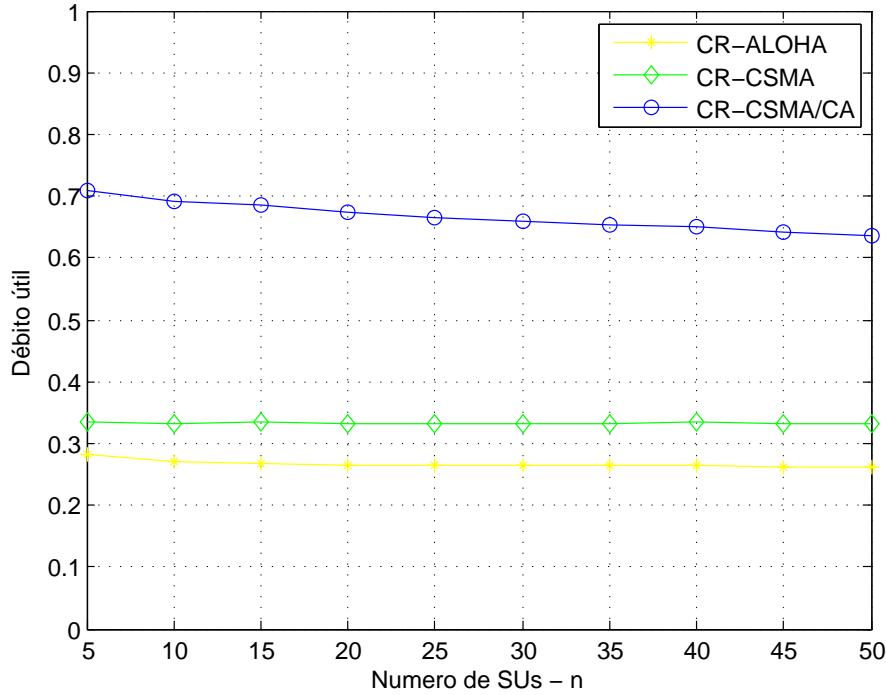


Figura 4.6: Débito útil dos três protocolos com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.

O protocolo CR-CSMA/CA obtém praticamente o mesmo débito que na sua caracterização (Figura 4.5), pois as condições de simulação são as mesmas. O pequeno desvio deve-se ao facto de ser débito útil e não débito. Os dois protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA apresentam um débito bastante diferente devido ao facto de a janela de contenção ser adaptada ao número de nós, o que faz com o débito se mantenha praticamente constante. Com esta parametrização, a percentagem total de colisões nos dois protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA mantém-se constante. O mesmo não acontece no protocolo CR-CSMA/CA. Como a janela não é adaptada, o débito diminui com o aumento do número de SUs devido às colisões, como se pode observar na Figura 4.7. Embora as colisões tenham impacto no débito útil, a razão pela qual existe uma diferença tão grande entre os dois protocolos, *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA, e o CR-CSMA/CA é o nível

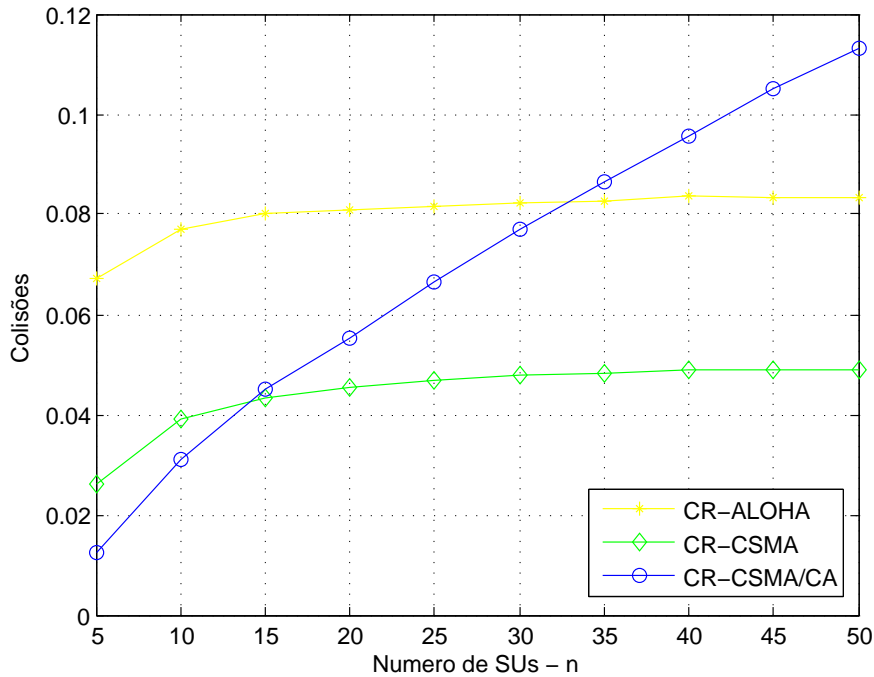


Figura 4.7: Período de colisões dos três protocolos com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.

de ocupação. Sendo T_O o período total de ocupação pela rede secundária e T_T o período total de simulação, então o parâmetro de ocupação é dado por $O_c = T_O/T_T$. A Figura 4.8 ilustra a percentagem de ocupação. Como se pode observar, existe uma grande diferença na forma como os protocolos ocupam o canal. Entre os protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA, a diferença pode ser justificada pela separação dos TPs em *slots*. Desta forma, a transmissão de um pacote pode começar em qualquer altura de um TP e não apenas no início, o que provoca uma maior ocupação. A grande diferença entre estes dois e o CR-CSMA/CA, justifica-se pelo valor das suas janelas de contenção. Notar que embora a rede primária ocupe aproximadamente 10% do meio, o protocolo CR-CSMA/CA ocupa mais de 90%. Esta ocupação acontece devido ao pacote PTS e período de *sensing*, que embora não seja um pacote, funciona como tal, pois não existem outras transmissões nesse período. Pode ser visto como uma ocupação virtual. A ocupação dos protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA mantêm-se praticamente constantes devido à adaptação da janela de contenção, mas no protocolo CR-CSMA/CA a ocupação aumenta com o aumento do número de SUs pois as contenções não são ajustadas ao número de nós.

Como referido no Capítulo 3, para além da ocupação da rede primária de aproxima-

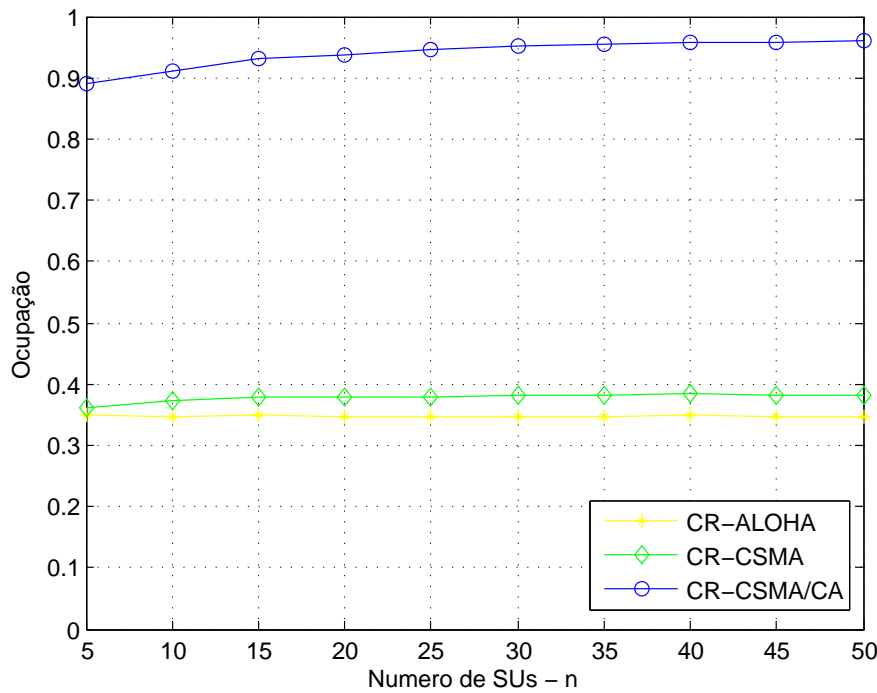


Figura 4.8: Período de ocupação dos três protocolos com aproximadamente 10% de ocupação da rede primária.

damente 10%, realiza-se a mesma análise para uma ocupação de aproximadamente 31%. A Figura 4.9 ilustra o débito útil obtido pelos três protocolos para uma ocupação da rede primária próxima de 31%.

Como é de esperar, os débitos obtidos têm um comportamento igual aos obtidos no cenário homólogo com menor ocupação, mas com menor valor.

No caso da percentagem de colisões, ilustrada na Figura 4.10, os protocolos CR-ALOHA e CR-CSMA apresentam o mesmo comportamento que no cenário homólogo de menor ocupação, mas novamente com menor valor. Isto acontece porque dada a estrutura de tramas, a única alteração é a existência de menos tramas utilizadas pela rede secundária, devido à maior ocupação da rede primária. No protocolo CR-CSMA/CA a percentagem de colisões é semelhante. As colisões acontecem nos pacotes PTS pois estes são transmitidos/effectuados quer existam ou não transmissões da rede primária. A pequena diferença observada é justificada pelo tipo de contenção realizado quando ocorrem transmissões da rede primária e quando não ocorrem. Quando são observadas colisões apenas entre as transmissões da rede secundária, é effectuada uma contenção de período aleatório com uma

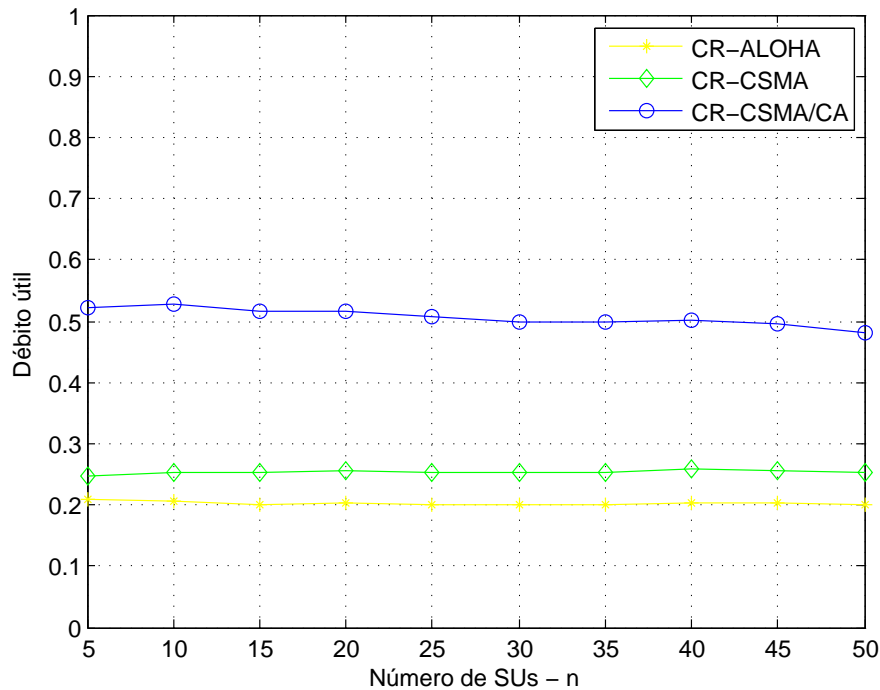


Figura 4.9: Débito útil dos três protocolos com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.

janela que aumenta com o número de colisões. Quando existem colisão entre transmissões da rede secundária e simultaneamente com transmissões da rede primária, é efectuada uma contenção de período fixo, que é sempre mais longa do que a contenção aleatória.

A ocupação da rede secundária tem também o mesmo comportamento no protocolos CR-ALOHA e CR-CSMA. A razão é a mesma da percentagem de colisões. Maior ocupação da rede primária provoca uma menor ocupação da rede secundária. No entanto, o protocolo CR-CSMA/CA apresenta uma ocupação bastante diferente, como se verifica na Figura 4.11. A diferença entre as ocupações justifica-se pela forma como os SUs acedem ao meio quando existem transmissões da rede primária e quando não existem. Quando existe transmissões da rede primária, é realizada a contenção de período fixo, que com poucos SUs provoca uma menor ocupação do meio. À medida que o número de SUs aumenta, o canal começa a saturar e a ocupação aumenta, igualando praticamente à ocupação no cenário de menor ocupação da rede primária 4.8. Quando não existem transmissões da rede primária, a rede secundária ocupa o meio maioritariamente com transmissões de dados, o que ocupa o meio de forma bastante eficiente, mesmo com poucos SUs.

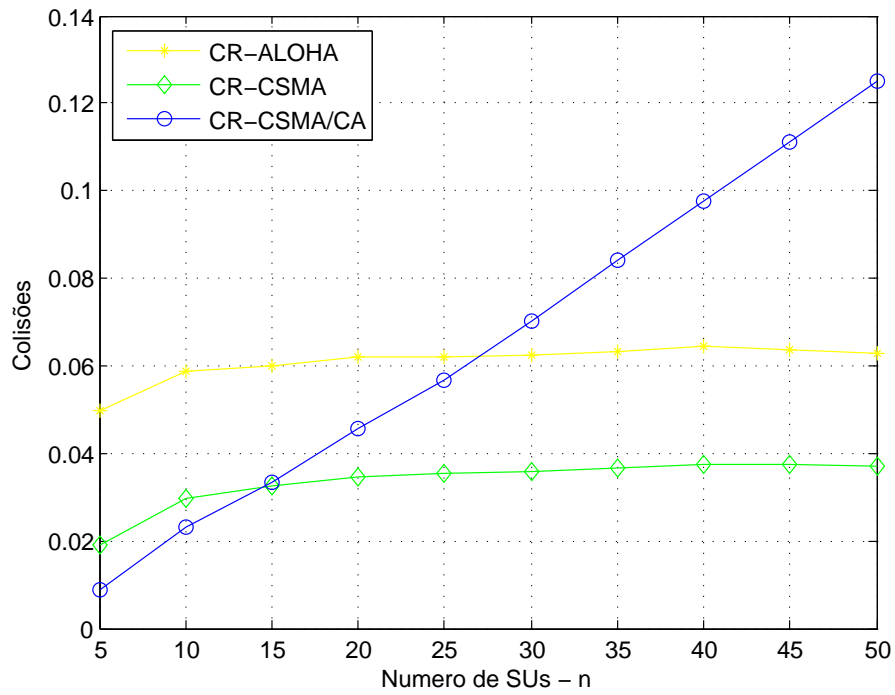


Figura 4.10: Período de colisões dos três protocolos com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.

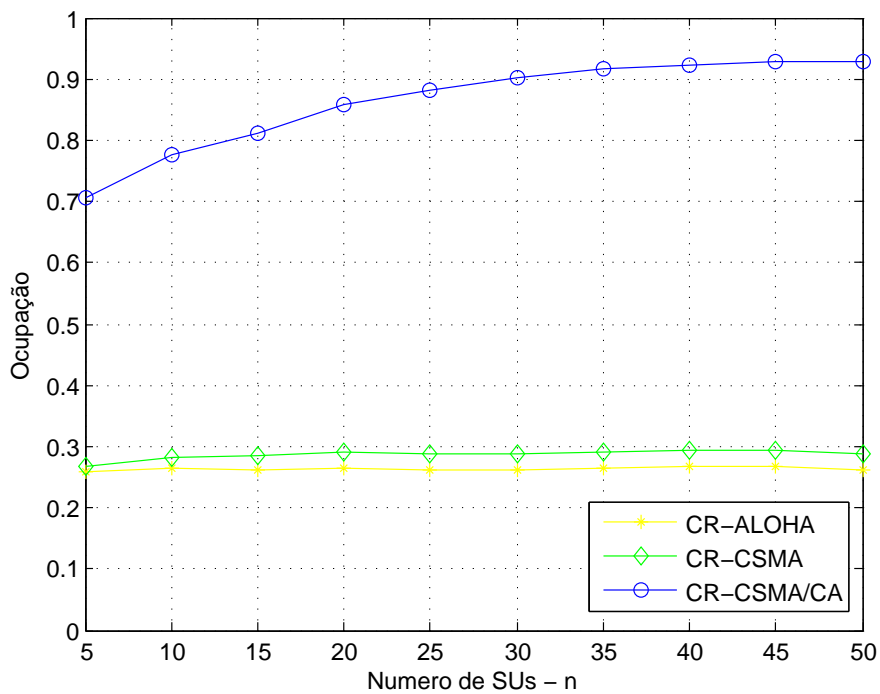


Figura 4.11: Período de ocupação dos três protocolos com aproximadamente 31% de ocupação da rede primária.

4.2 Caracterização em cenários heterogêneos

O cenário considerado anteriormente é homogêneo. Assumindo a mesma parametrização ao nível do MAC, os três protocolos são simulados considerando os cenários descritos no Capítulo 3 para uma análise do efeito da heterogeneidade em cada protocolo.

A análise do desempenho dos três protocolos nos cenários heterogêneos é feita através de quatro parâmetros. São calculados dois tipos de débito, a percentagem de ocupação e a percentagem de colisões designados por:

- Débito - Considera como sucesso a transmissão de um SU, sem colisões com outros nós da rede secundária, independentemente se existe ou não interferência da rede primária no receptor SAP.
- Débito útil - Considera como sucesso a transmissão de um SU, sem colisões com outros nós da rede secundária e sem interferência da rede primária no receptor SAP.
- Colisões - Contabiliza o período total em que ocorrem colisões nas transmissões da rede secundária face ao período total de simulação.
- Ocupação - Considera a ocupação do canal por parte da rede secundária.

4.2.1 *slotted* CR-ALOHA

Começando pelo protocolo *slotted* CR-ALOHA, encontra-se ilustrado na Figura 4.12 os débitos obtidos nos cenários com diferentes níveis de heterogeneidade para uma ocupação da rede primária próxima de 10%.

À medida que a heterogeneidade aumenta, o débito aumenta também. Considerando o cenário homogêneo, todos os SUs tomam a mesma decisão face à disponibilidade do meio. Quando o PU transmite, todos os SUs observam o meio ocupado, o que significa que não existem transmissões nesse período. Quando a heterogeneidade é introduzida, os SUs não vão detectar as mesmas transmissões da rede primária. Numa trama em que poucos SUs não detectem uma transmissão da rede primária, como têm sempre um pacote para transmitir, vão aceder ao meio. O aumento da heterogeneidade diminui a probabilidade de acesso em cada TP , mas espalha o acesso por todo o período de

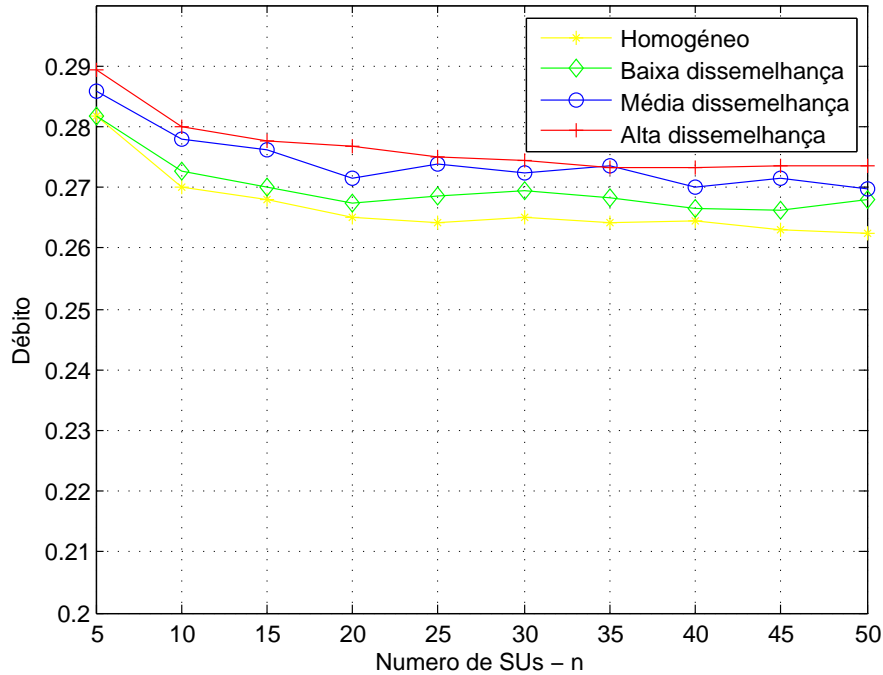


Figura 4.12: Débito do protocolo *slotted* CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

simulação. Este facto provoca menos colisões, como ilustra a Figura 4.14, e aumenta a probabilidade de apenas 1 SU transmitir, o que aumenta o débito. O débito ilustrado na Figura 4.12 não considera a recepção no SAP com sucesso. A Figura 4.13 ilustra o débito útil, obtido nos diferentes cenários de heterogeneidade, considerando como receptor o SAP e aproximadamente 10% de ocupação da rede primária. Ao contrário do efeito provocado no débito, a heterogeneidade provoca a diminuição do débito útil. Comparando o débito útil no cenário homogêneo da Figura 4.13 com o débito no cenário homogêneo da Figura 4.12, observa-se que são iguais. Isto porque só existem transmissões quando o SAP está sem interferência da rede primária. Logo, todas as transmissões são recebidas com sucesso. Sabendo que em média todos os SUs observam a mesma ocupação da rede primária no meio, todos têm em média a mesma ocupação do meio. Assumindo heterogeneidade na avaliação, existem SUs que transmitem quando o SAP está com interferência da rede primária. Essas transmissões não são recebidas com sucesso. Por outro lado, existem períodos que o SAP está disponível e esses SUs não vão aceder, pois avaliam o meio como ocupado, diminuindo o débito útil. O aumento da heterogeneidade faz com que

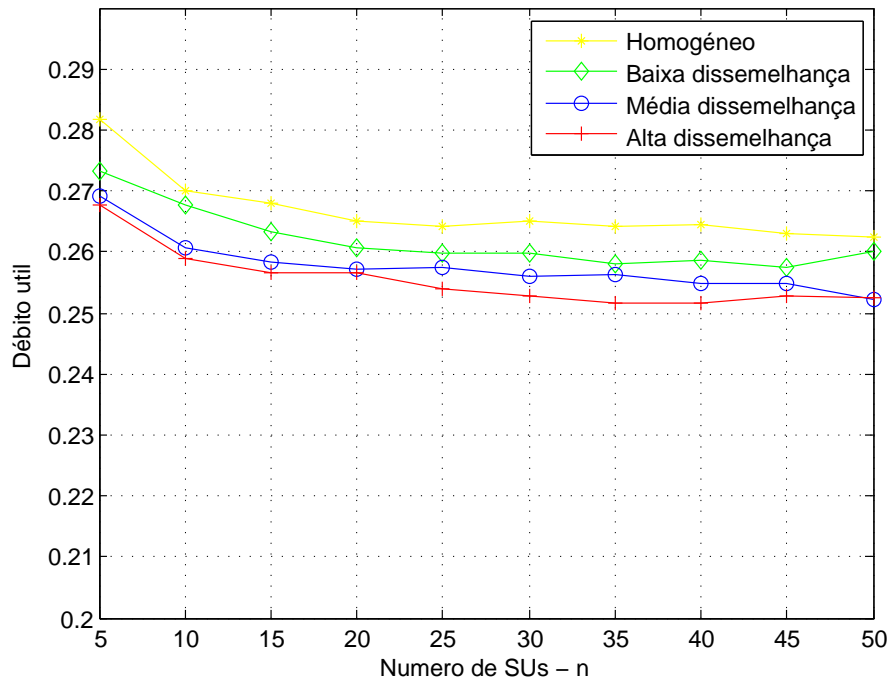


Figura 4.13: Débito útil no protocolo *slotted* CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

mais SUs tenham uma avaliação do meio diferente do SAP, transmitindo sem sucesso quando o SAP está com interferência e não transmitindo quando não sofre interferência. Por esta razão o débito útil é menor que o débito. É fácil perceber que existem mais colisões num cenário homogêneo do que num heterogêneo como ilustra a Figura 4.14. Considerando o cenário homogêneo, todos os SUs vão aceder ao meio nos mesmos instantes temporais, pois não existem transmissões quando o PU transmite, apenas quando o meio se encontra livre de transmissões da rede primária. Espera-se então mais colisões neste cenário. Num cenário de baixa heterogeneidade, a maioria dos resultados de *sensing* em determinados instantes temporais são iguais, mas existe uma minoria que são diferentes. Essa minoria gera grupos com poucos SUs que acedem a meio. Como são menos SUs a competir, existem menos colisões. Para além disso, os SUs que criam esses grupos não vão aceder em alguns dos períodos em que a maioria vai tentar aceder. À medida que a heterogeneidade aumenta, aumentam os períodos em que existem mais grupos o que espalha o acesso ao meio pelo tempo, provocando menos colisões. O aumento da heterogeneidade espalha o acesso ao meio, o que provoca também uma maior ocupação

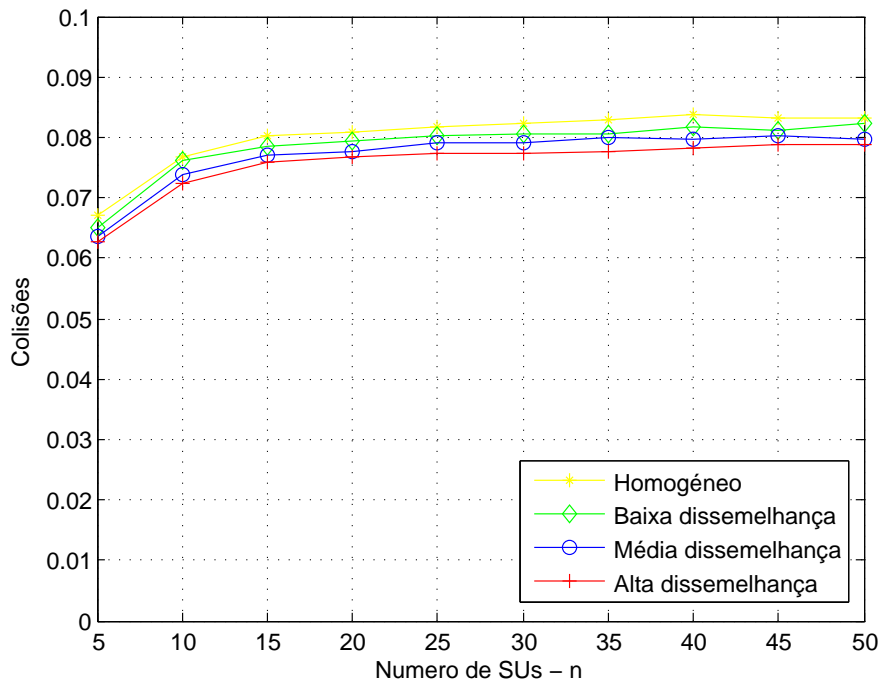


Figura 4.14: Período de colisões no protocolo *slotted* CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

do meio por parte da rede secundária. Essa ocupação encontra-se ilustrada na Figura 4.15. Apesar de existir uma pequena oscilação na ocupação do canal no cenário de média dissemelhança, é perfeitamente visível a influência da heterogeneidade na ocupação do meio.

Com uma maior ocupação da rede primária, a influência da heterogeneidade no débito mantêm-se, como se observa na Figura 4.16. Existe alguma oscilação nos resultados do débito, principalmente no cenário de média dissemelhança, mas esta oscilação é explicada pela variação do parâmetro \bar{x} da Tabela 3.7. A influência mantêm-se no débito útil, como ilustra a Figura 4.17. Mas neste caso, não se observa a oscilação, pois a ocupação observada pelo SAP tem maior influência.

A percentagem de colisões é menor nos cenários de maior ocupação da rede primária do que nos cenários com menor ocupação, pois existe menor acesso da rede secundária. No entanto, com o aumento da heterogeneidade nos cenários de maior ocupação da rede primária, a diferença entre a percentagem de colisões aumenta, como ilustra a Figura 4.18. Ou seja, a diferença entre a percentagem de colisões dos cenários de menor ocupação da

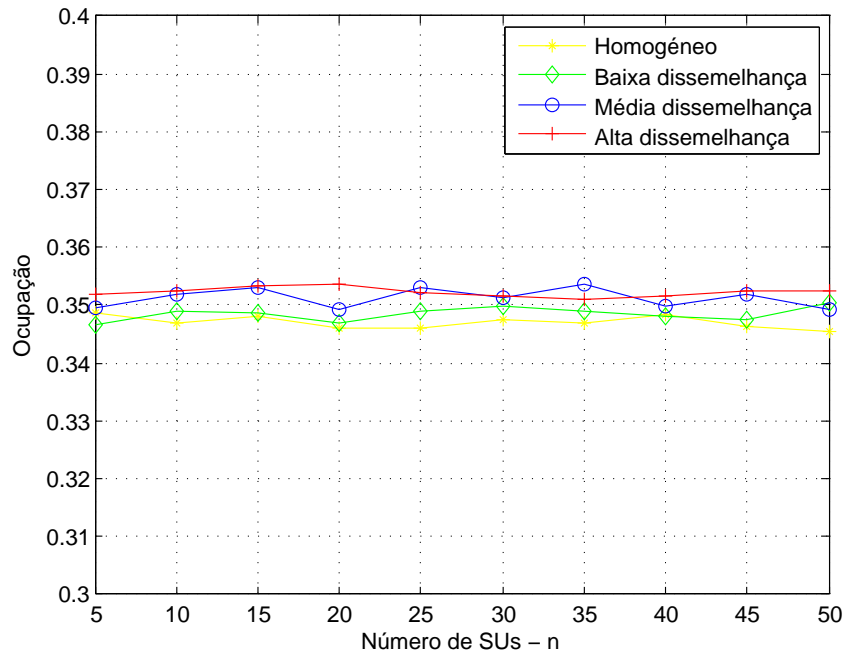


Figura 4.15: Período de ocupação da rede secundária para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

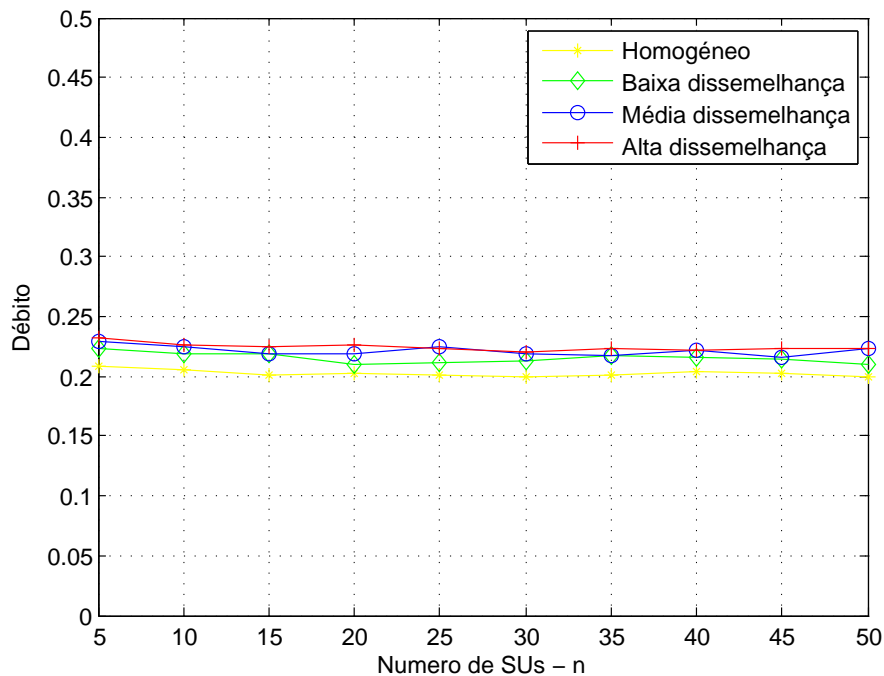


Figura 4.16: Débito do protocolo *slotted* CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

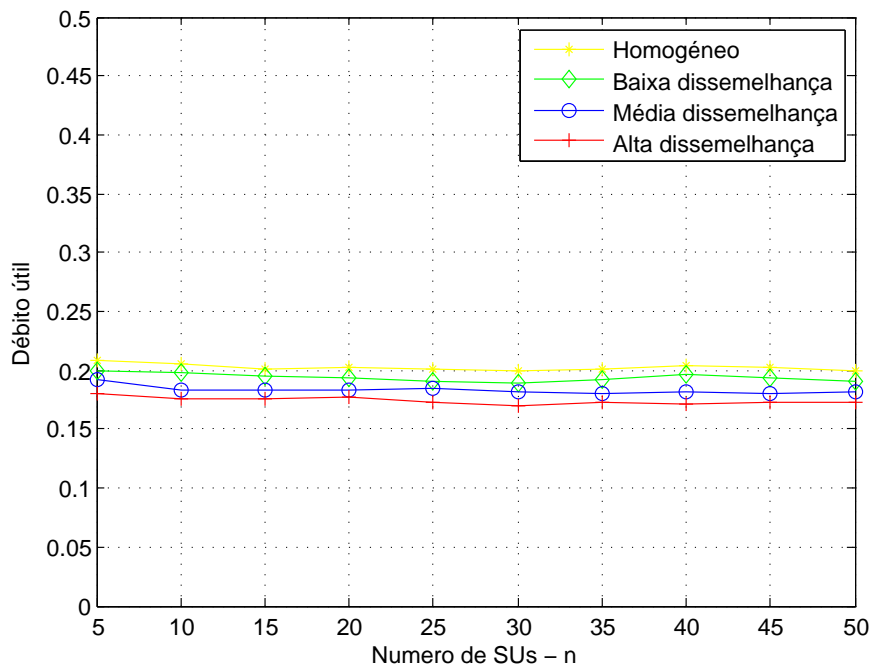


Figura 4.17: Débito útil no protocolo *slotted* CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

rede primária é menor do que a diferença entre a percentagem de colisões dos cenários de maior ocupação da rede primária. Isto acontece pois o espalhamento de acesso ao meio introduzido pela heterogeneidade é maior, devido á maior ocupação da rede primária.

O aumento da diferença na percentagem de colisões faz com o impacto da heterogeneidade na ocupação do meio não seja perceptível entre os cenários heterogêneos com maior ocupação da rede primária. No entanto continua visível entre o cenário homogêneo e os heterogêneos como ilustra a Figura 4.19.

4.2.2 CR-CSMA

O impacto da heterogeneidade no protocolo CR-CSMA é muito semelhante ao impacto no protocolo *slotted* CR-ALOHA, pois as diferenças no modo como operam são poucas. Cada SU verifica se existem transmissões de outros SUs antes de transmitir e os *TPs* são divididos em *slots*. Como era de esperar, o débito obtido é superior ao protocolo *slotted* CR-ALOHA. A Figura 4.20 ilustra o débito obtido com o protocolo CR-CSMA utilizando as parametrizações descritas na Secção 4.1.4.

A heterogeneidade aumenta a dispersão dos nós pelos diferentes *slots*, o que reduz a

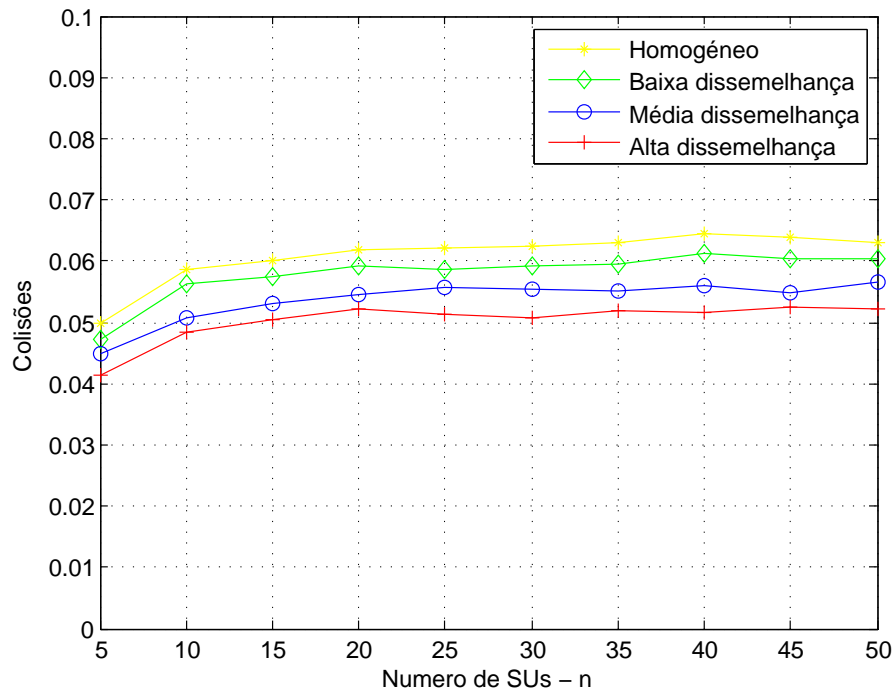


Figura 4.18: Período de colisões no protocolo *slotted* CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

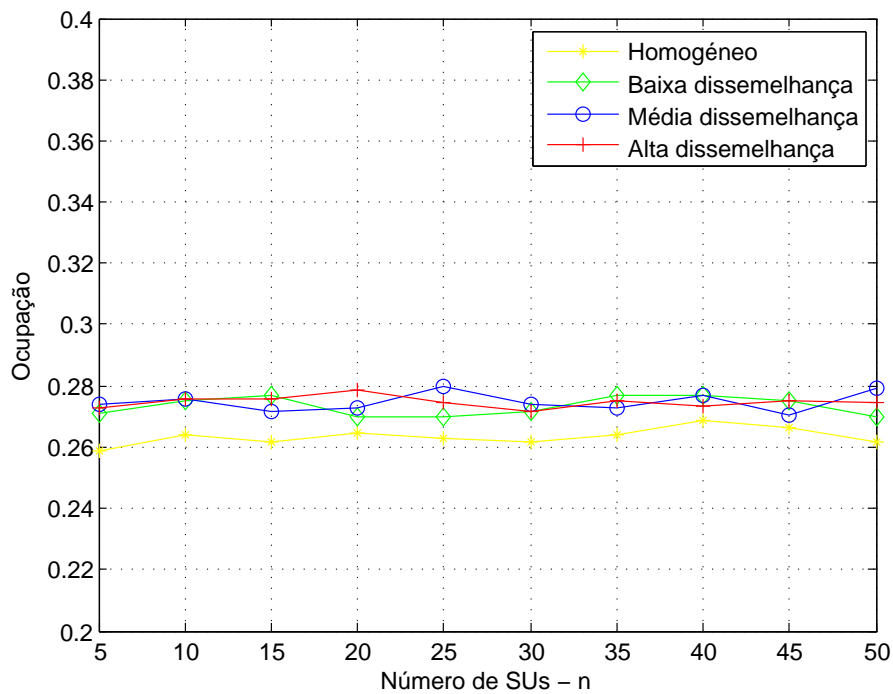


Figura 4.19: Período de ocupação no protocolo *slotted* CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

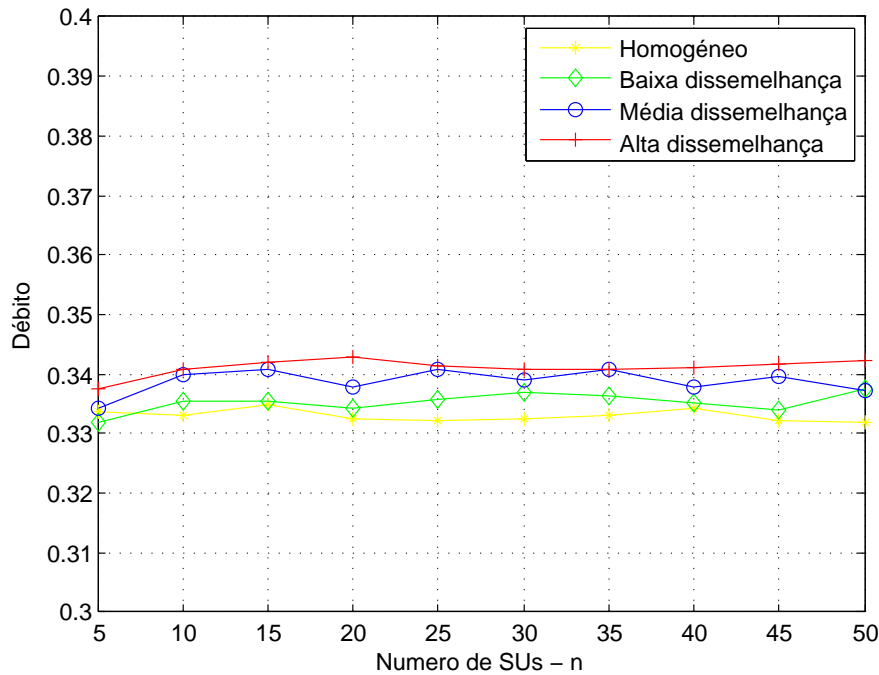


Figura 4.20: Débito do protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

probabilidade de colisão e provoca uma maior ocupação do meio. Este facto verifica-se também no protocolo *slotted* CR-ALOHA. No caso do débito útil, observa-se valores mais altos face ao protocolo *slotted* CR-ALOHA, como é de esperar e é perfeitamente visível o impacto da heterogeneidade, como mostra a Figura 4.21.

A percentagem de colisões é inferior ao protocolo *slotted* CR-ALOHA, pois são evitadas colisões pelo facto de o SU verificar a ocupação do canal antes de transmitir e os *TPs* serem divididos em *slots*. A percentagem encontra-se ilustrada na Figura 4.22.

A ocupação do canal por parte da rede secundária apresenta alguma oscilação no cenário de média dissemelhança. Esta oscilação é resultado da oscilação na ocupação média, proveniente da rede primária, observada pela rede secundária. No entanto, é possível ainda assim observar o efeito da heterogeneidade. O espalhamento do acesso ao meio continua a provocar maiores valores de ocupação à medida que a heterogeneidade aumenta, tal como no protocolo *slotted* CR-ALOHA. A ocupação pode ser observada na Figura 4.23.

Ao aumentar a ocupação da rede secundária, o débito obtido pelo protocolo CR-CSMA

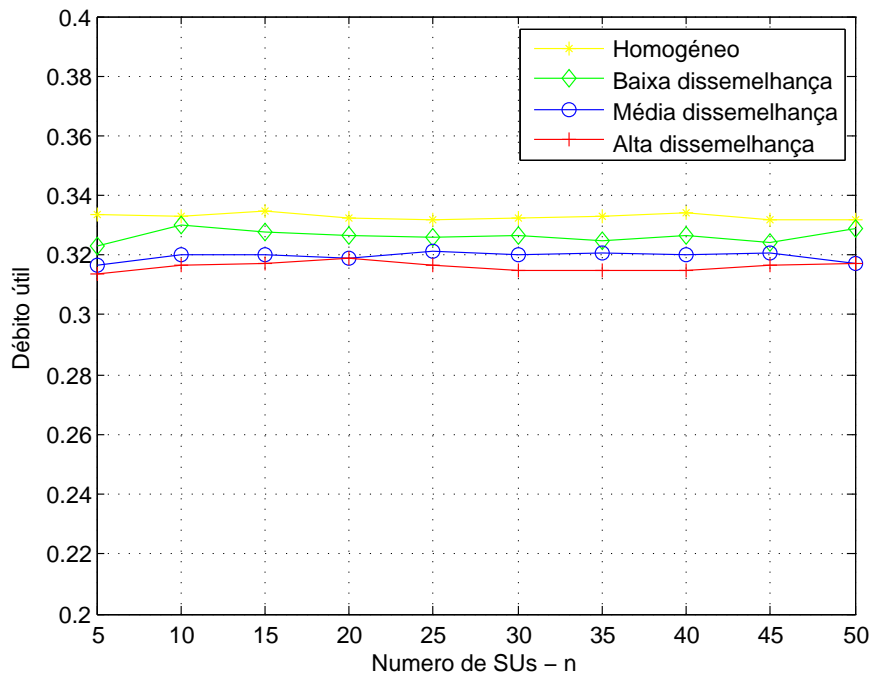


Figura 4.21: Débito útil do protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

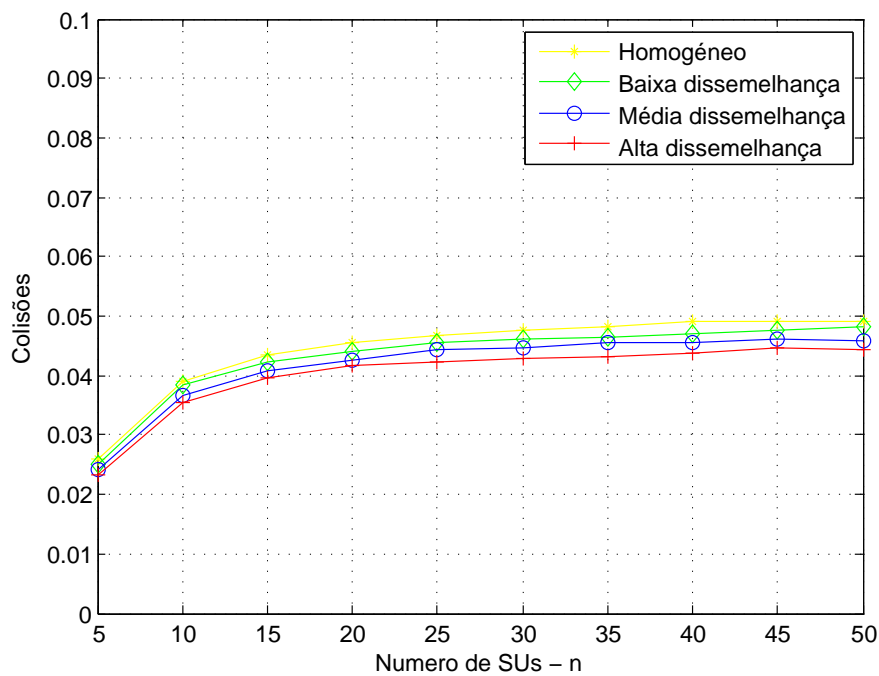


Figura 4.22: Período de colisões no protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

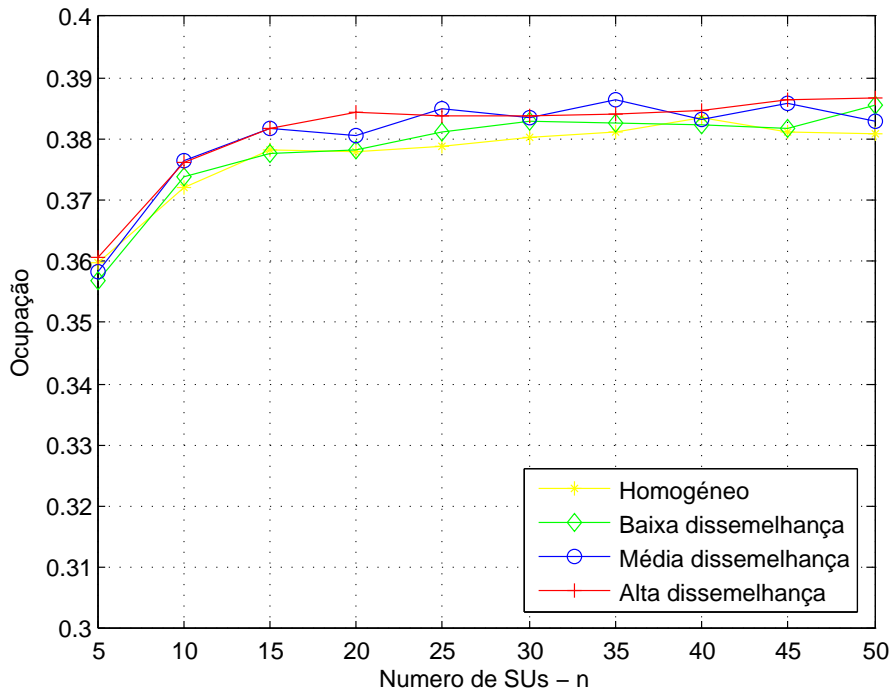


Figura 4.23: Período de ocupação no protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

diminui, pois existem menos tramas disponíveis para a rede secundária. O débito obtido é apresentado na Figura 4.24.

Dada a forma como são criados os diferentes cenários, existem muitas variáveis envolvidas na decisão de *sensing*. Por existir bastantes variáveis aleatórias, como os efeitos de propagação e as distâncias dos SUs aos PUs, é normal que a ocupação média apresente oscilações. Essas oscilações têm um impacto directo no débito obtido. Embora apresente uma oscilação, ainda é possível observar o efeito da heterogeneidade no débito.

Por outro lado, é perfeitamente visível o efeito da heterogeneidade no débito útil, devido ao peso das correlações entre os SUs e o SAP. O débito útil encontra-se ilustrado na Figura 4.25.

Na percentagem de colisões, que é ilustrada na Figura 4.26, observa-se novamente o efeito da heterogeneidade que é ainda maior que nos cenários de menor ocupação da rede primária.

Quanto à ocupação, o efeito da heterogeneidade volta a ser visível apenas entre o cenário homogêneo e os heterogêneos. A ocupação encontra-se ilustrada na Figura 4.27.

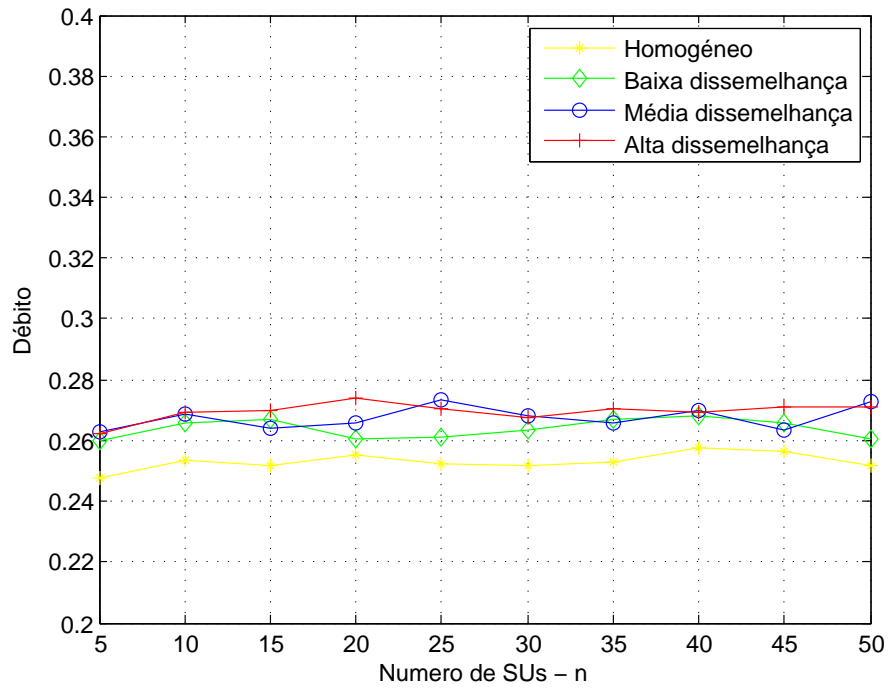


Figura 4.24: Débito do protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

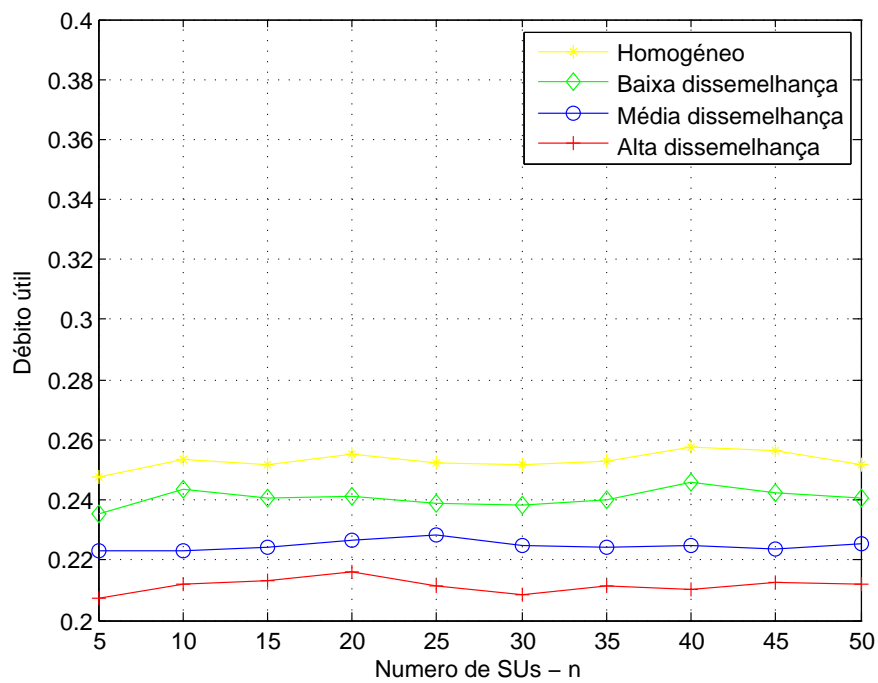


Figura 4.25: Débito útil do protocolo CR-ALOHA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

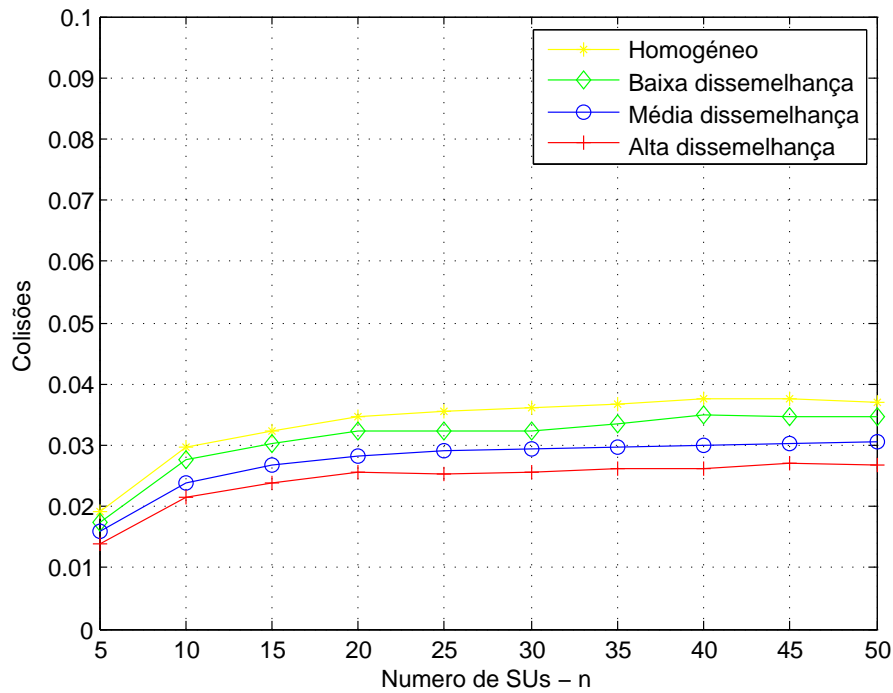


Figura 4.26: Período de colisões no protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

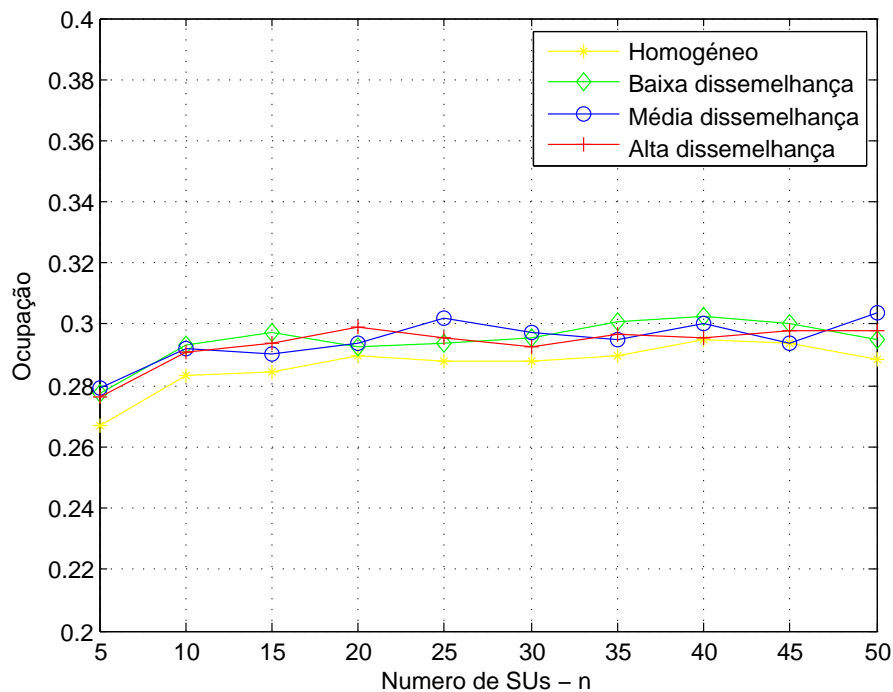


Figura 4.27: Período de ocupação no protocolo CR-CSMA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

4.2.3 CR-CSMA/CA

O protocolo CR-CSMA tem um comportamento que não difere muito do CR-ALOHA, e por isso o impacto da heterogeneidade é praticamente igual. O protocolo CR-CSMA/CA tem um comportamento bastante diferente o que provoca algumas alterações ao ser introduzida a heterogeneidade. O débito obtido para uma ocupação próxima de 10% por parte da rede primária pode ser observado na Figura 4.28.

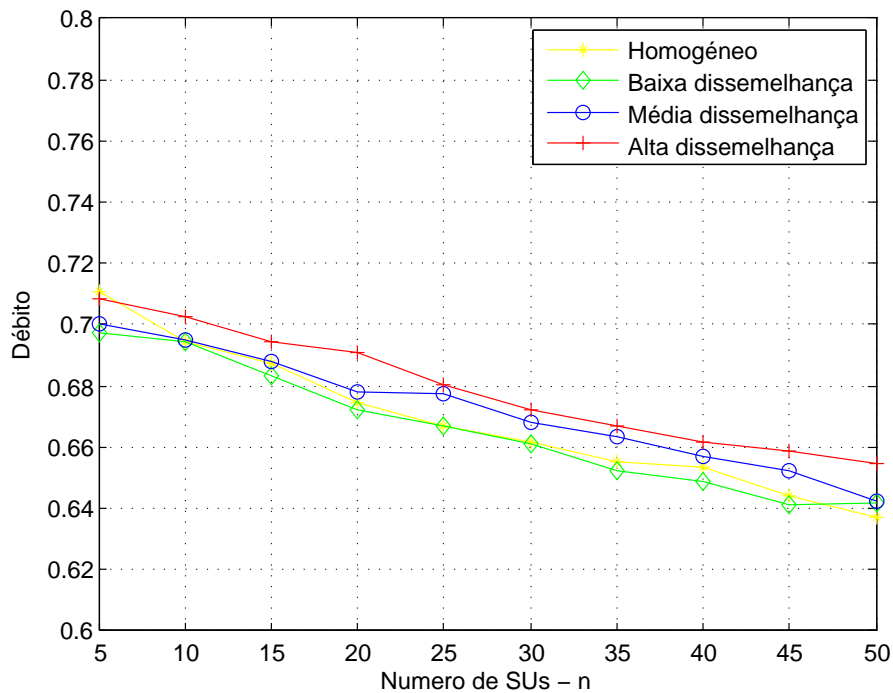


Figura 4.28: Débito do protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogéneos.

O débito é calculado contabilizando apenas os pacotes de dados recebidos pelo SAP face ao período total de simulação. Com este protocolo, o efeito da heterogeneidade é reduzido como se pode observar. O débito obtido é bastante superior relativamente aos protocolos anteriores. O caso do cenário homogéneo até contraria o esperado, pois apresenta para algumas situações um débito superior ao cenário de baixa dissemelhança. Esta robustez vem do facto do protocolo funcionar de forma assíncrona e o período dos pacotes susceptíveis a colisões (PTS e RTS) ser muito inferior ao pacote de dados. A heterogeneidade cria grupos de SUs que observam o meio disponível em instantes distintos. Mas a forma como o protocolo opera faz com que o aumento de SUs não cause uma grande

diminuição do débito, como se observa na evolução do débito no cenário homogéneo. Por isso, o facto da heterogeneidade criar tais grupos tem um efeito muito reduzido. É apresentado também o débito útil na Figura 4.29.

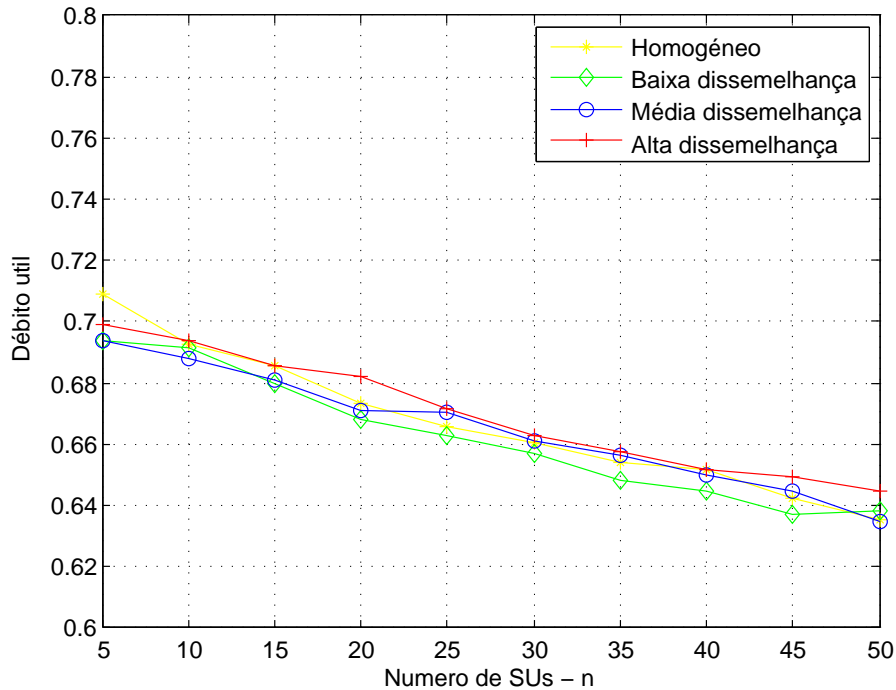


Figura 4.29: Débito útil do protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogéneos.

O facto da duração de cada transmissão da rede primária ser múltipla de 1000 *slots* e os parâmetros λ_{ON} e λ_{OFF} das distribuições geométricas serem 0.09 e 0.01, originam uma probabilidade muito pequena dos PUs alterarem a sua actividade durante uma transmissão de um SU. Por essa razão, existe uma diferença muito pequena entre o débito e o débito útil.

Relativamente à percentagem de colisões, apresentada na Figura 4.30, é possível observar o efeito da heterogeneidade. Ao contrário dos protocolos anteriores, o aumento da heterogeneidade provoca o aumento das colisões. Comparando um cenário homogéneo com um cenário heterogéneo e partindo do princípio que houve uma transmissão de um pacote PTS e posteriormente *sensing* sem ter ocorrido colisão, pois este procedimento é independente da heterogeneidade, analisam-se os seguintes acontecimentos. Num cenário homogéneo existem duas hipóteses quanto à decisão do SAP e do SU transmissor em

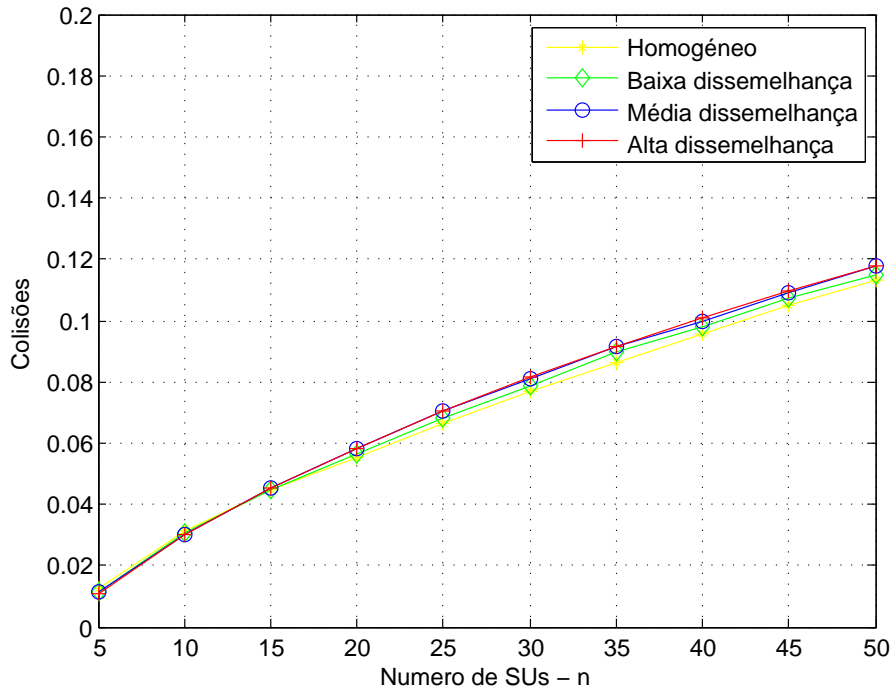


Figura 4.30: Período de colisões no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

relação à ocupação do meio por parte da rede primária:

- \mathcal{H}_0 : Ambos decidem que o meio está livre;
- \mathcal{H}_1 : Ambos decidem que o meio se encontra ocupado.

Sob a hipótese \mathcal{H}_0 , o período seguinte será ocupado por uma transmissão, onde não ocorrem colisões. Sob a hipótese \mathcal{H}_1 , será feita uma contenção de um período fixo, seguida de uma contenção de período aleatório, diminuindo a probabilidade de acesso nos próximos *slots*, pois o bloqueio fixo tem longa duração, para além de ser seguido de um período de contenção aleatório.

Num cenário heterogêneo, existem quatro hipóteses:

- \mathcal{H}_0 : Ambos decidem que o meio está livre;
- \mathcal{H}_1 : Ambos decidem que o meio se encontra ocupado.
- \mathcal{H}_2 : O SAP decide que o meio está livre e o SU transmissor decide que está ocupado;
- \mathcal{H}_3 : O SU transmissor decide que o meio está livre e o SAP decide que está ocupado;

Sob as duas primeiras hipóteses, a probabilidade de colisão nos próximos *slots* é a mesma que no cenário homogêneo. Sob a hipótese \mathcal{H}_2 , será feita uma contenção de período fixo seguida de uma contenção de período aleatório. Sob a hipótese \mathcal{H}_3 , o SU transmissor vai realizar uma contenção de período aleatório, que tem em média uma duração bastante inferior à contenção de período fixo. Existe assim uma maior probabilidade de acesso nos *slots* mais próximos, o que aumenta a probabilidade de colisão. Com o aumento da heterogeneidade, a probabilidade da hipótese \mathcal{H}_3 aumenta, aumentando assim a probabilidade de colisão.

Quanto á ocupação, esta também aumenta com o aumento da heterogeneidade, tal como nos outros protocolos, mas por razões diferentes. A explicação é a mesma do aumento de colisões. Como a contenção de período aleatório é em média inferior à contenção de período fixo e a probabilidade de \mathcal{H}_3 aumenta com o aumento da heterogeneidade, então a ocupação aumenta com o aumento da heterogeneidade.

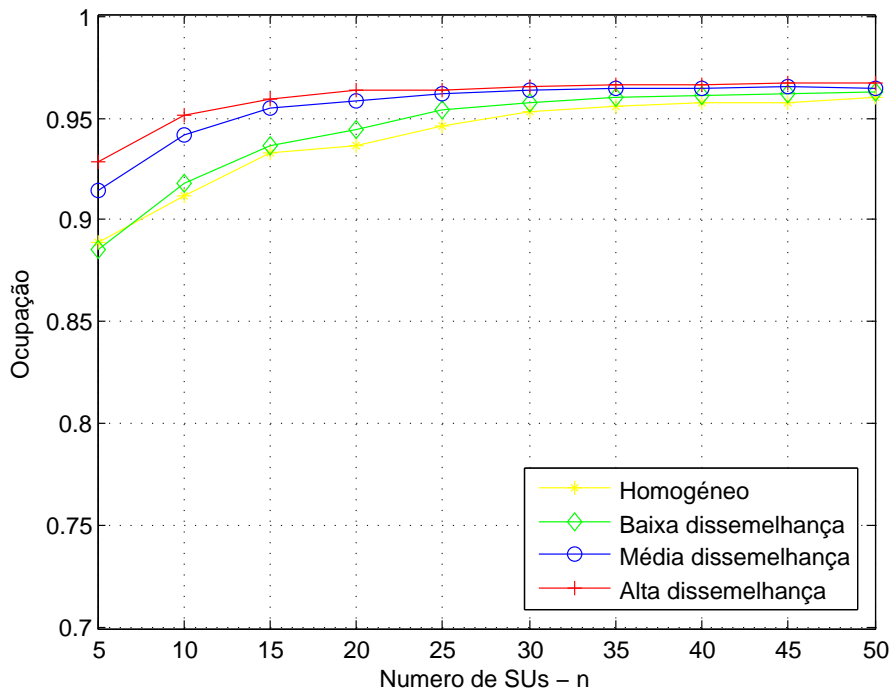


Figura 4.31: Período de ocupação no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 10% nos cenários heterogêneos.

O aumento da ocupação da rede primária provoca a diminuição do débito, como é de esperar. O débito obtido no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede

primária próxima de 31% encontra-se ilustrado na Figura 4.32.

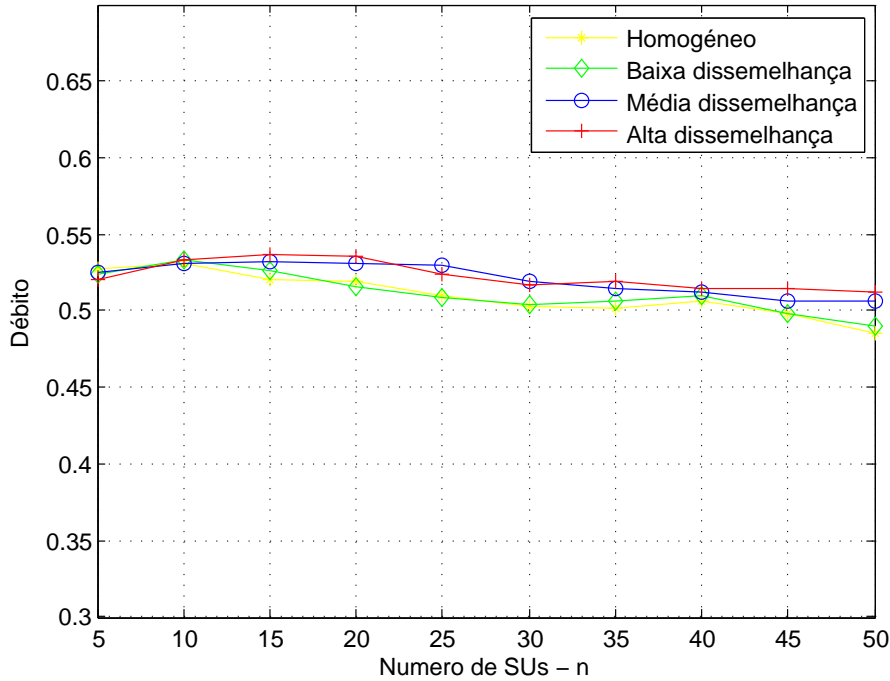


Figura 4.32: Débito do protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

O aumento da heterogeneidade praticamente não tem impacto no débito obtido. Isto porque a forma como o protocolo opera cria uma grande dependência da ocupação vista pelo SAP. Pela forma como são criados os cenários, existe alguma variação na ocupação vista pelo SAP fazendo com que não seja perceptível o impacto da heterogeneidade no débito. Pelas razões referidas anteriormente nos cenário de menor ocupação da rede primária, o débito e o débito útil apresentam praticamente os mesmos valores. O débito útil encontra-se demonstrado na Figura 4.33. Não é visível o efeito da heterogeneidade nestas condições.

Na percentagem de colisões, volta a ser visível o efeito da heterogeneidade. Tal como nos protocolos anteriores, a diferença na percentagem de colisões entre os cenários com diferentes níveis de heterogeneidade aumenta, como se verifica na Figura 4.34. Isto porque, com o aumento da ocupação da rede primária, a probabilidade de \mathcal{H}_3 aumenta. O mesmo acontece na percentagem de ocupação, como se verifica na Figura 4.35.

Existe uma menor ocupação da rede secundária nos cenários com maior ocupação

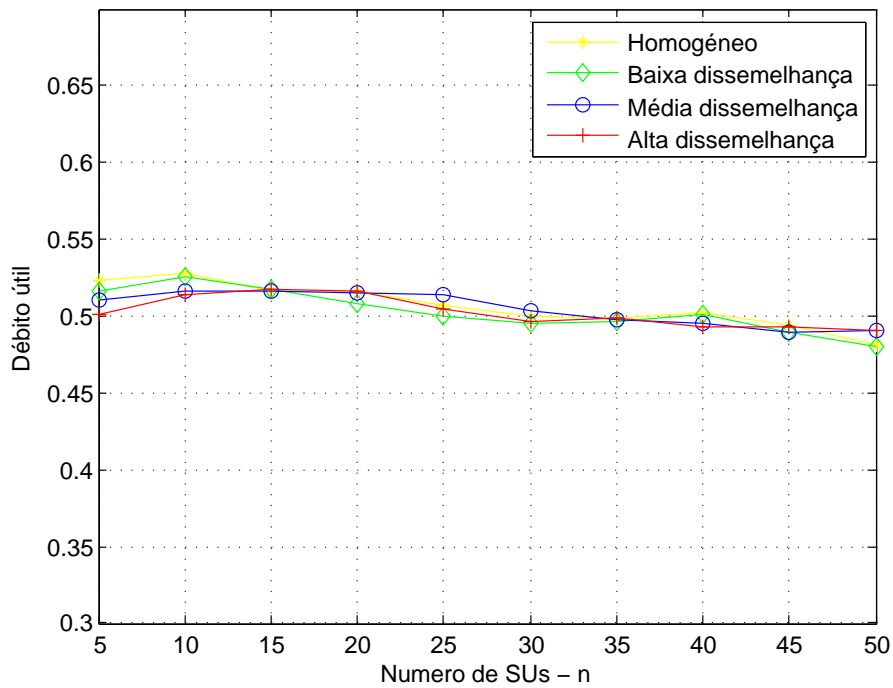


Figura 4.33: Débito útil do protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

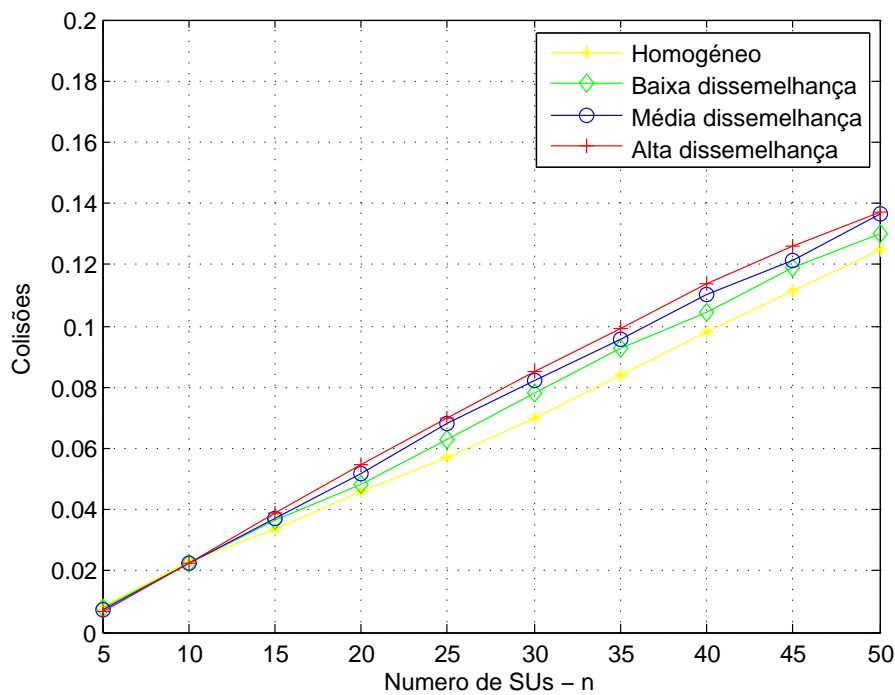


Figura 4.34: Período de colisões no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

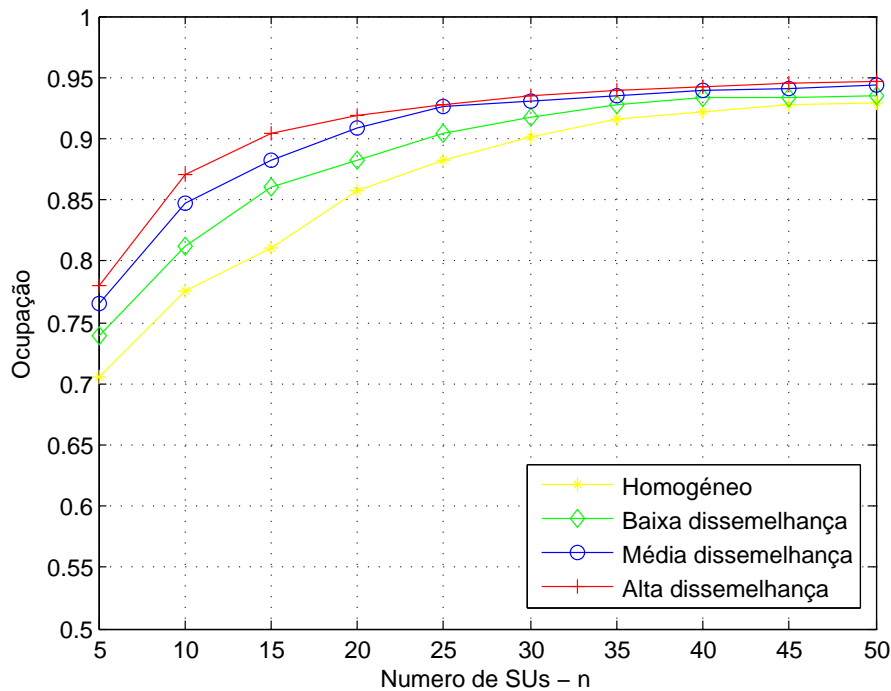


Figura 4.35: Período de ocupação no protocolo CR-CSMA/CA para uma ocupação da rede primária próxima de 31% nos cenários heterogêneos.

da rede primária. Isto acontece porque a probabilidade de detecção da actividade da rede primária aumenta, aumentando também a contenção de período fixo. A diferença de ocupação entre os cenários com diferentes níveis de heterogeneidade é justificada pelos mesmos factos já descritos no cenário de menor ocupação da rede primária (10 % de ocupação da rede primária).

4.3 Diferentes filosofias de contenção para o protocolo CR-CSMA/CA

O protocolo CR-CSMA/CA apresenta duas formas de contenção: (a) O SU que pretende transmitir suspende a sua actividade durante um período fixo devido à decisão de *sensing*, (b) baseada numa filosofia de janela de contenção que acontece em três situações: após o bloqueio fixo devido à actividade da rede primária; quando ocorre uma colisão de pacotes envolvendo pacotes PTS ou RTS; quando se observa um bloqueio do SAP devido à actividade da rede primária e consequentemente a não recepção do pacote CTS por parte do SU transmissor.

4.3. DIFERENTES FILOSOFIAS DE CONTENÇÃO PARA O PROTOCOLO CR-CSMA/CA77

Estas contenções são baseadas apenas em heurísticas, não existindo um modelo matemático que maximize o desempenho do protocolo. Isto a nível de débito, atraso médio de pacotes e tamanho das filas de espera, entre outros.

Esta Secção explora outras filosofias de contenção também baseadas em heurísticas. As alterações são efectuadas na contenção realizada no acesso da rede secundária ao meio, já utilizada no protocolo CSMA/CA. A contenção realizada devido à actividade da rede primária mantém-se. Pretende-se alterar a forma como a janela é regulada, de forma a alcançar possíveis ganhos de desempenho. No protocolo original, a janela de contenção é iniciada com um valor CW . O valor da janela é dobrado, até um limite, cada vez que existe uma intenção de transmitir que não se realiza devido às razões expostas anteriormente. Se a transmissão se realizar com sucesso, a janela volta ao valor CW , para o SU que transmitiu. O protocolo 1 consiste em dobrar o valor da janela quando é realizada uma transmissão com sucesso, também até um limite, e voltar ao valor inicial quando a transmissão falha. O protocolo 2 consiste em iniciar a janela no seu valor máximo e reduzir para metade em caso de falha na transmissão. Caso a transmissão seja realizada com sucesso, a janela do SU que transmitiu volta ao seu valor inicial, que é o valor máximo.

No protocolo 1, o valor inicial da janela de contenção é 32 *slots* e são feitas no máximo 5 tentativas para a transmissão se realizar. Caso não seja realizada com sucesso, voltar ao seu valor inicial. No protocolo 2, o valor inicial da janela de contenção é 512 *slots*. São também realizadas no máximo 5 tentativas e caso tenha sucesso na transmissão a janela volta ao seu valor inicial.

Cada simulação é realizada durante 50000 tramas, o suficiente para tornar qualquer parâmetro observado aproximadamente estacionário, e cada transmissão da rede primária tem duração múltipla de 1000 *slots*. As condições de simulação, ou seja, o cenário em que são simulados os três protocolos, as duas versões e o protocolo original, é um cenário homogéneo, com aproximadamente 10% de ocupação por parte da rede primária. Os valores de ocupação da rede primária observada pela rede secundária encontram-se descritos na Tabela 4.5

A duração dos pacotes utilizados nos três protocolos bem como os tempos associados encontram-se na Tabela 4.6.

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
\bar{x}	0,091	0,105	0,108	0,100	0,105	0,106	0,106	0,090	0,093	0,109

Tabela 4.5: Ocupação média observada pela rede secundária proveniente da rede primária.

	PTS	RTS	CTS	Dados	Ack	DIFS	SIFS	SS	BP
<i>slots</i>	15	18	15	400	15	3	1	25	988

Tabela 4.6: Duração dos pacotes nos três protocolos

Os dois protocolos apresentados são comparados ao protocolo original, descrito no Capítulo 2. O primeiro parâmetro comparado é o débito útil e encontra-se ilustrado na Figura 4.36.

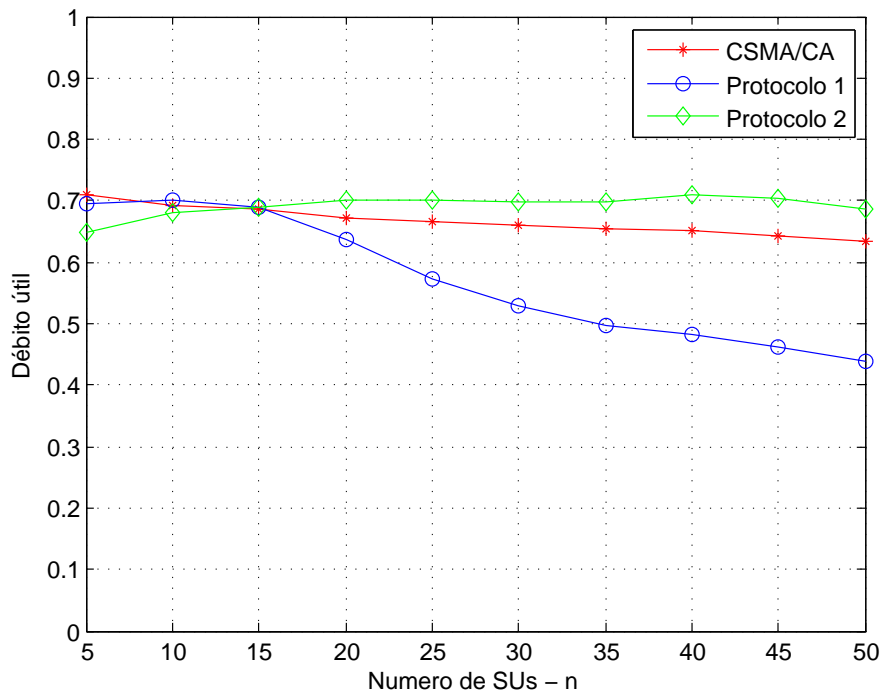


Figura 4.36: Débito útil obtido pelos três protocolos.

O protocolo 1 apresenta o débito útil mais baixo. Para poucos SUs o débito é praticamente igual ao protocolo original. Quando o número de SUs aumenta, aumenta também o período de colisões. Como a janela se mantém no valor mais baixo quando existe uma colisão, a probabilidade de colisão aumenta ainda mais com o aumento do número de SUs.

O protocolo 2, pelo contrário, apresenta um débito útil ligeiramente inferior para 5 e 10 SUs, mas supera o valor dos outros dois protocolos para quantidades maiores de SUs.

4.3. DIFERENTES FILOSOFIAS DE CONTENÇÃO PARA O PROTOCOLO CR-CSMA/CA79

Como o valor inicial da janela é alto, existem períodos elevados de contenção, o que com poucos SUs provoca um subaproveitamento do canal. Ao aumentar o número de SUs, o canal começa a ser mais ocupado e como a janela de contenção inicia com um valor elevado, o período de colisões é baixo e existe um débito maior. A Figura 4.37 ilustra a percentagem de colisões entre transmissões da rede secundária. O protocolo 1 apresenta

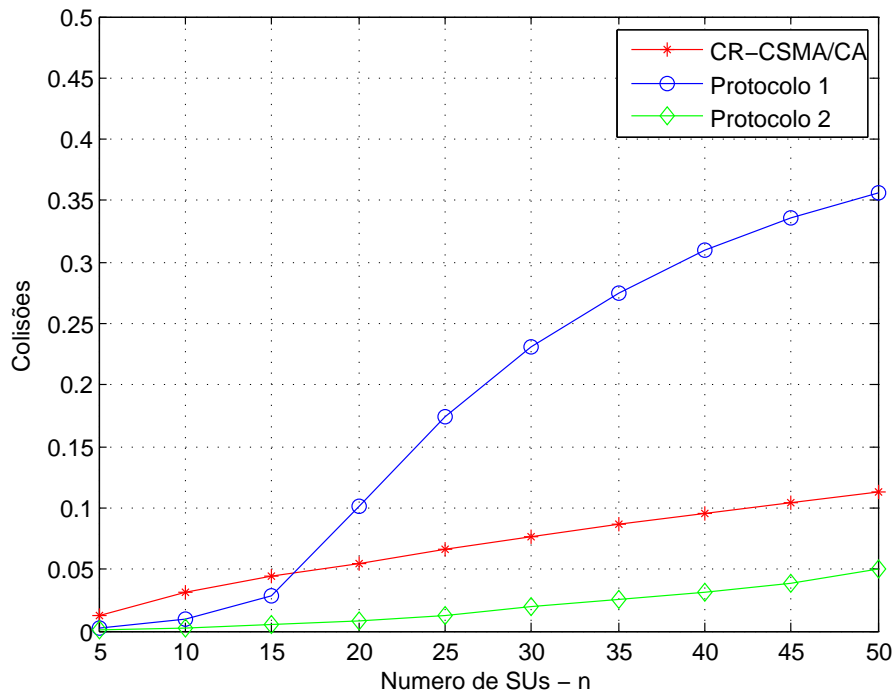


Figura 4.37: Período de colisões obtido pelos três protocolos.

um aumento bastante significativo no período de colisões a partir de 20 SUs. Considerando o valor da janela inicial, 32 slots, e sabendo que o valor de contenção é modelado por uma distribuição uniforme, a partir de 20 SUs o valor médio da janela é ultrapassado, o que provoca o aumento bastante acentuado da percentagem de colisões. Até 15 SUs, o valor é até inferior ao protocolo original, pois existem mais transmissões com sucesso, o que diminui a probabilidade de colisão dado que a janela aumenta quando é realizada uma transmissão com sucesso. O protocolo 2 apresenta uma percentagem de colisões menor, pois a janela é iniciada com um valor relativamente mais elevado.

A percentagem de ocupação dos três protocolos encontra-se ilustrada na Figura 4.38. Neste parâmetro são consideradas todas as transmissões da rede secundária, incluindo os pacotes de PTS, RTS, CTS, dados, ACK e também o sensing. O protocolo 1 apresenta

um período de ocupação inferior ao protocolo original até 15 SUs. Dado que o protocolo original mantém o valor da sua janela contensão quando é realizada uma transmissão com sucesso, com poucos SUs, existem poucas colisões, o que mantém a janela no valor mais baixo e provoca uma maior ocupação. Como o protocolo 1 aumenta a sua janela quando é realizada uma transmissão com sucesso, com poucos SUs, a probabilidade de transmitir com sucesso é alta e por isso a janela aumenta mais vezes deixando o meio livre mais tempo. A partir de 20 SUs, a probabilidade de colisões é maior. Enquanto o protocolo original ajusta a janela à medida que existem mais colisões, devido ao aumento do número de SUs, o protocolo 1 provoca mais colisões, mantendo a janela no seu valor mais baixo. Com colisões mais frequentes, o meio é disputado mais vezes, executando cada nó mais períodos de DIFS. Este facto deixa mais "buracos" na ocupação do meio em relação ao protocolo original que ocupa mais vezes o meio com transmissões longas e contínuas de dados. O protocolo 2 apresenta uma ocupação inferior ao protocolo original pois inicia com uma janela suficientemente alta que evita colisões, mantendo-se no seu valor mais alto. À medida que o número de SUs aumenta, a ocupação aumenta aproximando-se do protocolo original.

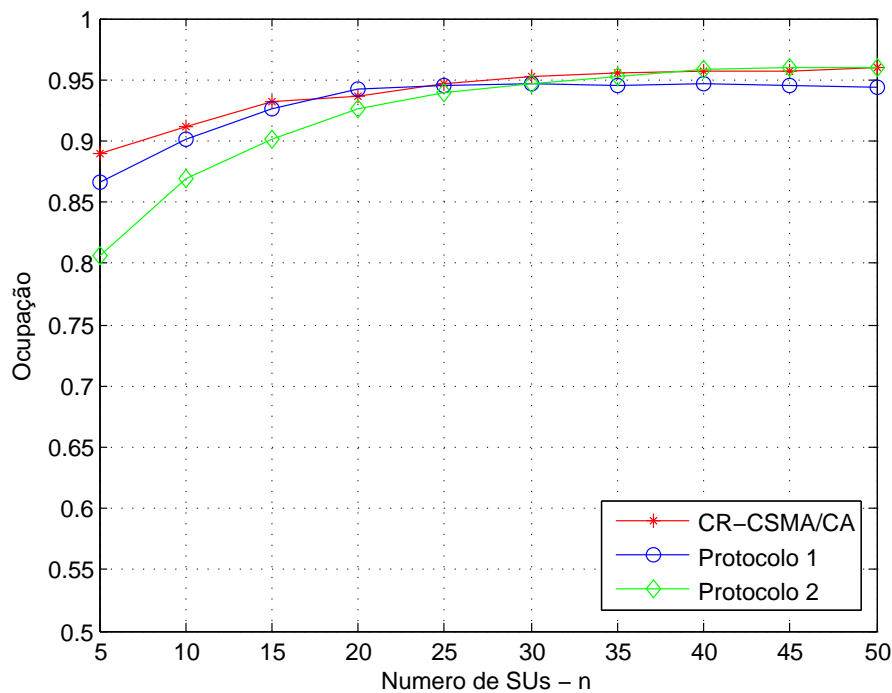


Figura 4.38: Período de ocupação obtido pelos três protocolos.

Capítulo 5

Conclusões

Neste último capítulo, realizam-se algumas considerações finais sobre o trabalho realizado, onde são apresentadas as principais conclusões retiradas, bem como algumas melhorias relegadas para trabalho futuro.

Na primeira fase desta dissertação definiram-se cenários com diferentes níveis de heterogeneidade de *sensing* e com dois níveis de ocupação da rede primária. Conclui-se que não existe forma de separar completamente a correlação entre as visões dos SUs e a ocupação observada pelos mesmos, como se verificou na diferença de \bar{R} nos dois cenários de alta dissemelhança. Alterando somente a ocupação da rede primária, \bar{R} acompanhou essa variação. Conclui-se também que dada a forma como são criados os cenários, existem vários processos aleatórios que provocam oscilações na ocupação observada pela rede secundária e pelo SAP, impossibilitando a observação da heterogeneidade sem o efeito da ocupação.

No Capítulo 4 começa-se por estudar os protocolos assumindo homogeneidade na visão de ocupação do meio por parte dos SUs. Como se verificou, o protocolo CR-CSMA/CA apresenta melhor desempenho em termos do débito útil alcançado. O protocolo CR-ALOHA é o que apresenta o débito útil mais baixo dos três. O protocolo CR-CSMA apresenta um débito útil superior ao CR-ALOHA mas inferior ao CR-CSMA/CA. Ainda no Capítulo 4, conclui-se que a heterogeneidade tem um impacto bastante semelhante nos protocolos *slotted* CR-ALOHA e CR-CSMA. Nestes protocolos, o aumento da heterogeneidade não concentra tantos SUs a competir pelo meio nos mesmos *slots*, o que provoca um aumento

do débito, mas uma diminuição do débito útil. Observa-se uma diminuição do período de colisões e um aumento do período de ocupação à medida que a heterogeneidade aumenta, devido ao maior espalhamento dos SUs pelos *slots*. O aumento da ocupação do meio por parte da rede primária diminui o débito, o débito útil, a percentagem de colisões e a percentagem de ocupação, pois existem menos tramas utilizadas pela rede secundária. No protocolo CR-CSMA/CA, o impacto da heterogeneidade no débito obtido pelos SUs é menor, sendo que o débito obtido é muito superior aos protocolos CR-ALOHA e CR-CSMA. Esta diferença deve-se à forma como o protocolo opera, assincronamente, e ao facto do período de colisões ser muito inferior do que período de dados. Ao contrário dos protocolos CR-ALOHA e CR-CSMA, o débito e o débito útil são praticamente iguais, devido à probabilidade da alteração da actividade da rede primária durante uma transmissão da rede secundária ser muito pequena. O período de colisões e o período de ocupação nos cenários com diferentes níveis de heterogeneidade, diferenciam-se com o aumento da heterogeneidade devido ao aumento do número de vezes em que o SU transmissor decide que o meio está livre e o SAP decide que está ocupado. O aumento da ocupação proveniente da rede primária, diminui os débitos e agrava o efeito da heterogeneidade no período de colisões e no período de ocupação. Devido à maior oscilação na ocupação da rede primária observada pelo SAP e como o efeito da heterogeneidade é muito reduzido neste protocolo, não é possível observar o impacto da heterogeneidade nos cenários de maior ocupação de rede primária.

Relativamente à comparação de desempenho entre o protocolo CR-CSMA/CA com as duas versões do mesmo, o protocolo 1 apresenta um desempenho inferior em termos de débito útil pois é mais propício a colisões devido à evolução da sua janela de contenção. Por outro lado, o protocolo 2 apresenta um débito útil superior ao original para um número mais elevado de SUs. Para um número menor de SUs, o CR-CSMA/CA apresenta um débito útil inferior devido ao subaproveitamento do meio. Deste modo, o protocolo 2 é indicado para situações onde o número de SUs a competir é mais elevado, sendo uma alternativa que melhora o débito do protocolo CR-CSMA/CA.

Como conclusão final, a visão heterogénea de ocupação do meio por parte dos SUs poderá originar alguns ganhos de eficiência, nomeadamente em termos do débito, consoante

o mecanismo de acesso dos SUs.

5.1 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro propõe-se alargar o estudo aqui representado de forma a quantificar a justiça de acesso ao meio quando se assume heterogeneidade ou homogeneidade. A justiça de acesso ao meio é um parâmetro importante que, nos protocolos distribuídos, influencia de forma significativa no tempo de atraso dos pacotes. Daí a importância do seu estudo.

Outra questão de interesse prende-se com a inclusão de outros protocolos, nomeadamente os de múltiplos canais que considerem filosofias distribuídas de acesso ao meio.

Bibliografia

- [ALRC09] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, and Kaushik R. Chowdhury. Spectrum Management in Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *IEEE Network*, July/August 2009.
- [CYCMWC09] Qian Chen, Liang Ying-Chang, Mehul Motani, and Wong Wai-Chong. CR-CSMA: A Random Access MAC Protocol for Cognitive Radio Networks. *IEEE PIMRC 09*, 1(1), September 2009.
- [CYCMWC11] Qian Chen, Liang Ying-Chang, Mehul Motani, and Wong Wai-Chong. Opportunistic Spectrum Access Protocol for Cognitive Radio Networks. *IEEE ICC 2011 proceedings*, 1(1), 2011.
- [CYCMWC13] Qian Chen, Liang Ying-Chang, Mehul Motani, and Wong Wai-Chong. MAC Protocol Design and Performance Analysis for Random Access Cognitive Networks. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, 31(11), November 2013.
- [FGK13] Adriana B. Flores, Ryan E. Guerra, and Edward W. Knightly. IEEE 802.11 af: A Standart for TV White Space Spectrum Sharing. *IEEE Communications Magazine*, 2013.
- [LFO⁺12a] Miguel Luis, António Furtado, Rodolfo Oliveira, Rui Dinis, and Luis Bernardo. Energy Sensing Parameterization Criteria for Cognitive Radios. *ISWCS*, 2012.

- [LFO⁺12b] Miguel Luis, António Furtado, Rodolfo Oliveira, Rui Dinis, and Luis Bernardo. Towards a Realistic Primary Users' Behavior in Single Transceiver Cognitive Networks. *IEEE Communications Letters*, 2012.
- [LM12] Demian Lekomtcev and Roman MarÅ;Å;lek. Comparison of 802.11af and 802.22 standards: physical layer and cognitive functionality. *elektrorevue*, 3(2), June 2012.
- [OBV13] Rodolfo Oliveira, Luis M. Borges, and Fernando J. Velez. A Double Stage Random Access Scheme for Decentralized Single Radio Cognitive Networks. *unknown*, 1(1), 2013.
- [WH11] Alexander Wang, Xiao Yu. Wong and Pin-Han Ho. Stochastic Medium Access for Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *IEEE journal on selected areas in communications*, 29(4), April 2011.

Apêndice A

Implementação do protocolo Slotted CR-ALOHA

Este Anexo descreve os passos realizados na implementação do protocolo MAC Slotted CR-ALOHA. Primeiro apresentam-se os parâmetros que podem ser controlados, depois cada função utilizada e as respectivas estruturas de dados e por fim o protocolo. Para o protocolo em si é apresentado também um fluxograma para além da descrição do código. Nas funções, é descrito o algoritmo da função de uma forma global, depois as estruturas de dados e finalmente a função em si, passo a passo. Nas descrições passo a passo é colocado a cinzento a explicação da instrução antes da mesma.

Parâmetros

Nesta secção são apresentados os parâmetros que podem ser controlados na simulação, e outros calculados a partir destes.

numSUs - Número de utilizadores na rede secundária;

numPUs - Número de utilizadores na rede primária;

numMaxSUs - Número máximo de SUs na simulação;

Nf - Número de frames;

NTP - Número de períodos de transmissão por frame;

NTP_total - $Nf \cdot NTP$ - Número total de períodos de transmissão;

CW - Janela de contenção para os backoffs;

Actividade_ON - Parâmetro p da distribuição geométrica para a actividade (estado ON/Tx) do PU;

Actividade_OFF - Parâmetro p da distribuição geométrica para a inactividade (estado OFF) do PU;

Pd - Probabilidade de detecção dos SUs;

Pf - Probabilidade de falso alarme dos SUs;

Ritmo_medio_de_geracao_de_pacotes_dos_SUs - Ritmo médio de geração de pacotes dos SUs por frame. A geração de pacotes é feita a partir de uma distribuição de *Poisson*.

Media_dist_exponencial - $1/\text{Ritmo_medio_de_geracao_de_pacotes_dos_SUs}$ - Intervalo de tempo (TP é a unidade de tempo) médio entre pacotes dos SUs;

Numero_de_simulacoes - Número de simulações para cada SU, serve para diminuir o intervalo de confiança;

Inc_SUs - Incremento do número de SUs. Utilizado para diminuir o tempo de simulação;

Funções

Geracao_de_estados_dos_PUs_geometrica(Actividade_ON, Actividade_OFF, Nf, numPUs)

Descrição Geral - Gera um vector construído a partir de duas distribuições geométricas, uma para os estados ON e outra para os OFF alternadamente. No fim transforma esse vector numa matriz de dimensões $Nf \times \text{numPUs}$

Explicação do código:

Inicialização do vector de estados dos PUs

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs = 0;
```

Enquanto o vector de estados dos PUs não conter posições suficientes para ter Nf frames para cada PU continuar a gerar estados para os PUs

```
while (length(Vector_de_estados_de_todos_PUs) < (Nf*numPUs))
```

Acrescentar ao vector uma sequência de 1's (PU activo) seguida de uma de 0's (PU inactivo). O tamanho de cada sequência é retirado da distribuição respectiva

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs = [Vector_de_estados_de_todos_PUs ... ones(1,random('geo',Actividade...
zeros(1,random('geo',Actividade_OFF,1,1)+1)];
```

Verificar se o vector já tem tamanho suficiente para gerar o tráfego necessário para todos os PUs em todas as frames

```
if (length(Vector_de_estados_de_todos_PUs) > Nf*numPUs)
```

Como provavelmente o vector excede as dimensões desejadas é necessário retirar-lhe as últimas posições que estão a mais. Retira-se também a primeira pois foi forçada a 0 na sua inicialização. Dimensões: Nf*numPUs

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs =...
Vector_de_estados_de_todos_PUs(2:Nf*numPUs+1); break; end
end
```

Colocar o vector na forma de matriz com as dimensões desejadas. Dimensões: NfxnumPUs

```
Matriz_estados_PUs =...
reshape(Vector_de_estados_de_todos_PUs,Nf,numPUs);
end
```

`sensing_com_Pd_e_Pf_definida(numSUs, numPUs, Nf, Matriz_estados_PUs, Pd, Pf)`

Descrição Geral -Retorna a decisão dos SUs face ás transmissões dos PUs. Gera uma matriz de dimensões $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$ que contém valores entre 0 e 1 retirados de uma distribuição uniforme. Multiplica-se a matriz de estados dos PUs por essa matriz aleatória e compara-se os valores com $1 - Pd$. Os valores superiores indica que foram detectados, os inferiores não foram (misdetection). De seguida inverte-se a matriz de estados dos PUs (troca-se os 0's pelos 1' e vice-versa) e multiplica-se novamente a matriz de pesos pela matriz de estados. Desta vez vai seleciona-se onde houve falso alarme que ocorre quando os valores dessa multiplicação superam o valor $1 - Pf$.

Explicação do código:

Gerar a matriz com os pesos para cada transmissão, para cada SU em cada frame.
Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Matriz_de_pesos = random('unif',0,1,Nf,numPUs,numSUs);
```

Replicar a Matriz de estados dos PUs para cada SU. Tem que ser feita a decisão num SU em cada frame por cada PU. Cada decisão é independente por isso a Matriz_de_pesos tem todos os seu valores independentes Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Matriz_estados_PUs_ON = Matriz_estados_PUs(:,ones(1,numSUs));
```

Multiplicar os estados dos PUs, em cada Frame e para cada SU, pelos pesos retirados da distribuição aleatória. Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Matriz_de_pesos_Pd = Matriz_de_pesos.*Matriz_estados_PUs_ON;
```

Selecionar os valores acima da Pd considerada pois só esses foram detectados. Considera-se $> 1 - Pd$ para não considerar os zeros (o que significa que não houve transmissão). Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Detecoes_Pd = Matriz_de_pesos_Pd > (1-Pd);
```


Matriz onde os PUs estão inactivos. Dimensões: $N_{fx} \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$\text{Matriz_estados_PUs_OFF} = \text{Matriz_estados_PUs_ON} == 0;$

Multiplicar os estados dos PUs(desta vez inactivos), em cada Frame e para cada SU, pelo peso dos valores retirados da distribuição aleatória Dimensões: $N_{fx} \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$\text{Matriz_de_pesos_Pf} = \text{Matriz_de_pesos} * \text{Matriz_estados_PUs_OFF};$

Selecionar os casos em que houve falso alarme. Novamente considera-se $> 1 - P_f$ para não abranger os zeros. Dimensões: $N_{fx} \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$\text{Falso_alarme} = \text{Matriz_de_pesos_Pf} > (1 - P_f);$

Decisão dos SUs (ainda a 3 dimensões). Neste caso a matriz $\text{Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU}$ vai conter 1 onde foi detectada a transmissão do PU ou onde houve falso alarme. Dimensões: $N_{fx} \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$\text{Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU} = \text{Detecoes_Pd} + \text{Falso_alarme};$

Somar todas as transmissões dos PUs em cada SU por cada frame. Esta operação é feita porque basta detectar no mínimo um PU para o SU considerar a Frame ocupada. Dimensões: $N_{fx} \times \text{numSUs}$

$\text{Decisao_de_cada_SU_por_Frame} = \text{sum}(\text{Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU}, 2);$

Transformar os valores das somas em valores booleanos

$\text{Decisao_de_cada_SU_por_Frame} = \text{Decisao_de_cada_SU_por_Frame} > 0;$

Colocar a matriz de decisões nas dimensões certas. Dimensões: $\text{numSUs} \times N_f$

$\text{Decisao_nas_Nframes} = \text{squeeze}(\text{Decisao_de_cada_SU_por_Frame});$

Gerar_trafego_SUs(numSUs, NTP, media_dist_exponencial)

Descrição Geral É gerado um vector com as dimensões $Nf \cdot NTP \cdot numSUs$ com todas as posições iguais a 0 (0 representa que não chegou nenhum pacote). Através do ciclo while é retirado um número da distribuição exponencial com média `media_dist_exponencial` e soma-se ao apontador `i`. É colocado um 1 (1 representa a chegada de um pacote) na posição que resulta dessa soma. A variável de contagem `i` funciona como um apontador que vai as posições retiradas da distribuição colocar os pacotes (`vector(posição)=1`). O valor da distribuição é somado ao valor anterior, fazendo com que o tempo de espera pelo outro pacote seja relativo ao actual, e não ao inicio da contagem.

Explicação do código:

Vector que vai conter em que TPs chegam os pacotes, das aplicações por exemplo, para serem transmitidos

```
Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs = zeros(1,NTP*numSUs);
```

Inicialização do apontador que vai gerar os pacotes no vector de `Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs`

```
i = 1;
```

Gerar tráfego até ter suficiente para cada SU nos NTPs

```
while (i < (NTP*numSUs))
```

Gerar a posição onde vai aparecer o novo pacote em relação à actual

```
i = i + round(random('exp',media_dist_exponencial));
```

Colocar o pacote na posição gerada

```
Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs(i) = 1;
```

É necessário cortar o vector devido ao ultimo `i` exceder o tamanho maximo :última iteração -> `i+i > NTP*numSUs`;

```

Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs = ...
Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs(1:NTP*numSUs);

```

Colocar o vector na forma de matriz com dimensões numSUsxNTP

```

Matriz_chegada_de_pacotes =
reshape(Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs, NTP, numSUs);

```

Comportamento_dos_SUs(numSUs, Nf, NTP, Decisao_nas_Nframes, Trafego_dos_SUs, CW)

Descrição Geral Esta função é a implementação do protocolo em questão.

A implementação foi basicamente baseada em dois ciclos: um ciclo para os TPs (exterior), e a cada iteração deste é corrido um ciclo para cada SU (interior). O ciclo dos TPs é ilustrado na Figura A.1 e o ciclo dos SUs na Figura A.2

Explicação do código:

Acumulador de pacotes - Contém quantos pacotes cada SU tem em lista de espera para serem transmitidos. Dimensões: numSUs

```
Acumulador_de_pacotes = zeros(1,numSUs);
```

Flags de agendamento - Este vector serve para saber se os pacotes que estão no acumulador de pacotes já estão agendados para transmissão. De notar que cada SU agenda apenas um pacote de cada vez mesmo que haja mais que um no acumulador. 1 significa que o pacote está agendado, 0 significa que não está. Dimensões: numSUs

```
Flags_de_agendamento = zeros(1,numSUs);
```

Tolerância - Esta tolerância vai possibilitar os agendamentos de acesso no ciclo dos SUs para TPs posteriores ao numero total de TPs. No decorrer do ciclo são feitos agendamentos para TPs posteriores. Quando estiver perto do fim dos Nf*NTPs o acesso pode

ser agendado para depois dos $N_f \cdot NTP$. Esta tolerância evita erro na memória e também que tenha que consultar o número de TPs total para agendar

```
tolerancia_TPs = 10;
```

Acesso dos SUs ao canal - Indica o TP no qual o pacote é transmitido pelo SU. Quando o SU marca neste vector o momento da transmissão é colocada uma flag no vector `Flags_de_agendamento` indicando que o pacote já está agendado para transmissão num dos TPs posteriores. Dimensões: $\text{numSUs} \times N_f \cdot NTP$

```
Acesso_dos_SUs_ao_canal = zeros(numSUs, N_f * NTP + tolerancia_TPs);
```

Canal - Este vector representa o meio. As transmissões de cada SU são somadas aqui em cada TP. Cada posição deste vector representa uma unidade de tempo que neste caso é um TP. Cada TP (posição do vector) contém o número de transmissões que acontecem em cada TP. Se houver uma transmissão a posição desse TP vai conter 1 e foi realizada com sucesso, 0 significa que não houve transmissões e >1 significa que houve colisão. Dimensões: $N_f \cdot NTP$

```
Canal = zeros(1, N_f * NTP);
```

Vector de backoffs - vector que contém os backoffs dos SUs que colidiram num TP. Dimensão variável, Max: numSUs

```
Vector_de_backoffs = 0;
```

```
Ciclo dos NTP_total
```

```
for m = 1:N_f * NTP
```

```
    Ciclo dos SUs
```

```
    for k = 1:numSUs
```

Actualizar o `Acumulador_de_pacotes` com o que está no `Trafego_dos_SUs`, ou seja, adicionar ao acumulador de pacotes o pacote que chegou neste TP para este SU enviar,

caso tenha chegado algum pacote.

$\text{Acumulador_de_pacotes}(k) = \text{Acumulador_de_pacotes}(k) + \dots$

$\text{Trafego_dos_SUs}(k,m);$

Verificar se tem algum pacote para transmitir em lista de espera no $\text{Acumulador_de_pacotes}$

$\text{if}(\text{Acumulador_de_pacotes}(k) > 0)$

Verificar se está agendado

$\text{if}(\text{Flags_de_agendamento}(k)==1)$

Verificar se está agendado para este TP, se estiver e não for o último TP da Frame nem o de sensing transmite. Se for o último TP agendar para $m+2$, se for o TP de sensing agendar para $m+1$.

$\text{if}(\text{Acesso_dos_SUs_ao_canal}(k,m)==1)$

Verificar se é o TP de sensing, se for agendar para $m+1$

$\text{if}(\text{mod}(m,NTP)==1)$

Como o SU não vai aceder neste TP coloca-se o seu acesso a 0.

$\text{Acesso_dos_SUs_ao_canal}(k,m) = 0;$

Agendar para $m+2$

$\text{Acesso_dos_SUs_ao_canal}(k,m+1) = 1;$

Passar para o SU seguinte

$\text{continue};$

Calcular qual é a frame actual (através da função ceil) e qual a decisão de sensing (em relação ao PU) deste SU Se o canal estiver disponível ($=0$) transmite, senão agenda para um TP posterior

```
elseif(Decisao_nas_Nframes(k,ceil(m/NTP))==0)
```

```
Canal(m) = Canal(m)+1;
```

```
else
```

Como o SU não vai aceder neste TP coloca-se o seu acesso a 0.

```
Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m) = 0;
```

Agendar este pacote com base num backoff com janela CW para um TP posterior

```
Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+random('unid',CW,1)) = 1;
```

```
end
```

```
else
```

Passar para o SU seguinte

```
continue;
```

```
end
```

```
else
```

Como o pacote não está agendado agendar para o TP seguinte

```
Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+1) = 1;
```

Colocar a Flag de agendamento

```
Flags_de_agendamento(k) = 1;
```

```
end
```

```
else
```

Passar para o SU seguinte

```
continue;
```

```
end
```

```
end
```

```

Saber quem transmitiu neste TP
indice_de_SUs_que_transmitiram =
find(Acesso_dos_SUs_ao_canal(:,m)==1);

Saber se houve colisões neste TP. Se houve, agendar os pacotes dos SUs que colidiram
para TPs posteriores;
if(length(indice_de_SUs_que_transmitiram)>1)

Gerar os backoffs para os SUs que colidiram
Vector_de_backoffs =...
random('unid',CW,1,length(indice_de_SUs_que_transmitiram));

Agendar o acesso ao canal de cada SUs para o seu backoff respectivo
for i = 1:length(indice_de_SUs_que_transmitiram)
    Acesso_dos_SUs_ao_canal(indice_de_SUs_que_transmitiram(i),m + ...
Vector_de_backoffs(i)) = 1; end

Tranmissão com sucesso
elseif(length(indice_de_SUs_que_transmitiram)==1)

Retirar o pacote do acumulador de pacotes
Acumulador_de_pacotes(indice_de_SUs_que_transmitiram) =...
Acumulador_de_pacotes(indice_de_SUs_que_transmitiram)-1;

Se ainda tiver pacotes agendar para o próximo TP
if(Acumulador_de_pacotes(indice_de_SUs_que_transmitiram) > 0)
Acesso_dos_SUs_ao_canal(indice_de_SUs_que_transmitiram,m+1) = 1;

Se não tem mais pacotes para transmitir deixa de cumprir agendamento
else

```

```
Flags_de_agendamento(indice_de_SUs_que_transmitiram) = 0;
```

```
end
```

```
else
```

```
continue;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

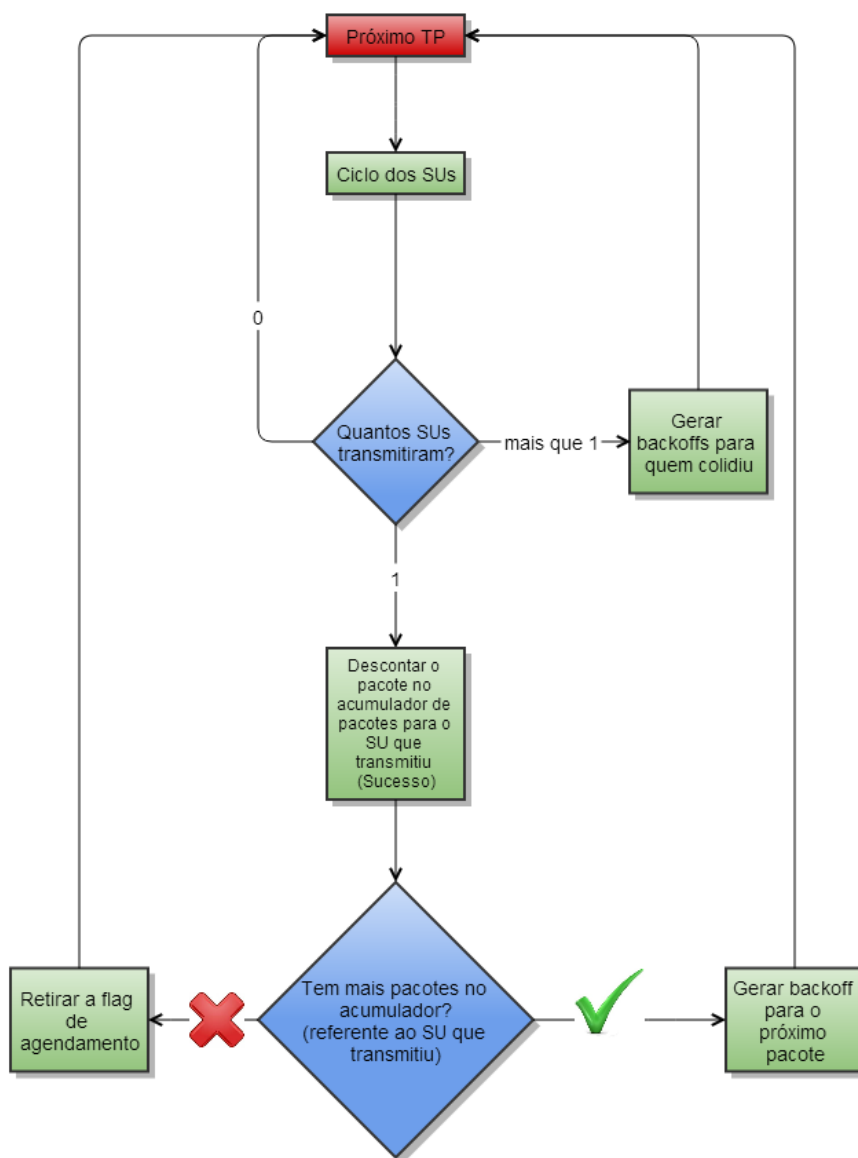



Figura A.1: Ciclo dos TPs em CR-ALOHA

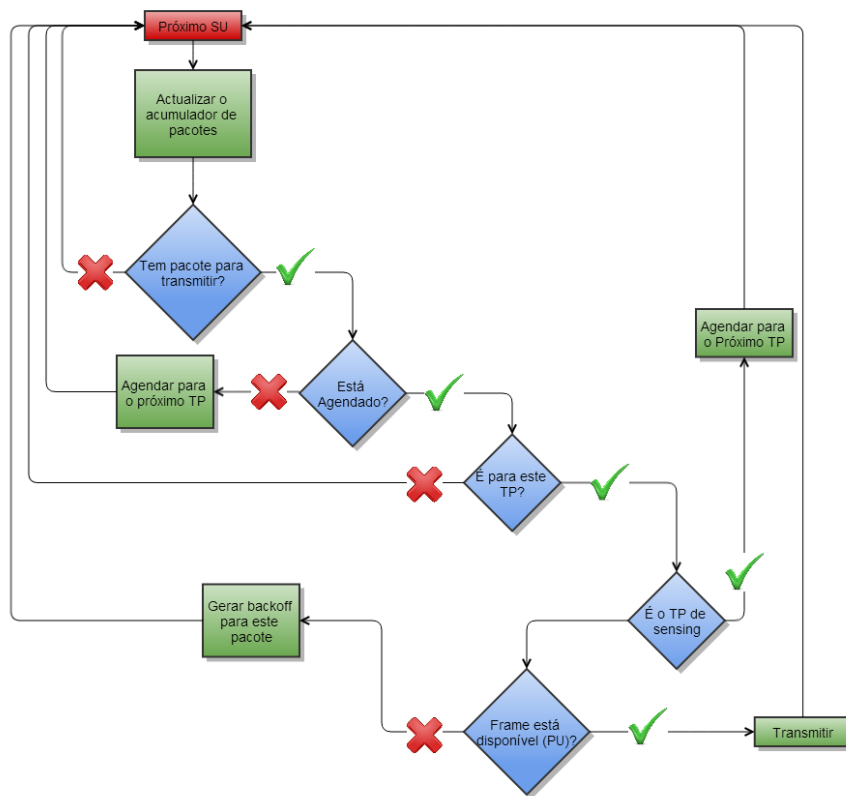


Figura A.2: Ciclo dos SUs em CR-ALOHA

Apêndice B

Implementação do protocolo CR-CSMA

Este Anexo descreve os passos realizados na implementação do protocolo CR-CSMA. Primeiro apresentam-se os parâmetros que podem ser controlados, seguidos de cada função utilizada e as respectivas estruturas de dados e por fim o protocolo. Para o protocolo em si é apresentado também um fluxograma para além da descrição do código. Nas funções, é descrito o algoritmo da função de uma forma global, depois as estruturas de dados e finalmente a função em si, passo a passo. Nas descrições passo a passo é colocado a cinzento a explicação da instrução antes da mesma.

Parâmetros

Nesta secção são apresentados os parâmetros que podem ser controlados na simulação, e outros calculados a partir destes.

numSUs - Número de utilizadores na rede secundária;

numPUs - Número de utilizadores na rede primária;

numMaxSUs - Número máximo de SUs na simulação;

Nf - Número de frames;

NTP - Número de períodos de transmissão por frame;

MST - Número de períodos de *slot* por período de transmissão

MST_total - $Nf \cdot NTP \cdot MST$ - Número total de *slots* de transmissão;

CW - Janela de contenção para os backoffs;

Actividade_ON - Parâmetro p da distribuição geométrica para a actividade (estado ON/Tx) do PU;

Actividade_OFF - Parâmetro p da distribuição geométrica para a inactividade (estado OFF) do PU;

Pf - Probabilidade de falso alarme dos SUs;

Pnoc - Probabilidade do canal não estar ocupado;

Pd - $Pnoc^{\frac{1}{numSUs}}$ - Probabilidade de detecção dos SUs;

Ritmo_medio_de_geracao_de_pacotes_dos_SUs - Ritmo médio de geração de pacotes dos SUs por frame. A geração de pacotes é feita a partir de uma distribuição de *Poisson*.

Media_dist_exponencial - $\frac{1}{Ritmo_medio_de_geracao_de_pacotes_dos_SUs}$ - Intervalo de tempo (TP é a unidade de tempo) médio entre pacotes dos SUs. Multiplica-se por MST pois em vez de termos NTPs por frame temos $NTP \cdot MST$, logo, em média em vez de termos um pacote a cada X TPs temos um pacote a cada $MST \cdot X$ TPs. É necessário manter o ritmo de pacotes igual que é X por TPs.

Numero_de_simulacoes - Número de simulações para cada SU, serve para diminuir o intervalo de confiança;

Inc_SUs - Incremento do número de SUs. Utilizado para diminuir o tempo de simulação;

Funções

Geracao_de_estados_dos_PUs_geometrica(Actividade_ON, Actividade_OFF, Nf, numPUs)

Descrição Geral - Gera um vector construído a partir de duas distribuições geométricas, uma para os estados ON e outra para os OFF alternadamente. No fim transforma esse vector numa matriz de dimensões $Nf \times \text{numPUs}$

Explicação do código:

Inicialização do vector de estados dos PUs

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs = 0;
```

Enquanto o vector de estados dos PUs não conter posições suficientes para ter Nf frames para cada PU continuar a gerar estados para os PUs

```
while (length(Vector_de_estados_de_todos_PUs) < (Nf*numPUs))
```

Acrescentar ao vector uma sequência de 1's (PU activo) seguida de uma de 0's (PU inactivo). O tamanho de cada sequência é retirado da distribuição respectiva

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs = [Vector_de_estados_de_todos_PUs ... ones(1,random('geo',Actividade_ON,1,1)) zeros(1,random('geo',Actividade_OFF,1,1)+1)];
```

Verificar se o vector já tem tamanho suficiente para gerar o tráfego necessário para todos os PUs em todas as frames

```
if (length(Vector_de_estados_de_todos_PUs) > Nf*numPUs)
```

Como muito provavelmente o vector excede as dimensões desejadas é necessário retirar-lhe as últimas posições que estão a mais. Retira-se também a primeira pois foi forçada a 0 na sua inicialização. Dimensões: $Nf \times \text{numPUs}$

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs =...
```

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs(2:Nf*numPUs+1); break; end
```

```
end
```

Colocar o vector na forma de matriz com as dimensões desejadas. Dimensões: $N_f \times \text{numPUs}$

```
Matriz_estados_PUs = ...
reshape(Vector_de_estados_de_todos_PUs, Nf, numPUs);
end
```

sensing_com_Pd_e_Pf_definida(numSUs, numPUs, Nf, Matriz_estados_PUs, Pd, Pf)

Descrição Geral - Retorna a decisão dos SUs face às transmissões dos PUs. Gera uma matriz de dimensões $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$ que contém valores entre 0 e 1 retirados de uma distribuição uniforme. Multiplica-se a matriz de estados dos PUs por essa matriz aleatória e compara-se os valores com $1 - Pd$. Os valores superiores indica que foram detectados, os inferiores não foram (misdetection). De seguida inverte-se a matriz de estados dos PUs (troca-se os 0's pelos 1' e vice-versa) e multiplica-se novamente a matriz de pesos pela matriz de estados. Desta vez vai seleciona-se onde houve falso alarme que ocorre quando os valores dessa multiplicação superam o valor $1 - Pf$.

Explicação do código:

Gerar a matriz com os pesos para cada transmissão, para cada SU em cada frame.
Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Matriz_de_pesos = random('unif', 0, 1, Nf, numPUs, numSUs);
```

Replicar a Matriz de estados dos PUs para cada SU. Tem que ser feita a decisão num SU em cada frame por cada PU. Cada decisão é independente por isso a Matriz_de_pesos tem todos os seu valores independentes Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Matriz_estados_PUs_ON = Matriz_estados_PUs(:, :, ones(1, numSUs));
```

Multiplicar os estados dos PUs, em cada Frame e para cada SU, pelos pesos retirados

da distribuição aleatória. Dimensões: $N \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$$\text{Matriz_de_pesos_Pd} = \text{Matriz_de_pesos} \cdot \text{Matriz_estados_PUs_ON};$$

Selecionar os valores acima da Pd considerada pois só esses foram detectados. Considera-se $> 1 - Pd$ para não considerar os zeros (o que significa que não houve transmissão). Dimensões: $N \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$$\text{Detecoes_Pd} = \text{Matriz_de_pesos_Pd} > (1 - Pd);$$

Matriz onde os PUs estão inactivos. Dimensões: $N \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$$\text{Matriz_estados_PUs_OFF} = \text{Matriz_estados_PUs_ON} == 0;$$

Multiplicar os estados dos PUs(desta vez inactivos), em cada Frame e para cada SU, pelo peso dos valores retirados da distribuição aleatória Dimensões: $N \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$$\text{Matriz_de_pesos_Pf} = \text{Matriz_de_pesos} \cdot \text{Matriz_estados_PUs_OFF};$$

Selecionar os casos em que houve falso alarme. Novamente considera-se $> 1 - Pf$ para não abranger os zeros. Dimensões: $N \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$$\text{Falso_alarme} = \text{Matriz_de_pesos_Pf} > (1 - Pf);$$

Decisão dos SUs (ainda a 3 dimensões). Neste caso a matriz `Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU` vai conter 1 onde foi detectada a transmissão do PU ou onde houve falso alarme. Dimensões: $N \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$$\text{Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU} = \text{Detecoes_Pd} + \text{Falso_alarme};$$

Somar todas as transmissões dos PUs em cada SU por cada frame. Esta operação é feita porque basta detectar no mínimo um PU para o SU considerar a Frame ocupada. Dimensões: $N \times 1 \times \text{numSUs}$

$$\text{Decisao_de_cada_SU_por_Frame} = \text{sum}(\text{Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU}, 2);$$

Transformar os valores das somas em valores booleanos

```
Decisao_de_cada_SU_por_Frame = Decisao_de_cada_SU_por_Frame > 0;
```

Colocar a matriz de decisões nas dimensões certas Dimensões: numSUsxNf

```
Decisao_nas_Nframes = squeeze(Decisao_de_cada_SU_por_Frame);
```

Gerar_trafego_SUs(numSUs, NTP, media_dist_exponencial)

Descrição Geral - É gerado um vector com as dimensões $Nf \cdot NTP \cdot MST \cdot numSUs$ com todas as posições iguais a 0 (0 representa que não chegou nenhum pacote). Através do ciclo while é retirado um número da distribuição exponencial com média media_dist_exponencial e soma-se ao apontador i. É colocado um 1 (1 representa a chegada de um pacote) na posição que resulta dessa soma. A variável de contagem i funciona como um apontador que vai as posições retiradas da distribuição colocar os pacotes(vector(posição)=1). O valor da distribuição é somado ao valor anterior, fazendo com que o tempo de espera pelo outro pacote seja relativo ao actual, e não ao inicio da contagem.

Explicação do código:

Vector que vai conter em que STs chegam os pacotes, das aplicações por exemplo, para serem transmitidos

```
Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs = zeros(1,MST*numSUs);
```

Inicialização do apontador que vai gerar os pacotes no vector de Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs

```
i = 1;
```

Gerar tráfego até ter suficiente para cada SU nos MSTs

```
while (i < (MST*numSUs))
```

Gerar a posição onde vai aparecer o novo pacote em relação à actual

```
i = i + round(random('exp',media_dist_exponencial));
```


Colocar o pacote na posição gerada

```
Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs(i) = 1;
```

É necessário cortar o vector devido ao ultimo i exceder o tamanho maximo :última iteração -> $i+i > MST * numSUs$;

```
Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs = ...
```

```
Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs(1:MST*numSUs);
```

Colocar o vector na forma de matriz com dimensões $numSUs \times MST$

```
Matriz_chegada_de_pacotes =
```

```
reshape(Vector_de_chegada_de_pacotes_de_todos_SUs, MST, numSUs);
```

Comportamento_dos_SUs(numSUs, Nf, NTP, Decisao_nas_Nframes, Trafego_dos_SUs, CW)

Descrição Geral - Esta função é a implementação do protocolo em questão.

A implementação foi basicamente baseada em dois ciclos: um ciclo para os TPs (exterior), e a cada iteração deste é corrido um ciclo para cada SU (interior). O ciclo dos TPs é ilustrado na Figura B.1 e o ciclo dos SUs na Figura B.2.

Explicação do código:

Acumulador de pacotes - contém quantos pacotes cada SU tem em lista de espera para serem enviados. Dimensões: $numSUs$

```
Acumulador_de_pacotes = zeros(1,numSUs);
```

Flags de agendamento para Spectrum Sensing - estas flags são activadas quando existe colisão entre transmissões de SUs, é transmitido um pacote com sucesso ou quando o canal é ocupado pelo PU e então é necessário agendar sensing para STs posteriores. 1 significa que o sensing está agendado, 0 significa que não está. Dimensões: $numSUs$

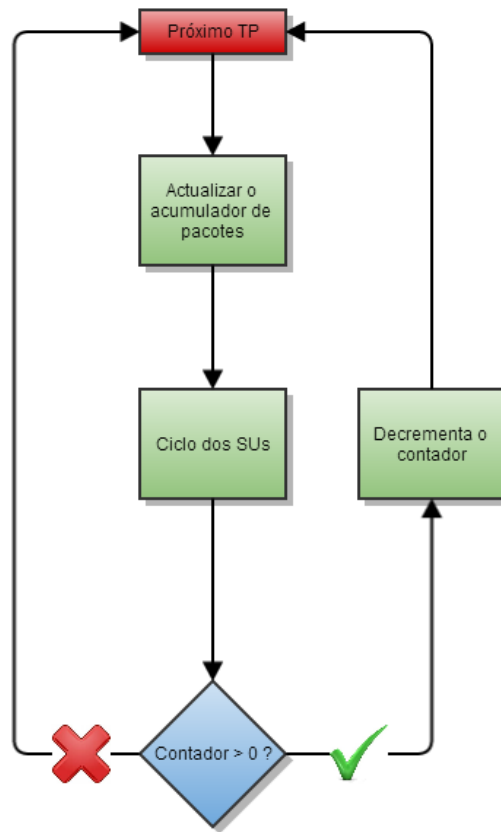


Figura B.1: Ciclo dos TPs em CR-CSMA

```
Flags_de_agendamento_SS = zeros(1,numSUs);
```

Tolerância - esta tolerância vai possibilitar os agendamentos no ciclo dos SUs para STs posteriores ao número total de STs ($Nf \cdot NTP \cdot MST$). No decorrer do ciclo são feitos agendamentos para STs posteriores e quando estiver perto dos fim dos STs o acesso pode ser agendado para STs posteriores aos totais. Esta tolerância evita erro na memória e posteriormente que tenha que se consultar o numero de STs total para agendar o acesso ou o sensing.

`tolerancia_TPs = 100;`

Acesso dos SUs ao canal - indica o ST no qual o pacote é transmitido pelo SU. Este é utilizado nos casos em que os SUs acedem ao canal e também quando um pacote chega no Mth TP ou no TP de sensing e é necessário marcar a transmissão desse pacote para o primeiro ST da frame. Dimensões: $numSUs \times Nf \cdot NTP \cdot MST$

`Acesso_dos_SUs_ao_canal = ...`

`zeros(numSUs, Nf * NTP * MST + tolerancia_TPs);`

Sensing dos SUs ao canal - indica o ST no qual vai ser feito sensing pelo SU. Este vector é marcado quando ocorre uma colisão entre as transmissões dos SUs ou quando o canal está ocupado pelo PU e é necessário agendar sensing para um ST posterior. Dimensões: $numSUs \times Nf \cdot NTP \cdot MST + tolerancia_TPs$

`Sensing_dos_SUs_ao_canal = ...`

`zeros(numSUs, Nf * NTP * MST + tolerancia_TPs);`

Canal - este vector representa o meio. As transmissões de cada SU são somadas aqui em cada ST. Cada posição deste vector representa uma unidade de tempo que neste caso é 1 ST. Cada ST (posição do vector) contém o número de transmissões que acontecem nesse ST. Se houver uma transmissão a posição desse ST vai conter 1 e foi realizada com sucesso. 0 significa que não houve transmissões e >1 houve colisão. Notar que as colisões acontecem durante MST STs. Dimensões: $Nf \cdot NTP \cdot MST + tolerancia_TPs$

`Canal = zeros(1, Nf * NTP * MST + tolerancia_TPs);`

Contador - este contador serve para saber quantos STs o pacote falta ocupar. Notar que cada pacote ocupa MST STs (1 TP) logo é necessário saber quantos STs já se ocupou e quantos faltam ocupar. Um contador é utilizado para todos os SUs pois as transmissões começam sempre ao mesmo tempo. Não acontecem transmissões desfasadas devido ao sensing ao canal da rede secundária.

```
Contador = 0;
```

```
Ciclo dos MST_total
```

```
for m = 1:Nf*NTP*MST
```

Actualizar o Acumulador_de_pacotes com o que está no Trafego_dos_SUs, ou seja, adicionar ao acumulador de pacotes os pacotes que chegaram neste ST para os SUs, caso tenham chegado pacotes.

```
Acumulador_de_pacotes = Acumulador_de_pacotes + ... Trafego_dos_SUs(:,m)';
```

```
Ciclo dos SUs
```

```
for k = 1:numSUs
```

```
Verificar se está a transmitir
```

```
if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m) == 1)
```

```
Saber se é o último ST que o pacote ocupa
```

```
if(Contador == 1)
```

Se foi o último ST que o pacote ocupou é necessário saber se houve colisão entre SUs.

(Houve colisão)

```
if(sum(Acesso_dos_SUs_ao_canal(:,m))>1)
```

```
Agendar o sensing ao canal deste SU que colidiu
```

```
Sensing_dos_SUs_ao_canal(k,m+ random('unid',CW)) = 1;
```

Os SUs que colidiram vão cumprir agendamento para sensing posterior

Flags_de_agendamento_SS(k) = 1;

Não houve colisão

else

Transmitiu com sucesso logo decrementa-se no acumulador de pacotes

Acumulador_de_pacotes(k) = Acumulador_de_pacotes(k) - 1;

Saber se tem mais pacotes para transmitir

if(Acumulador_de_pacotes(k) > 0)

Agendar o sensing para transmitir o próximo pacote. É necessário pois não pode ocupar o canal o que resultaria numa injustiça de acesso ao meio

Sensing_dos_SUs_ao_canal(k,m+ random('unid',CW)) = 1;

Sinalizar o agendamento de sensing

Flags_de_agendamento_SS(k) = 1;

else

Acabou de transmitir e já não tem mais pacotes

continue;

end

end

else

Só transmite se a frame estiver disponível. É necessário verificar pois o acesso pode ter sido agendado devido a um pacote que apareceu no Mth TP ou no de sensing e a sua transmissão foi agendada para o primeiro ST de uma frame ocupada por PUs, logo é

necessário agendar acesso posterior. Se a frame estiver disponível:

```
if(Decisao_nas_Nframes(k,ceil(m/(NTP*MST)))==0)
```

No caso em que o acesso foi agendado para o primeiro ST da frame o contador não foi inicializado pois só deve ser inicializado no ST em que se inicia a transmissão. Nestes casos é necessário saber se é o primeiro ST da Frame após o sensing.

```
if(mod(m,NTP*MST) == MST +1)
```

```
Contador = MST;
```

```
end
```

Ainda tem mais STs para transmitir para este pacote

```
Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+1) = 1;
```

```
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
```

```
else
```

Retirar a transmissão neste ST pois a frame está ocupada por PUs

```
Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m) = 0; Canal(m) = Canal(m) - 1;
```

Agendar Sensing posterior

```
Flags_de_agendamento_SS(k) = 1;
```

Gerar sensing aleatório para este SU

```
Sensing_dos_SUs_ao_canal(k,m+random('unid',CW)) = 1;
```

```
end
```

```
end
```

```
else
```

Calcular qual é a frame actual (através da função ceil) e qual a decisão de sensing (em relação ao PU) deste SU

```
if(Decisao_nas_Nframes(k,ceil(m/(NTP*MST)))==0)
```

Consultar o acumulador de pacotes para saber se há pacotes para transmitir

```
if( Acumulador_de_pacotes(k) > 0)
```

Saber se tem agendado algum pacote para o ST seguinte pode acontecer quando o pacote chega no Mth TP ou no de sensing e a sua transmissão fica agendada para o primeiro ST da frame

```
if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+1) == 1)
```

```
Contador = MST + 1;
```

```
else
```

Ver se tem Sensing agendado

```
if(Flags_de_agendamento_SS(k) == 1)
```

É para este ST?

```
if(Sensing_dos_SUs_ao_canal(k,m) == 1)
```

Retirar a flag de agendamento de sensing

```
Flags_de_agendamento_SS(k) = 0;
```

Saber se é o TP de sensing

```
if(mod(ceil(m/MST),NTP) == 1)
```

Qual o ST dentro dos STs de sensing

```
ST = mod(m,NTP*MST);
```

Só agenda acesso se ainda não tiver agendado

```
if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+(MST+1-ST)) == 0)
```

Agendar transmissão para o primeiro ST da frame

```
Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+(MST+1-ST)) = 1;
```

```

Colocar a transmissão no canal
Canal(m+(MST+1-ST)) = Canal(m+(MST+1-ST)) + 1;

end

Saber se é o Mth TP
elseif(mod(ceil(m/MST),NTP) == 0)

    if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,...
ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) == 0)

        Agendar acesso para o primeiro ST da próxima frame
        Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,...
ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) = 1;

        Colocar a transmissão no canal
        Canal(ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) =...
        Canal(ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) + 1;
        end

        Não é o TP de sensing nem o Mth TP
        else

            Sensing ao canal (detectar SUs)
            if(sum(Acesso_dos_SUs_ao_canal(:,m) > 0))

                Se estiver algum SU a transmitir não faz nada
                continue;
            else

```


Se não estiver nenhum SU a transmitir, transmite e inicia o contador

Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+1) = 1;

Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;

Contador = MST + 1;

end

end

else

Tem sensing agendado mas não é para este ST

continue;

end

else

Saber se é o TP de sensing

if(mod(ceil(m/MST),NTP) == 1)

Qual o ST dentro dos STs de sensing

ST = mod(m,NTP*MST);

Só agenda acesso se ainda não tiver agendado

if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+(MST+1-ST)) == 0)

Agendar transmissão para o primeiro ST da frame

Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+(MST+1-ST)) = 1;

Colocar a transmissão no canal

Canal(m+(MST+1-ST)) = Canal(m+(MST+1-ST)) + 1;

end

Saber se é o Mth TP

elseif(mod(ceil(m/MST),NTP) == 0)

if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,...

ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) == 0)

Agendar acesso para o primeiro ST da próxima frame

Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,...

ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) = 1;

Colocar a transmissão no canal

Canal(ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) =...

Canal(ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) + 1;

end

Não é nem o TP de sensing nem o Mth TP

else

Sensing ao canal (detectar SUs)

if(sum(Acesso_dos_SUs_ao_canal(:,m) > 0))

Se estiver algum SU a transmitir não faz nada

continue;

else

Se não estiver nenhum SU a transmitir, transmite e inicia o contador

Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+1) = 1;

Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;

Contador = MST + 1;

```

end
end
end
end
else

```

Se não tem pacotes no acumulador continua nem está a transmitir passa para o SU seguinte

```

continue;
end

```

A Frame está ocupada por PUs

```

else

```

Ver se tem acesso para o ST seguinte, se tiver é retirado e é gerado acesso aleatório para sensing

```

if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+1) == 1)

```

Retirar o acesso pois a frame está ocupada

```

Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+1) = 0; Canal(m+1) = Canal(m+1) - 1;

```

Gerar sensing aleatório para este SU

```

Sensing_dos_SUs_ao_canal(k,m+random('unid',CW)) = 1;

```

Colocar a flag de agendamento de sensing

```

Flags_de_agendamento_SS(k) = 1;

```

```

else

```

Verificar se tem sensing agendado

```

if(Flags_de_agendamento_SS(k) == 1)

```

```

É para este ST?
if(Sensing_dos_SUs_ao_canal(k,m) == 1)

Gerar sensing aleatório para este SU
Sensing_dos_SUs_ao_canal(k,m+random('unid',CW)) = 1;
else

Tem sensing agendado mas não é para este ST
continue;
end
else
if(Acumulador_de_pacotes(k) > 0)

Saber se é o TP de sensing
if(mod(ceil(m/MST),NTP) == 1 )

Qual o ST dentro dos STs de sensing
ST = mod(m,NTP*MST);

Só agenda acesso se ainda não tiver agendado
if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+(MST+1-ST)) == 0)

Agendar transmissão para o primeiro ST da frame
Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,m+(MST+1-ST)) = 1;

Colocar a transmissão no canal
Canal(m+(MST+1-ST)) = Canal(m+(MST+1-ST)) + 1;

end

```

Saber se é o Mth TP

```
elseif(mod(ceil(m/MST),NTP) == 0)
```

```
if(Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) == 0)
```

Agendar acesso para o primeiro ST da próxima frame

```
Acesso_dos_SUs_ao_canal(k,ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) = 1;
```

Colocar a transmissão no canal

```
Canal(ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) = ...
```

```
Canal(ceil(m/(NTP*MST))*NTP*MST + MST + 1) + 1;
```

```
end
```

Não é nem o TP de sensing nem o Mth TP

```
else
```

Gerar sensing aleatório para este SU

```
Sensing_dos_SUs_ao_canal(k,m+random('unid',CW)) = 1;
```

Colocar a flag de agendamento de sensing

```
Flags_de_agendamento_SS(k) = 1;
```

```
end
```

Como não tem pacote para transmitir passa para o seguinte SU

```
continue;
```

```
end
```

```
end
```


Apêndice C

Implementação do protocolo CR-CSMA/CA

Este Anexo descreve os passos realizados na implementação do protocolo MAC CR-CSMA/CA. Primeiro apresentam-se os parâmetros que podem ser controlados, depois cada função utilizada e as respectivas estruturas de dados e por fim o protocolo. Para o protocolo em si são também apresentados dois fluxogramas, um do SU transmissor e outro do receptor, para além da descrição do código. Nas funções, é descrito o algoritmo da função de uma forma global, depois as estruturas de dados e finalmente a função em si, passo a passo. Nas descrições passo a passo é colocado a cinzento a explicação da instrução antes da mesma.

Parâmetros

numSUs - Número de utilizadores na rede secundária;

numPUs - Número de utilizadores na rede primária;

numMaxSUs - Número máximo de SUs na simulação;

SAP - Número do SU que é visto como SAP

Nf - Número de frames;

NSlots_PU - Número de slots que uma transmissão de um PU ocupa;

numSlots - $Nf * NSlots_{PU}$ - Número total de períodos de transmissão

CW - Janela de contenção inicial para os backoffs;

Actividade_ON - Parâmetro p da distribuição geométrica para a actividade (estado ON/Tx) do PU;

Actividade_OFF - Parâmetro p da distribuição geométrica para a inactividade (estado OFF) do PU;

Pnoc - Probabilidade do canal não estar ocupado;

Pd - Probabilidade de detecção dos SUs;

Pf - Probabilidade de falso alarme dos SUs;

Ritmo_medio_de_geracao_de_pacotes_dos_SUs - Ritmo médio de geração de pacotes dos SUs por frame. A geração de pacotes é feita a partir de uma distribuição de *Poisson*.

Media_dist_exponencial - $1/\text{Ritmo_medio_de_geracao_de_pacotes_dos_SUs}$ - Intervalo de tempo (TP é a unidade de tempo) médio entre pacotes dos SUs;

Numero_de_simulacoes - Número de simulações para cada SU, serve para diminuir o intervalo de confiança;

Inc_SUs - Incremento do número de SUs. Utilizado para diminuir o tempo de simulação;

Funções

Geracao_de_estados_dos_PUs_geometrica(Actividade_ON, Actividade_OFF, Nf, numPUs)

Descrição Geral - Gera um vector construído a partir de duas distribuições geométricas, uma para os estados ON e outra para os OFF alternadamente. No fim transforma esse vector numa matriz de dimensões $Nf \times \text{numPUs}$

Explicação do código:

Inicialização do vector de estados dos PUs

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs = 0;
```

Enquanto o vector de estados dos PUs não conter posições suficientes para ter Nf frames para cada PU continuar a gerar estados para os PUs

```
while (length(Vector_de_estados_de_todos_PUs) < (Nf*numPUs))
```

Acrescentar ao vector uma sequência de 1's (PU activo)seguida de uma de 0's (PU inactivo). O tamanho de cada sequência é retirado da distribuição respectiva

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs = [Vector_de_estados_de_todos_PUs ... ones(1,random('geo',Actividade_...
zeros(1,random('geo',Actividade_OFF,1,1)+1)];
```

Verificar se o vector já tem tamanho suficiente para gerar o tráfego necessário para todos os PUs em todas as frames

```
if (length(Vector_de_estados_de_todos_PUs) > Nf*numPUs)
```

Como provavelmente o vector excede as dimensões desejadas é necessário retirar-lhe as últimas posições que estão a mais. Retira-se também a primeira pois foi forçada a 0 na sua inicialização. Dimensões: Nf*numPUs

```
Vector_de_estados_de_todos_PUs =...
Vector_de_estados_de_todos_PUs(2:Nf*numPUs+1); break; end
end
```

Colocar o vector na forma de matriz com as dimensões desejadas. Dimensões:NfxnumPUs

```
Matriz_estados_PUs =...
reshape(Vector_de_estados_de_todos_PUs,Nf,numPUs);
end
```

`sensing_com_Pd_e_Pf_definida(numSUs, numPUs, Nf, Matriz_estados_PUs, Pd, Pf)`

Descrição Geral -Retorna a decisão dos SUs face ás transmissões dos PUs. Gera uma matriz de dimensões $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$ que contém valores entre 0 e 1 retirados de uma distribuição uniforme. Multiplica-se a matriz de estados dos PUs por essa matriz aleatória e compara-se os valores com $1 - Pd$. Os valores superiores indica que foram detectados, os inferiores não foram (misdetection). De seguida inverte-se a matriz de estados dos PUs (troca-se os 0's pelos 1' e vice-versa) e multiplica-se novamente a matriz de pesos pela matriz de estados. Desta vez vai seleciona-se onde houve falso alarme que ocorre quando os valores dessa multiplicação superam o valor $1 - Pf$.

Explicação do código:

Gerar a matriz com os pesos para cada transmissão, para cada SU em cada frame.
Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Matriz_de_pesos = random('unif',0,1,Nf,numPUs,numSUs);
```

Replicar a Matriz de estados dos PUs para cada SU. Tem que ser feita a decisão num SU em cada frame por cada PU. Cada decisão é independente por isso a Matriz_de_pesos tem todos os seu valores independentes Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Matriz_estados_PUs_ON = Matriz_estados_PUs(:,ones(1,numSUs));
```

Multiplicar os estados dos PUs, em cada Frame e para cada SU, pelos pesos retirados da distribuição aleatória. Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Matriz_de_pesos_Pd = Matriz_de_pesos.*Matriz_estados_PUs_ON;
```

Selecionar os valores acima da Pd considerada pois só esses foram detectados. Considera-se $> 1 - Pd$ para não considerar os zeros (o que significa que não houve transmissão). Dimensões: $N_f \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

```
Deteccoes_Pd = Matriz_de_pesos_Pd > (1-Pd);
```

Matriz onde os PUs estão inactivos. Dimensões: $N_{fx} \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$\text{Matriz_estados_PUs_OFF} = \text{Matriz_estados_PUs_ON} == 0;$

Multiplicar os estados dos PUs(desta vez inactivos), em cada Frame e para cada SU, pelo peso dos valores retirados da distribuição aleatória Dimensões: $N_{fx} \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$\text{Matriz_de_pesos_Pf} = \text{Matriz_de_pesos} * \text{Matriz_estados_PUs_OFF};$

Selecionar os casos em que houve falso alarme. Novamente considera-se $> 1 - P_f$ para não abranger os zeros. Dimensões: $N_{fx} \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$\text{Falso_alarme} = \text{Matriz_de_pesos_Pf} > (1 - P_f);$

Decisão dos SUs (ainda a 3 dimensões). Neste caso a matriz $\text{Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU}$ vai conter 1 onde foi detectada a transmissão do PU ou onde houve falso alarme. Dimensões: $N_{fx} \times \text{numPUs} \times \text{numSUs}$

$\text{Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU} = \text{Detecoes_Pd} + \text{Falso_alarme};$

Somar todas as transmissões dos PUs em cada SU por cada frame. Esta operação é feita porque basta detectar no mínimo um PU para o SU considerar a Frame ocupada. Dimensões: $N_{fx} \times \text{numSUs}$

$\text{Decisao_de_cada_SU_por_Frame} = \text{sum}(\text{Decisao_de_SU_por_Frame_por_PU}, 2);$

Transformar os valores das somas em valores booleanos

$\text{Decisao_de_cada_SU_por_Frame} = \text{Decisao_de_cada_SU_por_Frame} > 0;$

Colocar a matriz de decisões nas dimensões certas. Dimensões: $\text{numSUs} \times N_f$

Comportamento_dos_SUs_CR_CSMA_CA(numSUs, numSlots, NSlots_PU, Decisao_nas_Nframes, SAP)

Ao contrário dos outros dois protocolos, no CR-CSMA/CA os SUs têm sempre um pacote para transmitir. O comportamento de cada SU e do SAP estão representados nas Figuras C.1 e C.2 respectivamente. Esta função implementa o protocolo.

Explicação do código:

Acumulador de pacotes - contém quantos pacotes cada SU tem em lista de espera para serem enviados. Dimensões: numSUs

```
Acumulador_de_pacotes = [0 ones(1,numSUs-1)];
```

Um contador para indicar quantos slots cada SU tem que permanecer no estado em que está com exceção do backoff e blocking_time

```
Contador = zeros(1,numSUs);
```

Acumulador de Sensing acumula as transmissões de PUs durante o periodo de sensing SS. É consultada a decisão na frame correspondente ao slot em que se o ciclo está a correr. De notar que o comportamento dos PUs pode alterar-se durante este periodo.

```
Acumulador_SS = zeros(1,numSUs);
```

Acumulador de CTS recebe a transmissão de CTS do SAP

```
Acumulador_CTS = zeros(1,numSUs);
```

Contador de backoffs de cada SU

```
Contador_de_backoff = zeros(1,numSUs);
```

Como o SAP apenas recebe transmissões é necessário colocar o seu tráfego a zero

```
Trafego_dos_SUs(SAP,:) = 0;
```

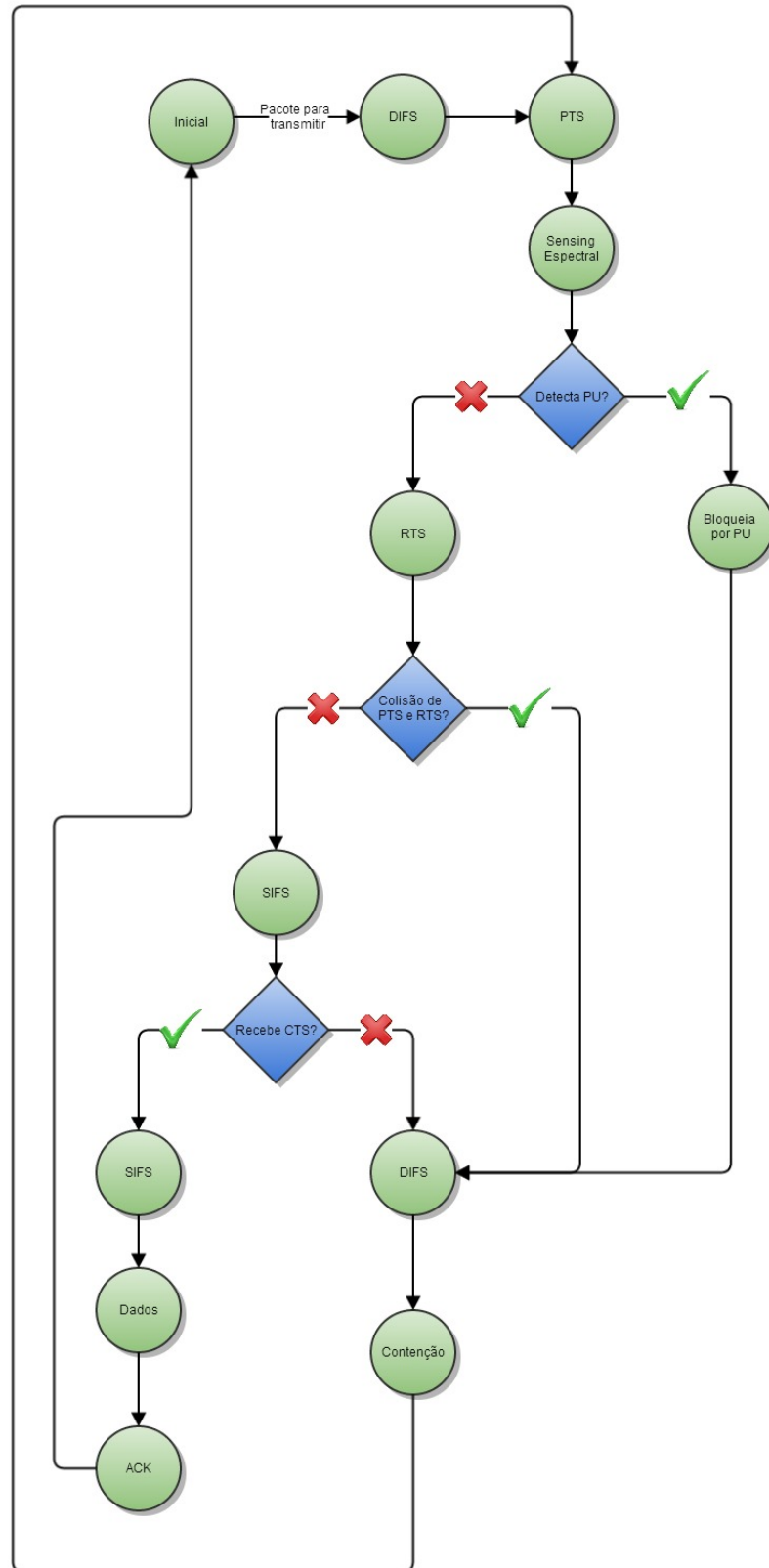


Figura C.1: Ciclo dos SUs

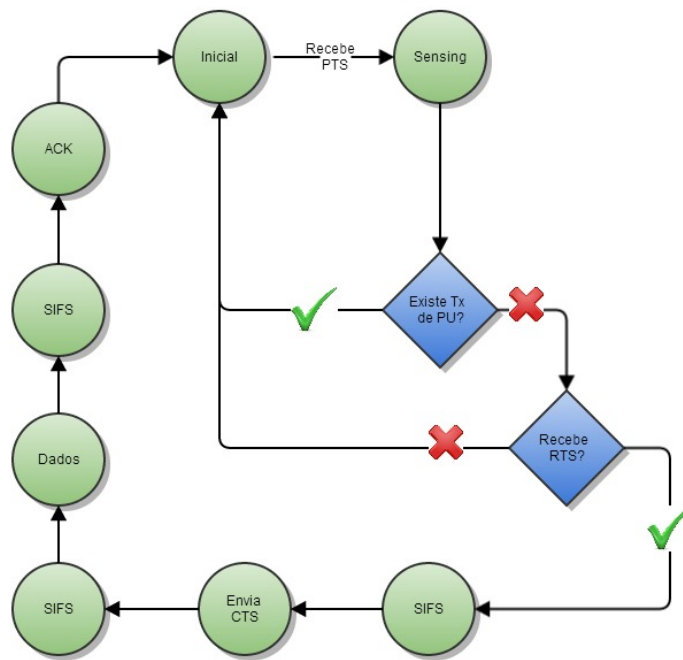


Figura C.2: Ciclo do SAP

Ver no artigo m e n

$M = 5;$

$n = 4;$

Contador de backoffs

`Backoffs_efectuados = zeros(1,numSUs);`

CANAIS

São utilizados diferentes canais para se poder diferenciar os tipos de transmissões

Canal com as transmissões de dados.

`Canal_Dados = zeros(1,numSlots);`

Canal de PTS

`Canal_PTS = zeros(1,numSlots);`

Canal de Sensing, embora não haja transmissão nesta fase este canal é necessário para que os outros SUs fiquem inactivos durante o Sensing

```
Canal_SS = zeros(1,numSlots);
```

Canal de RTS

```
Canal_RTS = zeros(1,numSlots);
```

Canal de CTS

```
Canal_CTS = zeros(1,numSlots);
```

Canal com todas as transmissões de SUs Canal = zeros(1,numSlots);

Configurações

Numero de slots de cada estado. Indica quantos slots um SU permanece no mesmo estado

```
PTS = 15;
```

```
SS = 25;
```

```
CW = 32;
```

```
RTS = 18;
```

```
Sifs = 1;
```

```
Difs = 3;
```

```
CTS = 15;
```

```
Dados = 400;
```

```
Ack = 15;
```

```
blocking_period = 2*(PTS + SS + RTS + CTS + Dados + 3*Sifs + Ack + Difs);
```

Estado = {

'inicial'; Estado em que fica a espera que chegue um pacote. Quando chegar um pacote passa para o estado Difs_pre_PTS

'Difs_pre_PTS'; Difs apos o envio de PTS. Se detectar um SU ou PU reinicia o contador de Difs.

'PTS'; Envio de PTS para Sensing posterior. De seguida vai para o estado de Sensing

'SS'; No sensing verifica se há pelo menos um slot com transmissão de de PU. Se houver

vai para o estado bloqueado por PU. Se não houver inicia a transmissão de RTS e vai para o estado respectivo.

'bloqueado_por_PU';(blocking period)Bloqueado por transmissão de PU. Não faz nada á excepção de decrementar o contador Quando sair daqui vai para o estado Difs_pos_bloqueado_por_PU.

'Difs_pos_bloqueado_por_PU';Depois deste estado gera um backoff e vai para o estado de backoff

'backoff';Em cada slot verifica se há transmissão de SU ou PU. Se houver vai para o estado de bloqueado_por_SU ou bloqueado_por_PU_em_backoff respectivamente. Quando acabar o backoff vai para o estado Difs_pre_PTS

'bloqueado_por_PU_em_backoff';Fica bloqueado por um período de blocking_period. Quando acabar volta ao estado de backoff de onde saiu.

'bloqueado_por_SU';Fica neste estado enquanto houver transmissão de SU. Quando detectar o canal a idle passa para o estado de Difs_pos_bloqueado_por_SU;

'Difs_pos_bloqueado_por_SU';fica neste estado durante um periodo de Difs. Se houver transmissão de SU volta para o estado de bloqueado_por_SU

'RTS';Envio de RTS no canal de RTS. Quando acabar a transmissão verifica se houve colisão com outro SU. Se houve passa para o estado de Difs_pos_RTS. Se não houve passa para Sifs_pos_RTS

'Sifs_pos_RTS';Quando acabar vai para o estado CTS 'Difs_pos_RTS';Após este estado gera backoff e passa para o estado respectivo

'CTS';Fica a espera de receber o CTS do receptor(SAP). Se receber CTS vai para o estado de Sifs_pos_CTS. Se não receber vai para o estado de Difs_pos_CTS

'Difs_pos_CTS';Depois deste estado gera backoff e vai para o estado de backoff

'Sifs_pos_CTS';Após este estado inicia a transmissao de dados

'Dados';Envio de dados. quando acabar passa para Sifs_pos_data

'Sifs_pos_Dados';De seguida passa para estado de Ack

'Ack';Fica a espera de Ack que deve receber sempre e de seguida passa para o estado Difs_pos_Ack.

'Difs_pos_Ack';Após este Difs vai para o estado inicial };

Estado inicial dos SUs, todos são iniciados a 'inicial' Estado_actual = Estado(ones(1,numSUs),:);

Estado do receptor (SAP) Este SU tem um comportamento diferente dos outros SUs. Está incluído no ciclo de SUs mas como não tem tráfego não sai do estado 'inicial'. O seu comportamento está programado a seguir á máquina de estados (switch).

```
Estado_Receptor = 'inicial';
```

```
Ciclo para cada slot
```

```
for m = 1:numSlots-1
```

```
    Actualizar o Acumulador_de_pacotes com o tráfego gerado Trafego_dos_SUs Acumulador_de_pacotes = Acumulador_de_pacotes + ... Trafego_dos_SUs(:,m);
```

```
    Máquina de estados de cada SU
```

```
    for k = 1:numSUs
```

```
        Máquina de estados
```

```
        switch char(Estado_actual(k))
```

```
            case 'inicial'
```

```
                if(Acumulador_de_pacotes(k) > 0)Tem pacote(s) para transmitir
```

```
                    Estado_actual(k) = cellstr('Difs_pre_PTS');
```

```
                    Contador(k) = Difs;
```

```
            end
```

```
            case 'Difs_pre_PTS'
```

```
                Contador(k) = Contador(k) - 1;
```

Encontrou o Canal disponível durante um Difs. Nesta implementação as transmissões são colocadas no slot m+1 para que todos os SUs vejam o mesmo, devido ao for de SUs.

```
                if((Contador(k) == 0) && (Canal(m)==0))
```

```
                    Estado_actual(k) = cellstr('PTS');
```

```
                    Contador(k) = PTS;
```

```

Canal_PTS(m+1) = Canal_PTS(m+1) + 1;
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
end

```

Tem que ver o canal livre durante um Difs por isso reinicia o contador sempre que houver uma transmissão de SU

```

if(Canal(m) > 0)
Contador(k) = Difs;
end

```

```

case 'PTS' Contador(k) = Contador(k) - 1;
if(Contador(k) == 0)
Estado_actual(k) = cellstr('SS');
Contador(k) = SS;
Canal_SS(m+1) = Canal_SS(m+1) + 1;
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
else
Canal_PTS(m+1) = Canal_PTS(m+1) + 1;
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
end

```

case 'SS' Contador(k) = Contador(k) - 1; verificar se houve transmissão de PUs durante o tempo de sensing. Notar que os não existe sincronização ao nível de frames, apenas nos slots. Por isso durante o tempo de sensing é possível observar variação no comportamento dos PUs

```

Acumulador_SS(k) = Acumulador_SS(k) + ...
Decisao_nas_Nframes(k,ceil(m/NSlots_PU));
if(Contador(k) == 0)

```

```

Detectou PU

```

```

if(Acumulador_SS(k) > 0)
Estado_actual(k) = cellstr('bloqueado_por_PU');
Acumulador_SS(k) = 0;
Contador(k) = blocking_period;

Não detectou PU
else
Estado_actual(k) = cellstr('RTS');
Contador(k) = RTS;
Acumulador_SS(k) = 0;
Canal_RTS(m+1) = Canal_RTS(m+1) + 1;
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
end
else
Canal_SS(m+1) = Canal_SS(m+1) + 1;
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
end

case 'bloqueado_por_PU'
Contador(k) = Contador(k) - 1;
if(Contador(k) == 0)
Estado_actual(k) = cellstr('Difs_pos_bloqueado_por_PU');
Contador(k) = Difs;
end

case 'Difs_pos_bloqueado_por_PU'
Contador(k) = Contador(k) - 1;
if(Contador(k) == 0)
if( Backoffs_efectuados(k) < M)
Estado_actual(k) = cellstr('backoff');

```

```

Contador_de.backoff(k) = random('unid',2 $\hat{B}$ Backoffs_efectuados(k)*CW);
Backoffs_efectuados(k) = Backoffs_efectuados(k) + 1;
else
Backoffs_efectuados(k) = 0;
Estado_actual(k) = cellstr('inicial');
end
end

case 'backoff'
if(Decisao_nas_Nframes(k,ceil(m/NSlots_PU) == 1))
Estado_actual(k) = cellstr('bloqueado_por_PU_em_backoff');
Contador(k) = blocking_period;
elseif(Canal(m) > 0)
Estado_actual(k) = cellstr('bloqueado_por_SU');
else
Contador_de.backoff(k) = Contador_de.backoff(k) - 1;
if(Contador_de.backoff(k) == 0)
Estado_actual(k) = cellstr('Difs_pre_PTS');
Contador(k) = Difs;
end
end

case 'bloqueado_por_PU_em_backoff'
Contador(k) = Contador(k) - 1;
if(Contador(k) == 0)
Estado_actual(k) = cellstr('backoff');
end

case 'bloqueado_por_SU'
if(Canal(m) == 0)

```

```
Estado_atual(k) = cellstr('Difs_pos_bloqueado_por_SU');
```

```
Contador(k) = Difs;
```

```
end
```

```
case 'Difs_pos_bloqueado_por_SU' Contador(k) = Contador(k) - 1;
```

```
if(Canal(m) > 0) Estado_atual(k) = cellstr('bloqueado_por_SU');
```

```
elseif(Contador(k) == 0)
```

```
Estado_atual(k) = cellstr('backoff');
```

```
end
```

```
case 'RTS'
```

```
Contador(k) = Contador(k) - 1;
```

```
if (Contador(k) == 0)
```

Houve colisão de SU, considera-se a colisão apenas no RTS

```
if(sum(Canal_RTS(m-RTS:m)) > RTS)Se houver mais Tx que RTS
```

quer dizer que houve mais do que um SU a transmitir RTS

```
Estado_atual(k) = cellstr('Difs_pos_RTS'); Contador(k) = Difs;
```

Não houve colisão de SU

```
elseif(sum(Canal_RTS(m-RTS:m)) == RTS)
```

```
Estado_atual(k) = cellstr('Sifs_pos_RTS');
```

```
Contador(k) = Sifs;
```

```
else
```

```
Erro_RTS_k = k
```

```
end
```

```
else
```

```
Canal_RTS(m+1) = Canal_RTS(m+1) + 1;
```

```
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
```

```

end

case 'Difs_pos_RTS'
Contador(k) = Contador(k) - 1;
if(Contador(k) == 0)
if( Backoffs_efectuados(k) < M)
Estado_atual(k) = cellstr('backoff');
Contador_de_backoff(k) = random('unid',2*Backoffs_efectuados(k)*CW);
Backoffs_efectuados(k) = Backoffs_efectuados(k) + 1;
else
Backoffs_efectuados(k) = 0;
Estado_atual(k) = cellstr('inicial');
end
end

case 'Sifs_pos_RTS'
Contador(k) = Contador(k) - 1;
if(Contador(k) == 0)
Estado_atual(k) = cellstr('CTS');
Contador(k) = CTS;
end

case 'CTS'
Contador(k) = Contador(k) - 1;
Acumulador_CTS(k) = Acumulador_CTS(k) + Canal_CTS(m);
if(Contador(k) == 0)

Recebeu CTS
if(Acumulador_CTS(k) == CTS)
Estado_atual(k) = cellstr('Sifs_pos_CTS');

```

```

Contador(k) = Sifs;
Acumulador_CTS(k) = 0;

```

```

Não recebeu CTS

```

```

elseif(Acumulador_CTS(k) == 0)
Estado_atual(k) = cellstr('Difs_pos_CTS');
Contador(k) = Difs;
else
Erro_CTS = k
end
end

```

```

case 'Difs_pos_CTS'

```

```

Contador(k) = Contador(k) - 1;
if(Contador(k) == 0)
if( Backoffs_efectuados(k) < M)
Estado_atual(k) = cellstr('backoff');
Contador_de.backoff(k) = random('unid',2*Backoffs_efectuados(k)*CW);
Backoffs_efectuados(k) = Backoffs_efectuados(k) + 1;
else
Backoffs_efectuados(k) = 0;
Estado_atual(k) = cellstr('inicial');
end
end

```

```

case 'Sifs_pos_CTS'

```

```

Contador(k) = Contador(k) - 1;
if(Contador(k) == 0)
Estado_atual(k) = cellstr('Dados');
Contador(k) = Dados;

```

```
Canal_Dados(m+1) = Canal_Dados(m+1) + 1;  
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1; end
```

```
case 'Dados'  
Contador(k) = Contador(k) - 1;  
if(Contador(k) == 0)  
Estado_atual(k) = cellstr('Sifs_pos_Dados');  
Contador(k) = Sifs;  
else  
Canal_Dados(m+1) = Canal_Dados(m+1) + 1;  
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;  
end
```

```
case 'Sifs_pos_Dados'  
Contador(k) = Contador(k) - 1;  
if(Contador(k) == 0)  
Estado_atual(k) = cellstr('Ack');  
Contador(k) = Ack;  
end
```

```
case 'Ack'  
Contador(k) = Contador(k) - 1;  
if(Contador(k) == 0)  
Estado_atual(k) = cellstr('Difs_pos_Ack');  
Contador(k) = Difs;  
end
```

```
case 'Difs_pos_Ack'  
Contador(k) = Contador(k) - 1;  
if(Contador(k) == 0)
```



```

Estado_atual(k) = cellstr('inicial');
end
end
end
switch char(Estado_Receptor)
case 'inicial'

Recebeu um PTS
if(Canal_PTS(m+1) > 0)
Estado_Receptor = cellstr('PTS');
Contador(SAP) = PTS;
end
case 'PTS'
Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
if(Contador(SAP) == 0)
Estado_Receptor = cellstr('SS');
Contador(SAP) = SS;
end

case 'SS' Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
Acumulador_SS(SAP) = Acumulador_SS(SAP) + ...
Decisao_nas_Nframes(SAP,ceil(m/NSlots_PU));
if(Contador(SAP) == 0)
if(Acumulador_SS(SAP) > 0)
Estado_Receptor = cellstr('inicial');
Acumulador_SS(SAP) = 0;
Contador(SAP) = 0;

Não detectou PU, verificar se recebeu RTS
elseif(Canal_RTS(m+1) > 0)

```

```

Estado_Receptor = cellstr('RTS');
Contador(SAP) = RTS;
Acumulador_SS(SAP) = 0;
else Estado_Receptor = cellstr('inicial');
Acumulador_SS(SAP) = 0;
Contador(SAP) = 0;
end
end

case 'RTS'
Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
if (Contador(SAP) == 0)
Houve colisão de SU, considera-se a colisão apenas no RTS
if(sum(Canal_RTS(m-RTS:m)) > RTS)Se houver mais Tx que RTS
quer dizer que houve mais do que um SU a transmitir RTS
Estado_Receptor = cellstr('inicial');
Não houve colisão de SU
elseif(sum(Canal_RTS(m-RTS:m)) == RTS)
Estado_Receptor = cellstr('Sifs_pos_RTS');
Contador(SAP) = Sifs;
else
Erro_SAP_RTS = k
end
end

case 'Sifs_pos_RTS'
Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
if (Contador(SAP) == 0)
Estado_Receptor = cellstr('CTS');
Canal_CTS(m+1) = Canal_CTS(m+1) + 1;

```

```
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
Contador(SAP) = CTS;
end

case 'CTS'
Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
if(Contador(SAP) == 0)
Estado_Receptor = cellstr('Sifs_pos_CTS');
Contador(SAP) = Sifs;
else
Canal_CTS(m+1) = Canal_CTS(m+1) + 1;
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
end

case 'Sifs_pos_CTS'
Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
if(Contador(SAP) == 0)
Estado_Receptor = cellstr('Datos');
Contador(SAP) = Datos;
end

case 'Datos'
Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
if(Contador(SAP) == 0)
Estado_Receptor = cellstr('Sifs_pos_Dados');
Contador(SAP) = Sifs;
end

case 'Sifs_pos_Dados'
Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
```

```
if(Contador(SAP) == 0)
Estado_Receptor = cellstr('Ack');
Contador(SAP) = Ack;
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
end
case 'Ack'
Contador(SAP) = Contador(SAP) - 1;
if(Contador(SAP) == 0)
Estado_Receptor = cellstr('inicial');
else
Canal(m+1) = Canal(m+1) + 1;
end end
end
end
```

Apêndice D

Publicações

On the Performance of Decentralized CR MAC Protocols under Heterogeneous Channel Sensing Conditions

Miguel Luís⁽¹⁾⁽²⁾, Rui Luis⁽¹⁾, Rodolfo Oliveira⁽¹⁾⁽²⁾, Rui Dinis⁽¹⁾⁽²⁾, Luis Bernardo⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾CTS, UNINOVA, Dep. de Eng. Electrotécnica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, FCT,

Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal

⁽²⁾IT, Instituto de Telecomunicações, Portugal

Abstract—The decentralized Cognitive Radio Medium Access Control (CR MAC) protocols proposed so far are usually evaluated considering homogeneous sensing conditions where all SUs share the same view of the channel. By doing so, realistic heterogeneous channel sensing conditions are neglected, which happens due to different spectrum sensing errors and/or different patterns of channel occupation by the different primary users. This work aims to study the performance of CR MAC protocols when different SUs competing for the medium sense the channel differently, *i.e.*, when they achieve different channel sensing decisions at the same instant. The study includes several simulation results comparing the performance of two random access (RA) contention-based protocols and one reservation-based (RB) protocol in terms of throughput under homogeneous and heterogeneous channel sensing conditions. By adopting a systematic approach to characterize the heterogeneity of the SUs' sensing outcomes, it is shown that an increase in the level of heterogeneity decreases the aggregate throughput of all protocols. The results also indicate that under homogeneous channel sensing outputs the RB protocol outperforms the RA protocols. However, due to reservation impairments caused by the heterogeneity, it is shown that heterogeneity causes an higher throughput loss in the RB MAC approach.

Keywords: Cognitive Radio, Medium Access Control, Performance Analysis.

I. INTRODUCTION

Cognitive radio networks (CRNs) are an effective solution to alleviate the increasing demand for radio spectrum [1]. In these networks non-licensed users, commonly referred to as secondary users (SUs), must be aware of the activity of the licensed users, denominated primary users (PUs), to dynamically access the spectrum without causing harmful interference to PUs. In decentralized cognitive radio networks (dCRNs) the SUs are not managed by a central coordinator, meaning that SUs must adopt distributed policies able to manage the network in an efficient way.

A multitude of MAC protocols for dCRNs have been proposed in the last years. Usually, these works are only evaluated considering homogeneous channel sensing conditions, *i.e.*, a scenario where all SUs assume the same channel condition (idle/busy) for each sensing period. However, due to imperfect sensing, channel conditions, *e.g.* fading and/or shadowing, or even due to the network topology (*e.g.* different path losses caused by different distances between the SUs and the PU

transmitter), it is possible that a group of SUs may experience different channel sensing outputs at the same sensing period. Differently from the homogeneous channel sensing assumption, in this work we characterize the performance of three decentralized Split Phase (dSP) MAC protocols when heterogeneous channel sensing outcomes are considered. As far as we know this is the first attempt to characterize the impact of heterogeneous sensing outcomes in the performance of the CR MAC protocols, thereby contributing to a more realistic analysis. The paper starts by adopting a simple metric to formally characterize the level of channel sensing dissimilarity of the different SUs, which quantifies the level of heterogeneity. The metric is then used to characterize three different network scenarios. These scenarios are used to evaluate the dSP protocols. The evaluation is based on a comparison of the throughput achieved by the SUs under the different heterogeneous channel sensing conditions. The results obtained in a homogeneous sensing scenario are also included for comparison purposes. The conclusions of this work confirm that the heterogeneity deeply impacts on the performance of dSP MAC protocols.

The next section overviews the state of the art in MAC protocols for dCRNs. Section III introduces the considered system. Section IV briefly describes the CR MAC protocols evaluated in this work. Simulation results evaluating the impact of heterogeneity in the channel sensing decisions are discussed in Section V. Finally, some concluding remarks are given in Section VI.

II. RELATED WORK

The first MAC schemes proposed for dCRNs were considering multi-channel networks, where the number of channels available for each SU varies in time and in space. To control the access of the nodes to the different channels most of the protocols assume the use of a common control channel (CCC) [2]–[4]. Usually the adoption of a CCC requires the use of two radios, one for signaling and another for data transmission. But the adoption of a single radio is also allowed in the so-called Split Phase protocols [5], in which the time frame is divided in two parts: a first part used for signaling and control, where the users overhear control messages to be aware of

the network status and can send control messages to indicate their own information/requests; a second part dedicated to data transmission if channel access was granted during the first part. Examples of Split Phase protocols for single radio multi-channel networks include [2] and [3], where the signaling is performed out-of-band, *i.e.* in a dedicated or shared control channel. But the adoption of a control channel can raise several problems, including the availability of such a channel in several scenarios or the saturation of the channel when the signaling traffic increases. Other protocols, such as the standard IEEE 802.22 [6] and the protocol described in [7], avoid the use of a control channel by handling signaling and data transmission in the same channel (in-band signaling). But these protocols adopt a centralized architecture, where a central node (e.g. a base station) coordinates the channel access [6] or manages the spectrum sensing [7].

Much less work has been done in dSP protocols. dSP protocols present numerous challenges: they must guarantee protection to PUs while granting access to SUs in an efficient way. Random Access (RA) protocols, such as the slotted CR-ALOHA [8] and the CR-CSMA [9], which were compared in [10] considering homogeneous channel sensing, are usually proposed to implement SU's distributed channel access in a SP-like scheme. In these schemes the SUs maintain a sufficient detection probability to avoid interference with PUs and simultaneously schedule the transmissions of the SUs. However, RA schemes may exhibit low performance due to the tradeoff between the the probability of collision and the probability of finding idle medium access slots [11]. Reservation-based (RB) policies can also be used to implement SU's distributed channel access. The MAC scheme proposed in [12] adopts a reservation scheme relying on two stages of contention, where the main advantage is the reduction of the number of idle slots required to schedule the SUs' transmissions when compared to RA protocols.

III. SYSTEM MODEL

This work addresses a scenario where n SUs wish to transmit to a single receiver in an opportunistic way, when the channel is not being used by PUs. Because only dSP protocols are considered, their framing structure can be generalized for both RA and RB MAC approaches.

SUs are equipped with a single radio transceiver, meaning that each SU will have to divide its operation cycle (time frame structure) into spectrum sensing and spectrum access periods, with durations T_S^{SU} and T_D^{SU} respectively, as illustrated in Figure 1. The time frame is divided into slots, where each slot duration is given by the channel sampling period [13]. φ is a time interval that may be needed to synchronize/signaling the SUs. The first N_S slots are allocated for spectrum sensing and the remaining ones are used to synchronization (only in RB protocols) and channel access (in both RA and RB protocols).

A. Primary Users' Behaviors

Each PU has an ON-OFF behavior, meaning that it is active during an average T_{ON}^{PU} time period, and inactive during a

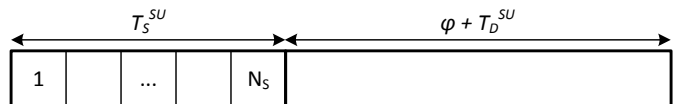


Fig. 1. SU's time frame structure.

T_{OFF}^{PU} interval. The PU's activity is modeled by two random processes. The first one models the active period duration and the second models the inactive period duration. Both durations are sampled from geometric distributions with mean μ_{ON} and μ_{OFF} , respectively. The probabilities of a PU staying OFF and ON are respectively given by $P_{OFF}^{PU} = \mu_{OFF}/(\mu_{OFF} + \mu_{ON})$ and $P_{ON}^{PU} = \mu_{ON}/(\mu_{OFF} + \mu_{ON})$.

B. Channel Sensing

While different spectrum sensing techniques can be adopted [14], in this work we consider that SUs sense the channel during the period T_S^{SU} using an energy-based sensing (EBS) technique [15]. To distinguish between occupied and vacant spectrum bands, SUs sample the channel during the sensing period T_S^{SU} and the energy detector computes the power Y of the received signal and compares it with a predetermined threshold θ . Based on the result, the spectrum may be declared idle ($Y < \theta$) or busy ($Y \geq \theta$). The performance of the energy detector is determined for each individual SU i by the probabilities of detection ($P_{D,i}$) and false alarm ($P_{FA,i}$), which are defined for an additive white gaussian noise channel as being [15]

$$P_{D,i} \approx \mathcal{Q} \left(\frac{\theta - (N_S + \lambda)}{\sqrt{2(N_S + 2\lambda)}} \right), \quad (1)$$

and

$$P_{FA,i} \approx \mathcal{Q} \left(\frac{\theta - N_S}{\sqrt{2N_S}} \right). \quad (2)$$

In $P_{D,i}$ and $P_{FA,i}$, $\mathcal{Q}(\cdot)$ denotes the complementary distribution function of the standard normal distribution and λ represents the signal-to-noise-ratio (SNR) [16].

Following the SU's time frame illustrated in Figure 1, SUs may declare an idle or busy transmitting period with duration T_D^{SU} , if the spectrum sensing applied during the N_S slots indicates absence or presence of a PU, respectively. SUs start to decide their medium access from the moment when the present frame is declared idle or busy. After collecting N_S spectrum samples the adopted sensing scheme decides the spectrum occupancy status. The probability of the SU i deciding that the channel is vacant in a given instant is given by

$$P_i = P_{OFF,i}^{PU}(1 - P_{FA,i}) + P_{ON,i}^{PU}(1 - P_{D,i}), \quad (3)$$

which accounts with the sensing accuracy of each SU, by including the EBS' individual probabilities of misdetection ($1 - P_{D,i}$) and correct PU absence rejection ($1 - P_{FA,i}$).

As stated before, due to several factors such as imperfect sensing, channel conditions, e.g. fading and/or shadowing, or

even due to the network topology (as illustrated in the scenario represented in Figure 2) it is possible that a group of SUs may experience different channel sensing outputs at the same sensing period.

To evaluate the impact of the channel sensing heterogeneity in the performance of the dSP protocols, we propose a metric to characterize the level of sensing dissimilarity achieved by the different SUs at the same instant of time. Let \vec{P}_i represent a vector with consecutive l channel decisions achieved by a SU i in a finite period of time. We adopt the sample Pearson product-moment correlation coefficient [17] to measure the correlation between the channel decisions of a SU i and the remaining SUs, resulting in the following correlation matrix

$$R = \begin{bmatrix} \sqrt{r_{1,1}^2} & \sqrt{r_{1,2}^2} & \cdots & \sqrt{r_{1,n}^2} \\ \sqrt{r_{2,1}^2} & \sqrt{r_{2,2}^2} & \cdots & \sqrt{r_{2,n}^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{r_{n,1}^2} & \sqrt{r_{n,2}^2} & \cdots & \sqrt{r_{n,n}^2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

where $r_{i,j}$ is the sample Pearson's correlation coefficient between SUs i and j given by

$$r_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^l (\vec{P}_i(k) - \mathbb{E}[\vec{P}_i]) (\vec{P}_j(k) - \mathbb{E}[\vec{P}_j])}{\sqrt{\sum_{k=1}^l (\vec{P}_i(k) - \mathbb{E}[\vec{P}_i])^2} \sqrt{\sum_{k=1}^l (\vec{P}_j(k) - \mathbb{E}[\vec{P}_j])^2}}, \quad (5)$$

where $\mathbb{E}[\cdot]$ represents the expected value. By computing the average of all the elements of the strictly upper triangular matrix of R , which is denoted by \bar{R} , we obtain a single value for the mean correlation for each scenario. The parameter \bar{R} is used to characterize the level of dissimilarity of the channel sensing decisions of each scenario, indicating higher levels of heterogeneity as \bar{R} approaches 0 and lower levels of heterogeneity as \bar{R} approaches 1.

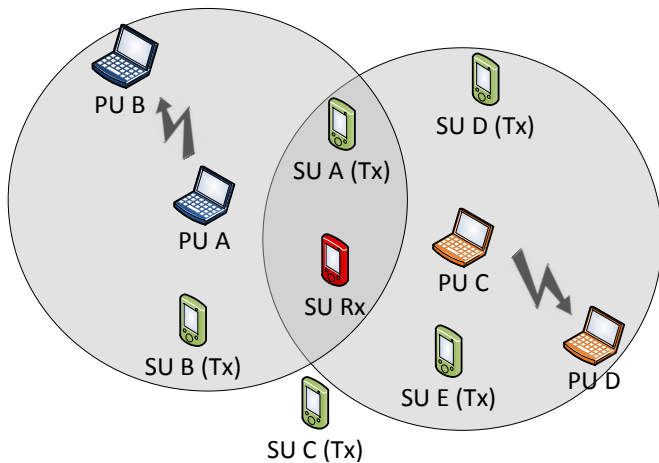


Fig. 2. Hypothetical scenario of a network with heterogeneous channel sensing outputs due to the network topology. Here the SUs (SU A, SU B, SU C, SU D, SU E and SU Rx) may sense different channel states at the same instant of time, due to the different behavior of the PUs located in their neighborhood.

IV. CR MAC PROTOCOLS

Three dSP CR MAC protocols were selected to evaluate the impact of heterogeneous channel sensing decisions: two RA protocols, the slotted CR-ALOHA [8] and the CR-CSMA [9], and one RB protocol, presented in [12]. In this section we will briefly overview the operating behavior of each MAC protocol.

A. Slotted CR-ALOHA

The slotted CR-ALOHA was developed departing from the traditional slotted ALOHA, which differs in the discrete channel access time and the constraint of protecting the primary network. The authors assume that, for each frame, the data transmission duration is slotted (M slots), and the slot size (T_P) is equal to the length of a fixed packet transmission time together with the propagation delay. By this way, in each SU's frame duration, more than one SU can compete for channel access which reduces the waiting time. The slotted CR-ALOHA operates as follows:

- If a SU detects that the channel is available in the current frame, any packet arriving in the last slot of the previous frame will be transmitted in the first slot of the current frame; otherwise, if the packet arrives in the k th remaining slots, it will start to transmit the packet at the beginning of the $(k + 1)$ th slot;
- If the channel is unavailable, any packet arrival within this frame up to the next-to-last slot will be blocked to the end of this frame, and then uniformly retransmitted with a backoff window of size $[0, X]$;
- The packets involved in a collision will be retransmitted using non-related random delays to avoid continuously repeated conflicts;
- Finally, any arrival in the last slot of one frame will be processed in the next frame.

B. CR-CSMA

CR-CSMA follows the same rationale behind the slotted CR-ALOHA, however in this case the transmission duration of each frame, with slot size T_P , is now divided into m mini-slots. In slotted CR-ALOHA, SUs transmit only from the beginning of a slot, and so they do not have to keep sensing the channel until the end of the frame. Under CR-CSMA, SUs become more aggressive because they keep sensing until the channel becomes idle. This way, in CR-CSMA each packet may be transmitted at the beginning of the next mini-slot, turning it into a more efficient packet scheduling scheme.

C. Reservation-based CR MAC Protocol

Figure 3 introduces the reservation-based CR MAC protocol, in which a **transmission cycle** comprises two stages of contention. The **first stage of contention** aims to decrease the number of collisions between SUs by reducing the number of competing SUs. This stage lasts a single idle frame (1^{st} frame in the example depicted in Figure 3(a)), being its transmission period T_D^{SU} divided in cw_1 mini-slots. In the beginning of the first stage the SUs randomly select a mini-slot with probability

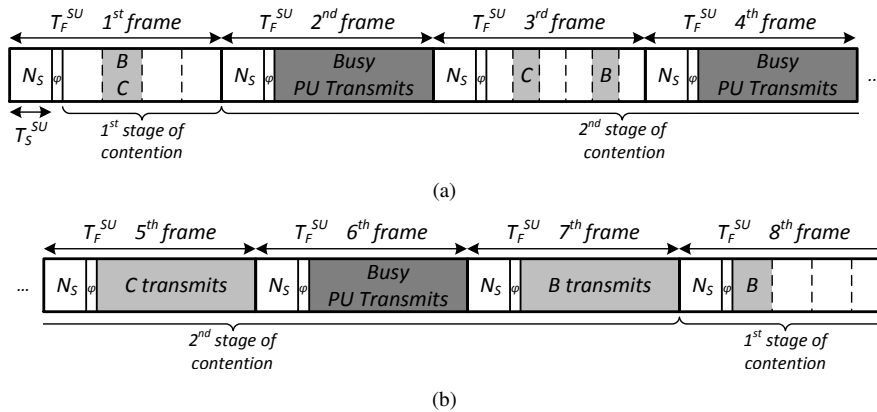


Fig. 3. Transmission cycle of the reservation-based CR MAC protocol: (a) first stage of contention and reservation phase of the second stage of contention ($cw_1 = 4$ and $cw_2 = 6$); (b) frames reserved by nodes C and B are used for transmission (transmission phase of the second stage).

$\tau_1 = 1/cw_1$ (non-selfish SUs), which serves to announce its intention to access the medium. However, a SU will only transmit its mini-packet if the previous mini-slots were found idle, *i.e.* if a SU senses a mini-slot busy before transmitting its mini-packet it will postpone the transmission attempt to the next transmission cycle. According to this rule only the SUs that have transmitted a mini-packet in the first stage will be able to compete in the second stage. In Figure 3(a), SUs B and C transmit a mini-packet in the second mini-slot of the 1st frame, while SU A will not transmit its mini-packet scheduled for the 4th mini-slot because SUs B and C had already transmitted. This means that only SUs B and C will compete in the second contention stage, since they were the first nodes accessing a mini-slot in the frame¹.

Nodes selected in the first stage will be able to compete in the **second stage of contention**. The spectrum access period T_D^{SU} of the first idle frame in the second stage is divided into cw_2 mini-slots, which are used to reserve at most cw_2 future idle frames for channel access. This is called the **reservation phase of the second stage**. Admitting that n_{st2} SUs compete for medium access in the second stage, they reserve an idle frame by transmitting a mini-packet in one of the frame's mini-slots $\{1, 2, \dots, cw_2\}$. Each SU chooses a mini-slot with probability $\tau_2 = 1/cw_2$. In the example illustrated in Figure 3(a), the second stage of contention begins in the 2nd frame, however the reservation phase only occurs in the next idle frame, which is the 3rd frame. The transmission period of the frame is divided in $cw_2 = 6$ mini-slots. The SU C transmits a mini-packet in the second mini-slot and the SU B transmits its mini-packet in the fifth mini-slot. The number of idle frames reserved for future transmission is equal to the number of busy mini-slots, and the sequence of reserved frames is assigned to the SUs in the same order as they access the cw_2 mini-slots. If more than one SU access to the same mini-slot a collision occurs. After elapsing the cw_2 mini-slots of the reservation phase, SUs use the reserved frames to transmit, and this period

¹For the sake of simplicity, PU's frames were illustrated having the same size as SU's frame.

is denominated **transmission phase of the second stage**. In the example illustrated in Figure 3, the first idle frame occurring after the 3rd frame is reserved for the transmission of node C, which occurs in the 5th frame illustrated in Figure 3(b). The same follows for the reservation done by node B, which transmits in the 7th frame. The transmission cycle lasts for the first seven frames and a new transmission cycle begins in the 8th frame. Neglecting the number of busy frames occupied by PU's transmissions (2nd, 4th and 6th frames in the example), the second stage lasts for the number of idle frames equal to the number of busy mini-slots observed in the reservation phase (5th and 7th frames), plus the idle frame where the cw_2 mini-slots were defined (3rd frame).

The dissimilarity of spectrum sensing decisions may lead a SU to become frame delayed or in-advance with relation to other SUs, mixing the first and the second stages of contention. To overcome this situation the reservation-based scheme assume that the SU receiver is selected to transmit a narrow out-of-band tone after the spectrum sensing period, which is used by the neighbor SUs to resynchronize and signal the first and the second MAC stages of contention. Note that the signalling will only occur in the frames designated to accommodate the first and second MAC stages of contention.

V. PERFORMANCE EVALUATION

A. Simulation Setup

To simulate the CR MAC protocols and to evaluate the impact of heterogeneous channel spectrum sensing, we have defined a CRN formed by multiple SUs transmitting to a single SU receiver, under saturated traffic conditions. The SU transmitters were randomly distributed in a $500m \times 500m$ scenario while the SU receiver was placed in the center. 10^6 SUs timing frames were simulated in the three MAC schemes.

Since the main goal of this work is to evaluate the impact of heterogeneous spectrum sensing decisions in the performance of distributed SP CR MAC protocols, almost *perfect* spectrum sensing was used in all protocols ($P_{D,i} \geq 0.95$ and $P_{FA,i} \leq 0.05$). The cost of the previous assumption was reflected in the duration of the spectrum sensing duration in the SU's frame,

and consequently, in the remaining available frame's duration that could be used by the SUs for data transmission.

To simulate the heterogeneity in the channel sensing decisions we have decided to create three scenarios with three levels of dissimilarity:

- a scenario with *low (Low)* dissimilarity where only one pair of PUs was placed in the scenario;
- a second scenario with *medium (Med)* dissimilarity, where two pairs of PUs were placed in the scenario to create a moderated level of heterogeneity in the SU's channel sensing decisions;
- and finally, a third scenario with *high (High)* dissimilarity consisting of three pairs of PUs.

In the three scenarios the average channel availability on each SU is approximately 70%, *i.e.* $P_i \approx 0.7$. The average of the correlation coefficients, \bar{R} , achieved in each scenario was²: $\bar{R}_{Low} \approx 0.781$, $\bar{R}_{Med} \approx 0.455$ and $\bar{R}_{High} \approx 0.154$. The remaining parameters used in the energy detector and in the CR MAC protocols evaluated are summarized in Table I.

TABLE I
PARAMETERS USED IN THE SIMULATIONS.

Common parameters			
Sensed band	10 kHz	Channel Sampl. Period	50 μ s
$T_S^{SU} + T_D^{SU}$	20.0 ms	N_S^{min}	20
P_{PU}^{OFF}	0.7	μ_{OFF}	140 ms
λ (SNR)	5 dB	θ	38.3 J
CR-ALOHA / CR-CSMA			
M	20	T_P	1 ms
m	20	X	$4n$
Reservation-based MAC			
cw_1	3	cw_2	100

B. Experimental Results

Before evaluating the impact of heterogeneous spectrum sensing conditions on CR MAC schemes, we evaluate their performance under homogeneous spectrum sensing decisions, *i.e.*, when all the SUs and the SU AP share the same view of the channel. This way, we have a bound for the maximum achievable throughput.

Figure 4 compares the aggregated normalized throughput achieved by the slotted CR-ALOHA, CR-CSMA and the reservation-based MAC protocol for a different number of SUs competing for the medium. Observing the simulations results we can see that the reservation-based scheme achieves higher throughput when compared to the others. We can also observe that for a small number of SUs, the cost of having two frames exclusively for reservation purposes impacts negatively the throughput achieved by the reservation-based protocol. However, when the number of SUs increases, the impact of the reserved frames becomes negligible when compared to the

²The coefficient of correlation is approximately the same for every pair of SUs.

transmission period. Regarding slotted CR-ALOHA and CR-CSMA protocols, their throughput does not depend on the number of SUs because the SUs' contention window (X) is linearly increased with the number of SUs ($X = 4n$ was considered).

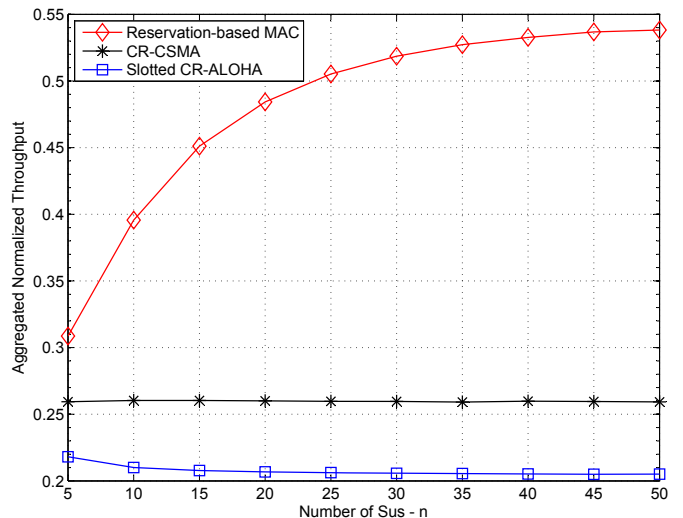


Fig. 4. Throughput comparison among slotted CR-ALOHA, CR-CSMA and Reservation-based MAC considering an homogeneous channel sensing scenario.

Figure 5 compares the performance of slotted CR-ALOHA, CR-CSMA and the reservation-based MAC scheme under heterogeneous channel sensing conditions. The first observation goes to the impact of heterogeneity in the RA MAC schemes. As we can see, and comparing the throughput presented in Fig. 4 for homogeneous channel sensing outputs, the heterogeneity does not significantly decrease the performance of these schemes. We highlight that even for homogeneous channel sensing decisions, these schemes already present a low performance due to the collision of multiple SUs' transmissions. Since the sensing heterogeneity impacts in the successful transmissions, their impact in the aggregate throughput is moderate.

Regarding the performance of the reservation-based scheme, we can see that it significantly decreases as the sensing heterogeneity increases. This is mainly due to the fact that during the reservation period, the protocol reserves the optimal number of frames to be used for transmission assuming that all SUs share the same view of the channel. However, as the level of sensing heterogeneity increases, the SUs experience different views of the channel in the same time instant, and the number of frames reserved for transmission during the second stage of contention is sub-optimal. Nonetheless, the reservation-based protocol is able to reduce some of the impact of the heterogeneity, since the number of reserved frames used for transmission depends on the number of busy mini-slots during the second stage of contention, showing the dynamic behavior of this scheme.

VI. FINAL REMARKS

In this paper we evaluated the impact of assuming heterogeneous channel sensing decisions in the performance of distributed SP CR MAC protocols. Three scenarios with different levels of dissimilarity in the spectrum sensing decisions were defined, and the performance of two random access (RA) and one reservation-based (RB) CR MAC schemes were evaluated. The results showed that when a homogeneous channel sensing scenario is considered, the RB protocol achieves higher throughput when compared to the RA schemes, which is mainly due to its design. However, under heterogeneous channel sensing decisions, the number of frames reserved for transmission during the second stage of contention of the RB protocol is sub-optimal, which considerably decreases its throughput. Regarding the RA protocols, the underperformance introduced by the sensing heterogeneity is more moderate than the one observed for the RB protocol.

REFERENCES

- [1] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [2] M. Timmers, S. Pollin, A. Dejonghe, L. Van Der Perre, and F. Catthoor, "A Distributed Multichannel MAC Protocol for Multihop Cognitive Radio Networks," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 1, pp. 446–459, 2010.
- [3] C. Cordeiro and K. Challapali, "C-MAC: A Cognitive MAC Protocol for Multi-Channel Wireless Networks," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, pp. 147–157, 2007.
- [4] W. S. Jeon, J. A. Han, and D. G. Jeong, "A Novel MAC Scheme for Multichannel Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 6, pp. 922–934, 2012.
- [5] A. De Domenico, E. Strinati, and M. Di Benedetto, "A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 14, no. 1, pp. 21–44, 2012.
- [6] "IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands," *IEEE Std 802.22-2011*, pp. 1–680, 2011.
- [7] K. Chowdhury and I. Akyildiz, "Cognitive Wireless Mesh Networks with Dynamic Spectrum Access," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 26, no. 1, pp. 168–181, 2008.
- [8] Q. Chen, M. Motani, W.-C. Wong, and Y.-C. Liang, "Opportunistic spectrum access protocol for cognitive radio networks," in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1–6, June 2011.
- [9] Q. Chen, Y.-C. Liang, M. Motani, and W.-C. Wong, "Cr-csma: A random access mac protocol for cognitive radio networks," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*, pp. 486–490, Sept 2009.
- [10] Q. Chen, Y.-C. Liang, M. Motani, and W.-C. Wong, "A Two-Level MAC Protocol Strategy for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 5, pp. 2164–2180, 2011.
- [11] M. Heusse, F. Rousseau, R. Guillier, and A. Duda, "Idle sense: an optimal access method for high throughput and fairness in rate diverse wireless lans," in *In ACM SIGCOMM*, 2005.
- [12] M. Luis, R. Oliveira, R. Dinis, and L. Bernardo, "Optimization of a Decentralized Medium Access Control Scheme for Single Radio Cognitive Networks," in *13th International Conference, NEW2AN 2013*, pp. 260–271, 2013.
- [13] M. Luis, A. Furtado, R. Oliveira, R. Dinis, and L. Bernardo, "Towards a Realistic Primary Users' Behavior in Single Transceiver Cognitive Networks," *Communications Letters, IEEE*, vol. 17, no. 2, pp. 309–312, 2013.

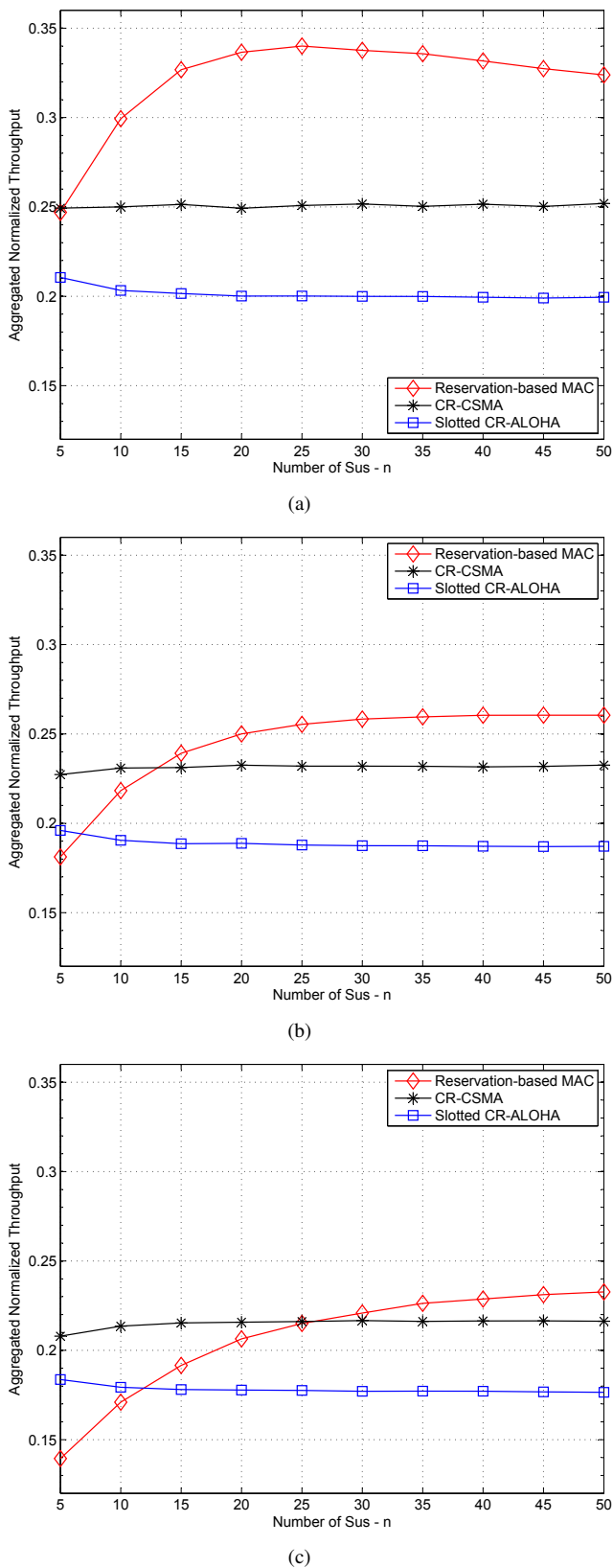


Fig. 5. Throughput comparison among slotted CR-ALOHA, CR-CSMA and Reservation-based MAC considering heterogeneous channel sensing scenarios: (a) Low dissimilarity; (b) Medium dissimilarity; (c) High dissimilarity.

- [14] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 11, pp. 116–130, First Quarter 2009.
- [15] H. Urkowitz, "Energy Detection of Unknown Deterministic Signals," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, pp. 523–531, April 1967.
- [16] F. Digham, M.-S. Alouini, and M. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," in *Proc. IEEE ICC 2003*, pp. 3575–3579, May 2003.
- [17] A. Leon-Garcia, *Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering (3rd Edition)*. Pearson/Prentice Hall, 2008.

