



**António Eduardo Carreiro Furtado**

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores

## **Análise de Desempenho 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.

Orientadores : Rodolfo Oliveira, Professor Auxiliar, FCT-UNL  
Rui Dinis, Professor Associado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Paulo Montezuma

Arguentes: Prof. Doutor João Silva

Vogais: Prof. Doutor Rodolfo Oliveira

Prof. Doutor Rui Dinis



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2012



## **Análise de Desempenho de Acesso ao Meio em Redes de Rádio Cognitivo**

Copyright © António Eduardo Carreiro Furtado, 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.



# Agradecimentos

Gostaria de apresentar os meus agradecimentos a todas as pessoas que de certo modo me ajudaram na realização desta dissertação.

Agradeço ao Professor Rodolfo Oliveira pela excelente orientação prestada, assim como pela sua amizade, disponibilidade e precioso apoio em todas as fases da elaboração desta dissertação. Nos momentos mais difíceis vividos ao longo da dissertação, incentivou-me e encaminhou-me, por vezes em horários apertados e momentos de muito trabalho. Agradeço ainda pelo forte apoio demonstrado na elaboração dos artigos publicados, assim como pela rigorosa e cuidada revisão de escrita desta dissertação.

Agradeço ao Professor co-orientador Rui Dinis e ao Professor Luís Bernardo pelo ensino, incentivo e facilidades disponibilizadas ao longo desta dissertação.

Pelo apoio financeiro, agradeço à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), pela Bolsa de Iniciação Científica (BIC) atribuída no âmbito do Projecto PTDC/EEA-TEL/115981/2009, designado por Opportunistic-CR (Opportunistic Aggregation of Spectrum and Cognitive Radios: Consequences on Public Policies).

Gostaria ainda de dar uma palavra de apreço ao meu colega de Departamento Miguel Luís, que paralelamente ao seu trabalho de Doutoramento, sempre demonstrou predisposição e apoio nos conselhos dados.

Agradeço aos meus colegas de laboratório pelo apoio prestado, incentivo e discussões pertinentes.

Agradeço a todos os colegas que frequentaram comigo o curso na FCT-UNL, pelo espírito de entajuda e cooperação nas mais diversas situações e pelo convívio proporcionado. Entre eles gostava de destacar o Pedro Leitão, Nuno Pereira, Filipe Martins, João Silva, Pedro Cunha, Hugo Serra, José Vieira e Fernando Rosado.

Um agradecimento muito especial e sentido aos meus amigos João Rato e Hugo Frazão, que ao longo do meu percurso académico sempre me apoiaram e proporcionaram momentos de convívio e experiências partilhadas.

Por fim, mas de forma alguma com menor importância, um agradecimento muito especial à minha família, nomeadamente aos meus pais, irmãos e amigos, por todo o carinho, motivação e apoio dado ao longo da minha vida. Agradeço ainda pela compreensão por todos os momentos que passei privado da sua companhia.

Obrigado.

# Sumário

A evolução observada nas redes de comunicações sem fios tem conduzido a uma utilização massiva de partes do espectro radioelétrico. No entanto, as políticas desactualizadas de gestão de espectro apresentam baixa eficiência, e uma grande parte do espectro licenciado é hoje em dia severamente subutilizada. Desta forma, as entidades reguladoras procuram presentemente novas políticas de alocação de espectro, permitindo que utilizadores não licenciados possam utilizar partes do espectro já atribuído a utilizadores licenciados. Este tipo de comportamento é designado de redes de rádio cognitivo, permitindo que os utilizadores não licenciados tenham acesso oportunístico ao espectro.

Esta dissertação aborda a análise de desempenho de algumas redes de rádios cognitivos centralizadas e descentralizadas. No caso das redes cognitivas centralizadas, admite-se que os utilizadores não licenciados utilizam *sensing* baseado em detectores de energia, sendo deduzidas e validadas as expressões teóricas das probabilidades de detecção e de falso alarme para dois cenários diferentes. No primeiro, é considerada a alteração de actividade dos utilizadores licenciados durante a fase de *sensing*. No segundo, os utilizadores licenciados podem transmitir em simultâneo, considerando-se que se encontram em diferentes posições. Ainda nas redes cognitivas centralizadas é realizado um estudo comparativo de diferentes critérios de parametrização do limiar de decisão do detector de energia. No caso das redes cognitivas descentralizadas, é proposto um protocolo MAC baseado em contenção. A contenção dos utilizadores não licenciados é parametrizada em função da probabilidade de acesso dos utilizadores licenciados. O protocolo permite que a probabilidade de acesso dos utilizadores licenciados seja estimada a partir de estatísticas individuais disponíveis nos utilizadores não licenciados, bem como em estatísticas recolhidas no canal.

**Palavras Chave:** Sistemas de Rádio Cognitivo, Detecção baseada em Energia, Controlo de Acesso ao Meio.



# Abstract

The recent advances in wireless communications networks have led to a massive use of parts of the radio spectrum. However, the outdated spectrum management policies adopted by the regulator bodies also show that a large part of the licensed spectrum is now severely underused. Nowadays the regulators are introducing new spectrum allocation policies where the unlicensed users can utilize parts of the spectrum already licensed to specific applications. These policies will be the basis of future cognitive radio networks, where the unlicensed users access the spectrum in an opportunistic way.

This work addresses the performance analysis of two types of cognitive radio networks (CRN): centralized and decentralized. For centralized networks it is assumed that unlicensed users adopt energy-based sensing and we derived and validate the theoretical expressions for the probabilities of detection and false alarm for two different scenarios. In the first one it is considered that licensed users can change its activity state during the sensing. In the second scenario, one or more licensed users may transmit simultaneously, and we admit that they can be located at different positions. We also present a comparative study for the decision threshold of the energy detector, by properly characterizing the performance achieved by the majority of the parameterization methods proposed in the literature. This work also proposes a contention-based MAC protocol for decentralized CRNs. The contention period performed by the unlicensed users is parameterized according to the channel access probability of licensed users. The probability is estimated by using information about the individual statistics available in the unlicensed users as well as the statistics collected in the channel. Finally, we characterize the performance of the protocol for different levels of primary users' channel utilization.

**Keywords:** Cognitive Radio Systems, Energy-based Sensing, Medium Access Control.



# Acrónimos

**ACK** *Acknowledgement*

**ADC** *Analog-to-Digital Converter*

**AP** *Ponto de Acesso*

**AWGN** *Additive White Gaussian Noise*

**CPE** *Consumer Premise Equipment*

**CSD** *Cyclic Spectral Density*

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

**DAB** *Direct Access Based*

**DFH** *Dynamic Frequency Hopping*

**DIFS** *Distributed Interframe Space*

**DSA** *Dynamic Spectrum Allocation*

**DSP** *Digital Signal Processor*

**DSSS** *Direct-Sequence spread-spectrum*

**FHSS** *Frequency-hopping spread-spectrum*

**FPGA** *Field Programmable Gate Array*

**MAC** *Medium Access Control*

**ROC** *Receiver Operating Characteristic*

**RVs** *Variáveis Aleatórias*

**SDR** *Software- Defined Radio*

**SIFS** *Short Interframe Space*

**SNR** *Signal-to-Noise Ratio*

**TDMA** *Time Division Multiple Access*

# Conteúdo

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Agradecimentos                                                              | iii       |
| Sumário                                                                     | v         |
| Abstract                                                                    | vii       |
| Acrónimos                                                                   | ix        |
| <b>1 Introdução</b>                                                         | <b>1</b>  |
| 1.1 Introdução . . . . .                                                    | 1         |
| 1.2 Motivação . . . . .                                                     | 3         |
| 1.3 Objectivos e Contribuições . . . . .                                    | 4         |
| 1.4 Estrutura da Dissertação . . . . .                                      | 5         |
| <b>2 Trabalho Relacionado</b>                                               | <b>7</b>  |
| 2.1 Introdução . . . . .                                                    | 7         |
| 2.2 Dimensões de <i>Sensing</i> . . . . .                                   | 9         |
| 2.2.1 Pontos a ter em conta nas técnicas de <i>sensing</i> . . . . .        | 13        |
| 2.2.2 Técnicas de <i>sensing</i> no espectro para rádio cognitivo . . . . . | 15        |
| 2.3 <i>Sensing</i> cooperativo . . . . .                                    | 21        |
| 2.4 MAC para Redes Cognitivas . . . . .                                     | 23        |
| <b>3 <i>Sensing</i> baseado em Energia</b>                                  | <b>27</b> |
| 3.1 Introdução . . . . .                                                    | 27        |
| 3.2 Comportamento dos nós primários não constante . . . . .                 | 30        |
| 3.3 Acesso Simultâneo de Utilizadores Primários . . . . .                   | 34        |
| 3.4 Validação . . . . .                                                     | 37        |
| <b>4 Sistemas Cognitivos <i>Single-radio</i></b>                            | <b>45</b> |
| 4.1 Descrição da Rede de Rádio Cognitivo . . . . .                          | 45        |
| 4.1.1 Débito . . . . .                                                      | 48        |
| 4.2 Parametrização dos critérios de <i>Sensing</i> . . . . .                | 53        |
| 4.2.1 Critérios de parametrização . . . . .                                 | 53        |

|          |                                                   |            |
|----------|---------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2    | Análise dos critérios de parametrização . . . . . | 56         |
| 4.3      | Avaliação do desempenho dos critérios . . . . .   | 58         |
| 4.3.1    | Simulações . . . . .                              | 58         |
| 4.3.2    | Resultados da simulação . . . . .                 | 58         |
| 4.4      | Conclusões . . . . .                              | 63         |
| <b>5</b> | <b>Protocolo MAC Distribuído</b>                  | <b>65</b>  |
| 5.1      | Introdução . . . . .                              | 65         |
| 5.2      | Descrição do Sistema . . . . .                    | 66         |
| 5.3      | Validação . . . . .                               | 70         |
| 5.4      | Parametrização da Contenção . . . . .             | 73         |
| 5.5      | Conclusões . . . . .                              | 79         |
| <b>6</b> | <b>Conclusões</b>                                 | <b>81</b>  |
| 6.1      | Considerações Finais . . . . .                    | 81         |
| 6.2      | Trabalho Futuro . . . . .                         | 83         |
|          | <b>Bibliografia</b>                               | <b>84</b>  |
| <b>A</b> | <b>Código de Simulação do ns-2</b>                | <b>91</b>  |
| <b>B</b> | <b><i>Script</i> de Simulação do ns-2</b>         | <b>97</b>  |
| <b>C</b> | <b>Publicações</b>                                | <b>101</b> |

# Lista de Figuras

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Estrutura de Rádio Tradicional, Rádio baseado em Software e Rádio Cognitivo (adaptado de [Ora09]). . . . .                                                                                                                                                                                  | 2  |
| 2.1  | Oportunidades no domínio da frequência e tempo. . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 10 |
| 2.2  | Oportunidades no domínio local geográfico. . . . .                                                                                                                                                                                                                                          | 10 |
| 2.3  | Problema do emissor primário escondido. . . . .                                                                                                                                                                                                                                             | 11 |
| 2.4  | Oportunidades no domínio de códigos. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                | 12 |
| 2.5  | Oportunidades no domínio do ângulo/direcção. . . . .                                                                                                                                                                                                                                        | 12 |
| 2.6  | Comparação das diferentes técnicas a nível de precisão de <i>sensing</i> e complexidade [YA09]. . . . .                                                                                                                                                                                     | 21 |
| 3.1  | Esquema de blocos do detector de energia. . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 28 |
| 3.2  | Mudança da actividade do nó primário:(a) $\mathcal{H}_{10}$ ;(b) $\mathcal{H}_{01}$ . . . . .                                                                                                                                                                                               | 31 |
| 3.3  | Cenários possíveis em que os nós primários comuniquem em simultâneo. . .                                                                                                                                                                                                                    | 34 |
| 3.4  | Probabilidade de Detecção para o cenário $\mathcal{H}_1$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                          | 39 |
| 3.5  | Probabilidade de Falso Alarme para o cenário $\mathcal{H}_0$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                      | 40 |
| 3.6  | Probabilidade de Detecção. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                          | 41 |
| 3.7  | Probabilidade de Falso Alarme. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                      | 41 |
| 3.8  | Probabilidade de Detecção. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                          | 42 |
| 3.9  | Probabilidades de Falso Alarme. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                     | 43 |
| 3.10 | Probabilidade de acesso ao meio, $P_{MA}$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                         | 44 |
| 4.1  | Rede sem fios com nós secundários e primários. . . . .                                                                                                                                                                                                                                      | 46 |
| 4.2  | Estrutura da Trama adoptada pelos utilizadores secundários. . . . .                                                                                                                                                                                                                         | 47 |
| 4.3  | Validação dos débitos para $\tau_{PU} = 0.3$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                      | 51 |
| 4.4  | Validação dos débitos para $\tau_{PU} = 0.5$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                      | 52 |
| 4.5  | Validação dos débitos para $\tau_{PU} = 0.7$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                      | 52 |
| 4.6  | $P_D$ , $P_{FA}$ e critérios de parametrização $C_2$ , $C_3$ , $C_4$ , $C_5$ para diferentes limiares de decisão $\gamma$ ( $SNR = -5\text{dB}$ , $\tau_{PU} = 0.5$ and $N_S = 20$ ). "C <sub>1</sub> " indica o limiar de decisão resultante do critério $C_1$ para $P_I = 0.04$ . . . . . | 56 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7  | $P_D$ , $P_{FA}$ e critérios de parametrização $C_2$ , $C_3$ , $C_4$ , $C_5$ para diferentes limiares de decisão $\gamma$ ( $SNR = 5\text{dB}$ , $\tau_{PU} = 0.5$ and $N_S = 20$ ). "C <sub>1</sub> " indica o limiar de decisão resultante do critério $C_1$ para $P_I = 0.04$ . . . . . | 57 |
| 4.8  | Interferência provocada aos utilizadores primários ( $SNR = 5\text{dB}$ e $\tau_{PU} = 0.3$ ). . . . .                                                                                                                                                                                     | 59 |
| 4.9  | Interferência provocada aos utilizadores primários ( $SNR = 5\text{dB}$ e $\tau_{PU} = 0.5$ ). . . . .                                                                                                                                                                                     | 60 |
| 4.10 | Interferência provocada aos utilizadores primários ( $SNR = 5\text{dB}$ e $\tau_{PU} = 0.7$ ). . . . .                                                                                                                                                                                     | 60 |
| 4.11 | Débito dos utilizadores secundários ( $SNR = 5\text{dB}$ e $\tau_{PU} = 0.3$ ). . . . .                                                                                                                                                                                                    | 61 |
| 4.12 | Débito dos utilizadores secundários ( $SNR = 5\text{dB}$ e $\tau_{PU} = 0.5$ ). . . . .                                                                                                                                                                                                    | 62 |
| 4.13 | Débito dos utilizadores secundários ( $SNR = 5\text{dB}$ e $\tau_{PU} = 0.7$ ). . . . .                                                                                                                                                                                                    | 63 |
| 5.1  | Validação da probabilidade $P_{Idle_{SU}}$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                       | 71 |
| 5.2  | Estimação da probabilidade de acesso dos primários ( $\tau_{PU}$ ). . . . .                                                                                                                                                                                                                | 73 |
| 5.3  | Débito alcançado pelos utilizadores secundários em função de $C_W$ e $\tau_{PU}$ . . . . .                                                                                                                                                                                                 | 76 |
| 5.4  | Débito alcançado pelos utilizadores primários em função de $C_W$ e $\tau_{PU}$ . . . . .                                                                                                                                                                                                   | 77 |
| 5.5  | Janela de contenção em função de diferentes probabilidade de acesso dos utilizadores primários. . . . .                                                                                                                                                                                    | 77 |
| 5.6  | Débito $S_{SU}$ em função de diferentes probabilidade de acesso dos utilizadores primários. . . . .                                                                                                                                                                                        | 78 |
| 5.7  | Débito $S_{PU}$ em função de diferentes probabilidade de acesso dos utilizadores primários. . . . .                                                                                                                                                                                        | 78 |

# Lista de Tabelas

|     |                                                                             |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Localização e probabilidade de acesso ao canal de cada nó primário. . . . . | 42 |
| 4.1 | Parametrização da rede cognitiva. . . . .                                   | 50 |
| 4.2 | Parametrização da rede cognitiva. . . . .                                   | 58 |
| 5.1 | Parametrização da rede cognitiva sem utilizadores primários. . . . .        | 70 |
| 5.2 | Parametrização da rede cognitiva sem utilizadores primários. . . . .        | 72 |
| 5.3 | Parâmetros considerados na geração de resultados. . . . .                   | 75 |



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Introdução

Nas últimas décadas a utilização do espectro radioeléctrico assumiu uma importância preponderante na sociedade, sendo este o suporte das comunicações sem fios. Ao longo do tempo a importância do espectro radioeléctrico foi sendo cada vez mais valorizada à medida que as bandas de frequência associadas a aplicações específicas foram preenchendo o espectro utilizável. Actualmente existe cada vez mais a preocupação de disponibilizar os serviços de comunicação em qualquer lugar, em paralelo com a necessidade de oferecer mobilidade aos equipamentos sem fios. Outro aspecto fundamental dos sistemas de comunicação sem fios, relativamente às necessidades no curto/médio prazo, reside na crescente procura de maiores débitos de transmissão, colocando ainda mais pressão na quantidade de espectro disponível.

Actualmente o espectro disponível é muito escasso, sendo desta forma difícil o estabelecimento de novos sistemas e serviços de comunicação sem fios. No entanto, diversos estudos têm mostrado que, apesar do espectro já se encontrar muito próximo da segmentação total, a sua utilização não está ocorrendo de modo eficiente por parte dos utilizadores primários, onde se verifica que determinadas faixas do espectro não são utilizadas durante determinados instantes de tempo e em certas áreas geográficas [Com03].

Nas redes de Rádio Cognitivo pretende-se que novas aplicações de comunicação sem fios sejam suportadas num intervalo espectral segmentado e minimizando o nível de interferência causada aos utilizadores licenciados. Esta tecnologia busca dar oportunidades de

acesso aos utilizadores não licenciados/secundários nas faixas licenciadas do espectro, sem que esses acessos interferiram na comunicação dos utilizadores primários.

Uma das mais promissoras funcionalidades do rádio cognitivo é o acesso dinâmico ao espectro, em que um rádio cognitivo, com base nas informações recolhidas sobre a utilização do espectro por parte dos utilizadores primários, consegue descobrir faixas de espectro livre. Para atingir este objectivo sem causar interferências prejudiciais aos utilizadores primários, a operação de detectar o estado (livre, ocupado) do espectro desempenha um papel crucial. A partir desta operação, aqui denominada de *sensing*, o rádio cognitivo consegue obter uma visão do espectro que está a ser usado, e com base nessa visão consegue utilizar o espectro livre para proveito próprio.

A fim de se adaptar ao meio envolvente, o rádio cognitivo deve ser capaz de transmitir e receber em diferentes bandas de frequência, utilizando diferentes esquemas de modulação, codificação, etc. Isto requer do rádio cognitivo muita flexibilidade, que pode ser conseguida usando o conceito *Software - Defined Radio*(SDR). O conceito SDR consiste em aproximar o software o mais perto possível da antena. Isto é conseguido a partir da implementação através de software em dispositivos programáveis (DSPs, FPGAs) dos blocos que constituem o sistema rádio (amplificadores, misturadores, filtros, moduladores, etc.) que tradicionalmente são implementados em hardware.

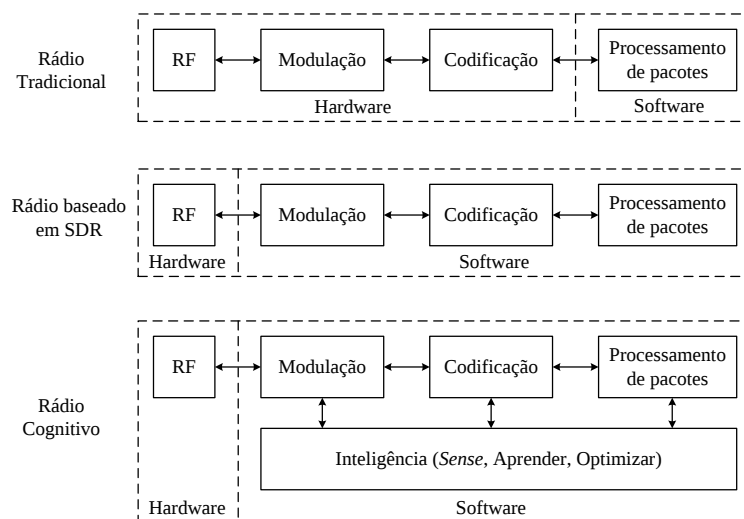


Figura 1.1: Estrutura de Rádio Tradicional, Rádio baseado em Software e Rádio Cognitivo (adaptado de [Ora09]).

Na Figura 1.1 é possível ter uma visão comparativa do desenho do rádio convencional, baseado no conceito SDR e o cognitivo.

## 1.2 Motivação

De modo a que os rádios cognitivos sejam capazes de utilizar o espectro licenciado sem que provoquem interferência aos utilizadores primários, devem ser capazes de detectar o sinal transmitido pelos utilizadores primários, isto mesmo em cenários de baixo rácio entre o sinal do primário e o ruído existente no meio. Para isso várias técnicas de *sensing* são propostas na literatura onde geralmente cada técnica é caracterizada pelas probabilidades de detecção e de falso alarme. Uma das principais técnicas de *sensing* propostas no desenho dos rádios cognitivos é a técnica de *sensing* baseada no detector de energia [YA09]. Esta técnica é vantajosa pela sua simplicidade e pelo facto de ser a única técnica de *sensing* que não necessita de informação acerca do sistema de comunicação utilizado pela rede licenciada. De forma geral, a técnica de *sensing* baseada no detector de energia detecta a actividade em determinada banda do espectro a partir da comparação entre a energia observada nessa banda durante um determinado período e, o limiar de energia definido pelo rádio cognitivo. Um dos objectivos desta dissertação passa pela implementação de um detector de energia, de modo a que este permita verificar a validação teórica das expressões da probabilidade de detecção e de falso alarme para diferentes cenários.

O desempenho da técnica de *sensing* baseada no detector de energia está dependente do limiar de energia definido. Na literatura existem vários critérios propostos para parametrizar o limiar de energia. Este facto motiva o estudo comparativo dos impactos dos diferentes critérios de parametrização ao nível do desempenho de uma rede cognitiva, realizado nesta dissertação.

Nos últimos anos assistiu-se à adopção massiva da norma IEEE 802.11, nomeadamente em redes sem fios locais. Como prova desse sucesso pode-se referir o crescente número de locais onde esta tecnologia se encontra disponível e o facto de a maioria dos dispositivos móveis (computadores portáteis, *tablet* e telemóveis) já saírem de fábrica equipados com interfaces IEEE 802.11. A norma motiva um sistema cognitivo baseado em contenção, tendo como mote uma fácil implementação através de pequenas alterações nos drivers das

cartas que actualmente implementam a norma. Com tal, este facto motiva todo o trabalho apresentado no Capítulo 5, no qual é proposto um protocolo de acesso ao meio cognitivo baseado em contenção.

### 1.3 Objectivos e Contribuições

Esta dissertação tem como objectivo analisar o desempenho dos mecanismos de acesso ao meio tradicionalmente adoptados em redes de rádio cognitivo centralizadas e descentralizadas. Numa primeira fase, pretende-se analisar a técnica de *sensing* baseada no detector de energia. Desta forma, foram validadas as deduções teóricas das probabilidades de detecção falso alarme em dois cenários diferentes (Capítulo 3). Considerando-se que no primeiro cenário o comportamento dos utilizadores primários não se mantém constante durante o período de *sensing*, podem ocorrer alterações no estado (livre, ocupado) do canal observado pelos utilizadores secundários. Num segundo cenário é considerado que os múltiplos utilizadores primários podem transmitir em simultâneo.

Após a validação das expressões teóricas das probabilidades que descrevem o desempenho do *sensing* baseado em energia, pretende-se comparar vários critérios de parametrização do detector de energia. A comparação entre critérios será obtida através da caracterização do desempenho de uma rede cognitiva centralizada, na qual os utilizadores não licenciados realizam o processo de *sensing* a partir de um detector de energia. Como tal, primeiramente realiza-se a validação das expressões teóricas dos débitos alcançados pelos utilizadores secundários e primários. Após essa validação pretende-se recorrer aos valores de débito alcançado pelos utilizadores secundários e primários para caracterizar o desempenho da rede cognitiva, e por sua vez a partir dessa caracterização pretende-se comparar os diferentes critérios de parametrização do limiar de energia do detector (Capítulo 4).

Por fim, considerando uma rede cognitiva descentralizada, onde é adoptado um protocolo MAC baseado em contenção, pretende-se validar um método de estimação da probabilidade de acesso dos utilizadores primários. Após a validação do método de estimação da probabilidade, pretende-se ainda estudar o desempenho da rede cognitiva em função da parametrização da contenção dos utilizadores secundários (Capítulo 5).

O trabalho realizado a nível da validação das expressões teóricas das probabilidades de detecção e de falso alarme e, dos débitos alcançados pelos utilizadores secundários e primários da rede centralizada, contribuiu para uma publicação na conferência internacional ISWCS (*International Symposium on Wireless Communication Systems*).

A validação das expressões teóricas das probabilidade de detecção e de falso alarme também contribuíram para outro artigo em fase de revisão para a revista internacional *IEEE Communications Letters*. Os artigos referidos encontram-se incluídos no Apêndice C.

Outro contributo desta dissertação consiste na definição de um protocolo de nível MAC distribuído com uma abordagem inovadora nos aspectos relativos à parametrização da contenção dos utilizadores secundários em função do método de estimação da probabilidade de acesso dos utilizadores primários, o qual é apresentado no Capítulo 5.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos e três apêndices. No Capítulo 2 ("Trabalho Relacionado") é realizado um levantamento geral sobre o estado da arte na área de redes de rádio cognitivo. É apresentado o conceito de rádio cognitivo, assim como as principais técnicas de *sensing* e as principais exigências para o desenvolvimento de protocolos MAC para redes de rádio cognitivo.

No Capítulo 3 ("*Sensing* baseado em Energia") é estudada a técnica de *sensing* baseada no detector de energia. Na parte inicial do capítulo são apresentadas as deduções das probabilidades de detecção e de falso alarme. Posteriormente é estudado um cenário onde os utilizadores primários efectuem transições ao longo do período de *sensing*. Por fim, é analisado o detector de energia num cenário onde os múltiplos nós primários comunicam em simultâneo.

No Capítulo 4 ("Sistemas Cognitivos *Single-radio*") é apresentada numa primeira parte uma rede cognitiva constituída por rádios cognitivos que realizam o processo de *sensing* por meio de um detector de energia. Na segunda parte, são apresentados diferentes critérios de parametrização do limiar de decisão do detector de energia. Na parte final do capítulo, são caracterizados os diferentes critérios de parametrização do limiar a partir do

desempenho que a rede cognitiva apresenta.

O Capítulo 5 ("Protocolo MAC Distribuído") apresenta um protocolo MAC baseado em contenção. É descrito e validado o método de estimação utilizado pelos utilizadores secundários para estimar a probabilidade de acesso dos utilizadores primários. Na parte final do capítulo é apresentado um modelo no qual se analisam os efeitos que as diferentes parametrizações das contenções da rede secundária apresentam sobre os débitos alcançados pelos utilizadores primários e secundários.

No Capítulo 6 ("Conclusões") é realizada uma análise global do trabalho realizado, sendo também apresentadas as principais contribuições deste trabalho, assim como as questões em aberto e consequente trabalho futuro.

No Apêndice A ("Código de Simulação do ns-2") e no Apêndice B ("*Script* de Simulação do ns-2") é apresentado o código e o *script* de simulação (do simulador de redes ns-2 [Inf07]), respectivamente, utilizados para avaliar o desempenho do protocolo proposto no Capítulo 5.

Por fim no Apêndice C ("Publicações") são apresentadas as publicações elaboradas ao longo desta dissertação.

## Capítulo 2

# Trabalho Relacionado

### 2.1 Introdução

Durante as últimas duas décadas os sistemas de telecomunicações sem fios tem vindo a desempenhar funções cada vez mais importantes nas tarefas do dia-a-dia. O rápido crescimento dos serviços de acesso baseado em redes sem fios, aliado às políticas desactualizadas de acesso ao espectro, está a acelerar a necessidade de mais espectro radioeléctrico, que cumpra com os requisitos de procura exigida pelos utilizadores. Actualmente a disponibilidade do espectro de rádio está cada vez mais reduzida, nomeadamente devido à evolução e criação de aplicações e dispositivos que utilizam o espectro de forma mais intensiva. No entanto, este crescimento não está acompanhado do aumento da eficiência da utilização do espectro. Deste modo, as redes de rádio cognitivo vêm mudar o modo como se utiliza o espectro, de forma a aumentarem a eficiência da sua utilização.

O princípio básico das redes cognitivas reside na reutilização do espectro que não é usado pelas outras tecnologias, ou seja, a rede cognitiva procura espaços no espectro de modo a dar aos seus utilizadores a oportunidade de acederem ao meio sem fios. Para tal, é necessário que a rede cognitiva tenha dispositivos capazes de sentir o meio, de modo a detectar ou não a ocupação do espectro e dando aos utilizadores cognitivos uma imagem da utilização deste.

Numa rede de rádios cognitivos, denomina-se rádio cognitivo como sendo os dispositivos que caracterizam o espectro, os quais são responsáveis por definir o estado de ocupação do espectro através de operações de observação aqui denominadas de *sensing*. No meio sem

fios, os utilizadores da rede de rádio cognitivo são denominados utilizadores secundários (ou não licenciados), porque têm uma prioridade menor de acesso ao espectro do que os utilizadores das outras tecnologias, sendo estes últimos os utilizadores primários (ou licenciados). É importante referir que a rede cognitiva apenas pode utilizar o espectro não ocupado pelos utilizadores primários, não podendo os utilizadores secundários interferir com os utilizadores primários.

Este capítulo divide-se em duas partes distintas. Uma primeira parte sobre o mecanismo de *sensing* a nível físico e, uma segunda parte sobre mecanismos de acesso ao meio em redes de rádio cognitivo.

## 2.2 Dimensões de *Sensing*

A detecção do estado de ocupação do espectro é um dos pontos mais importantes nas redes de rádio cognitivo, pois é a partir deste processo que se torna possível ter uma visão do espectro que está a ser usado. Dessa forma, os utilizadores cognitivos poderão utilizar partes do espectro que não esteja a ser utilizado pelos utilizadores primários. Esta oportunidade é determinada pelas várias formas de medição e exploração de espaços livres no espectro.

A oportunidade no espectro é definida de forma convencional pela existência de uma banda de frequências nas quais não existe nenhum utilizador primário nessa banda de frequências, num determinado instante temporal e numa determinada área geográfica. Esta definição de oportunidade de espectro apenas tem em consideração três dimensões: a frequência, o tempo e o espaço. No entanto, existem outras dimensões, tais como códigos ortogonais ou ângulo/direcção de emissão, nas quais a oportunidade de espectro também pode ser explorada. De realçar que os algoritmos convencionais de detecção de espectro não possuem técnicas de *sensing* capazes de detectar utilizadores primários que comuniquem por meio da utilização de espalhamento espectral, saltos na frequência ou utilizadores primários que comuniquem utilizando antenas direccionais. Assim, torna-se necessário analisar estas novas dimensões, de modo a poder-se criar algoritmos de detecção de espectro capazes de encontrar espaços livres, ou seja, sem existir nenhum utilizador primário a utilizar esses espaços. Desta forma, encontram-se assim oportunidades para os utilizadores secundários utilizarem o espectro sem interferir com os utilizadores primários. Verifica-se que é possível dividir o acesso ao meio em múltiplas dimensões, as quais serão analisadas de diferentes formas de modo a encontrar partes do espectro não utilizado por utilizadores primários. De seguida, são abordados alguns algoritmos de *sensing* que exploram as diferentes dimensões para descobrir partes do espectro desocupadas.

No caso das oportunidades serem encontradas no domínio da frequência, o espectro disponível é dividido em canais com frequências dedicadas, sendo utilizadas pelo par emissor/receptor, tal como representado no exemplo da Figura 2.1. Existem oportunidades no espectro caso todos os canais não estejam a ser utilizados em simultâneo. Deste modo, num determinado intervalo de tempo, alguns canais poderão estar disponíveis para utili-

zadores secundários. Para tal o algoritmo de detecção terá que percorrer os vários canais definidos no espectro a monitorizar, verificando se o canal está ou não a ser usado.

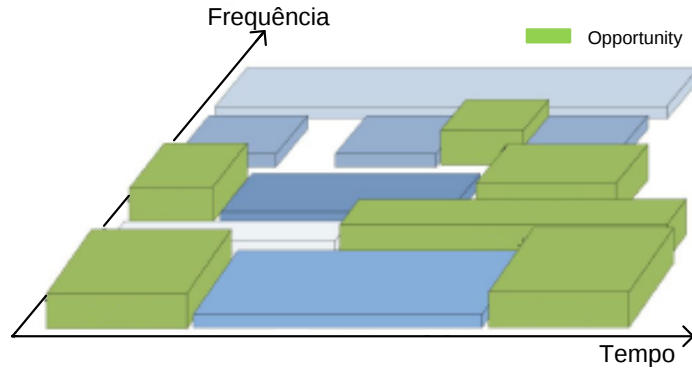


Figura 2.1: Oportunidades no domínio da frequência e tempo.

No caso das oportunidades serem observadas no domínio do tempo, o processo está directamente relacionado com a detecção de oportunidades numa determinada parte do espectro, podendo, por exemplo, ser essa parte de espectro um canal. Considerando-se o canal como disponível, isto é, se num determinado instante este se encontra livre, a banda de frequência do canal não é utilizada de uma forma contínua, havendo intervalos de tempo em que o canal está desocupado.

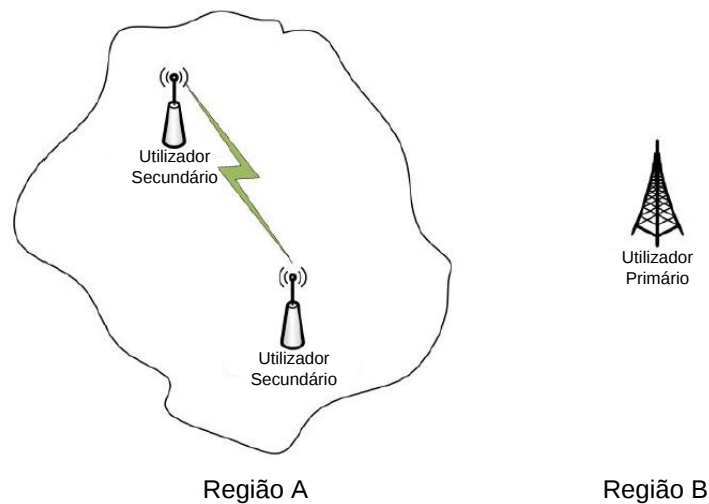


Figura 2.2: Oportunidades no domínio local geográfico.

Quanto à dimensão espacial, representada na Figura 2.2, o espectro pode estar ocupado num local geográfico específico num determinado intervalo de tempo e numa deter-

minada banda de frequências, e desocupado noutra local geográfico no mesmo intervalo de tempo e na mesma banda de frequências. Logo, e em princípio, se um utilizador secundário detectar que não existe sinal interferente numa dada banda de frequências, significa que não existem utilizadores primários na mesma região espacial do utilizador secundário, podendo assim aceder ao meio.

Contudo, existe a possibilidade de haver o problema do nó escondido. Recorrendo ao cenário da Figura 2.3, caso o utilizador primário A esteja a transmitir para o receptor B, o utilizador secundário C não será capaz de detectar a interferência causada por A no meio, pois está fora do alcance rádio. Logo, o utilizador C irá concluir que existe oportunidade de aceder ao meio, causando interferência na transmissão entre os utilizadores primários A e B.

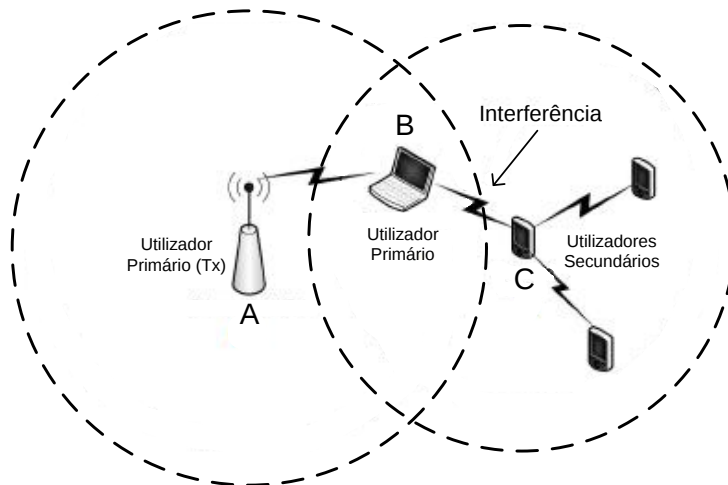


Figura 2.3: Problema do emissor primário escondido.

Em relação à dimensão de códigos, representada na Figura 2.4, esta está relacionada com o uso por parte dos utilizadores primários de sequências de *spreading codes*. Neste caso, a detecção do espectro numa determinada banda não é suficiente para que se descubram oportunidades de acesso ao meio. É necessário que os utilizadores secundários tenham mais informação, de modo a poderem sincronizar as suas transmissões com os utilizadores primários. No entanto, a sincronização poderá não ser necessária, caso se opte por atribuir códigos aleatórios. Por outro lado, com a escolha aleatória de códigos, podem ocorrer interferências entre os utilizadores primários e secundários.

No caso da utilização do espalhamento espectral, é possível haver transmissão si-

multânea por parte de utilizadores secundários e primários, desde que o códigos utilizados pelos secundários sejam ortogonais aos códigos usados pelos primários. Assim, a oportunidade no espectro não está somente dependente da detecção do espectro usado, sendo também em função dos códigos que estão a ser usados.

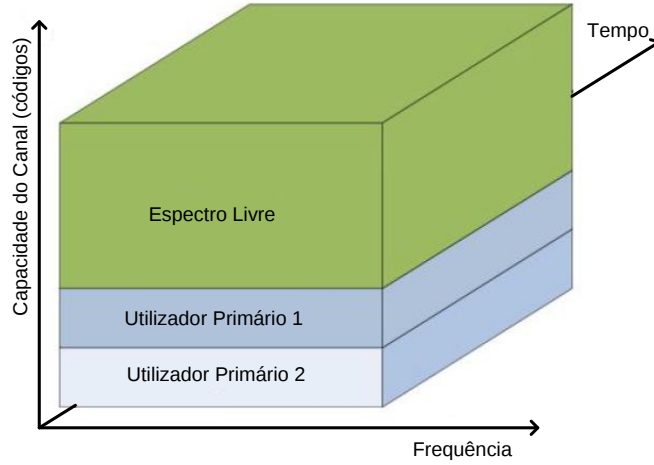


Figura 2.4: Oportunidades no domínio de códigos.

Por fim, no caso da dimensão de detecção a nível do ângulo de transmissão, tal como representado na Figura 2.5, os utilizadores primários utilizam antenas direccionais. Deste modo, os utilizadores primários transmitem numa direcção específica. Para que seja possível encontrar oportunidades no espectro, é necessário que os utilizadores secundários tenham conhecimento da localização e direcção de transmissão dos utilizadores primários, conseguindo assim não interferir com estes.

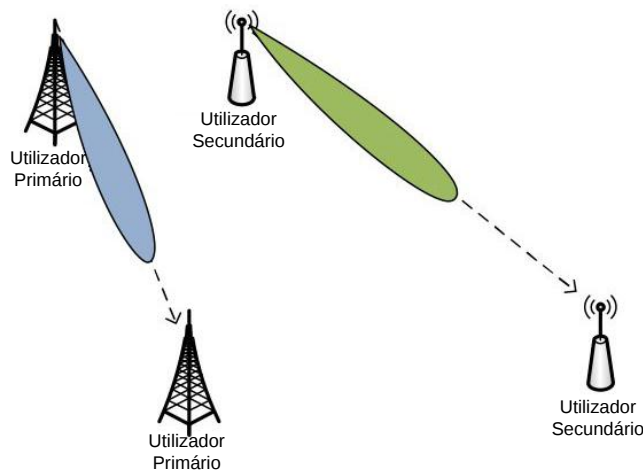


Figura 2.5: Oportunidades no domínio do ângulo/direcção.

### 2.2.1 Pontos a ter em conta nas técnicas de *sensing*

No desenvolvimento das técnicas de *sensing* para rádios cognitivos, é necessário ter em consideração vários pontos, sendo os principais os seguintes:

- **Hardware:** A nível de hardware o *sensing* em aplicações de rádio cognitivo requer alta taxa de amostragem, alta resolução de conversões *Analog-to-Digital Converter* (ADC) com largas gamas dinâmicas e processadores de sinal de alta velocidade (DSPs ou FPGAs).

O processo de *sensing* pode ser realizado segundo duas arquitecturas, sendo a primeira denominada de *Single-radio*. Nesta, o nó secundário está equipado apenas com um rádio. Logo a transmissão de dados e a monitorização espectral não podem ser realizadas em simultâneo. A segunda arquitectura é denominada *Dual-radio*. Aqui, o nó secundário possui dois rádios, sendo um responsável pela transmissão de dados e o outro pela monitorização do espectro.

A estrutura *Single-radio* é vantajosa pela sua simplicidade e baixo custo, mas comparada com a estrutura *Dual-radio*, apresenta uma baixa eficiência espectral e uma precisão de *sensing* inferior, pois o processo de *sensing* tem um tempo limitado. A *Dual-radio* tem como desvantagens o seu elevado custo, elevado consumo de potência e elevada complexidade.

- **Problema do nó escondido:** Este problema já foi referido anteriormente nesta secção e pode ser causado por muitos factores entre os quais o desvanecimento do sinal observado pelos nós secundários enquanto procuram a existência ou não de transmissões de utilizadores primários. Este problema pode ser resolvido através do *sensing* Cooperativo. O *sensing* Cooperativo é descrito na Secção 2.3.
- **Utilizadores primários que usem espalhamento espectral (*spread spectrum*):**

Existem duas técnicas de espalhamento espectral:

- *Frequency-hopping spread-spectrum* (FHSS) - Os dispositivos mudam dinamicamente a sua frequência de operação por múltiplos canais estreitos;

- *Direct-Sequence Spread-Spectrum* (DSSS) - O espalhamento espectral é feito usando *spreading codes* ortogonais, sendo atribuídos diferentes *spreading codes* aos diferentes utilizadores que pretendem transmitir.

Os utilizadores primários que utilizam espalhamento espectral são difíceis de detectar, pois a potência do sinal é distribuída por uma ampla gama de frequências, apesar da largura de banda da informação ser muito estreita[CMB04]. Este problema pode ser parcialmente evitado se o conjunto de *spreading codes* (caso da DSSS) ou o padrão de saltos de frequências (caso da FHSS) for conhecido e se existir uma perfeita sincronização com o sinal. No entanto, não é simples projectar algoritmos que possam fazer a estimativa desses dados.

- **Duração de *sensing* e com que frequência deve ser feito :** O rádio cognitivo deve ser capaz de identificar o mais rápido possível a presença dos utilizadores primários no espectro, e caso um nó licenciado aceda ao mesmo canal que o nó cognitivo está a usar, este último deve imediatamente libertar o canal. Logo, no caso de *single-radio* o método de *sensing* deve ter uma determinada duração que apresenta um compromisso entre a duração do *sensing* (menor desempenho de débito dos nós secundários) e a fiabilidade da detecção (com consequências relativamente à interferência causada aos nós primários).

Outro parâmetro importante referido em [JJL<sup>+</sup>07] é a frequência de execução do processo de *sensing*. A frequência está dependente das capacidades do rádio cognitivo, das características temporais dos primários no meio e do tipo de técnica de *sensing* usada.

É importante observar que um nó secundário tem que interromper a sua transmissão de dados para realizar a operação de *sensing* [N. 07]. Este problema pode ser minimizado com o método *Dynamic Frequency Hopping* (DFH) proposto no protocolo IEEE 802.22 [HWA<sup>+</sup>07]. Considerando que os terminais de rádio utilizam apenas um único canal para transmitir, durante a operação de transmissão, o rádio cognitivo procura em paralelo outro canal livre. Se for encontrado um canal livre, o nó secundário troca de canais e o canal livre torna-se o canal de transmissão.

- **Segurança:** Segundo [WL11], numa rede de rádio cognitivo uma das maiores preocupações a nível de segurança é a possibilidade de um utilizador não licenciado ser malicioso ao ponto apresentar um comportamento com intuito de passar-se por um utilizador licenciado. Desta forma, o utilizador malicioso impede que os outros utilizadores não licenciados acessem ao espectro licenciado. Em [CP06] é proposto um mecanismo de defesa para este problema baseado em localização, onde se propõe validar a fonte dos sinais detectados por observação das características e estimação da localização da energia do sinal recebido.

Em [MS07] é proposta a identificação dos utilizadores primários por meio de encriptação com chave pública, de modo a prevenir que utilizadores secundários se façam passar por utilizadores primários. Ao utilizador primário é requerido que transmita um valor encriptado (assinatura) com uma chave privada durante a transmissão dos seus dados. Esta assinatura é depois utilizada para validar que o utilizador é licenciado. Este método só poderá ser usado com modulações digitais e é admitido que os utilizadores secundários são capazes de sincronizar e desmodular o sinal dos utilizadores primários.

### 2.2.2 Técnicas de *sensing* no espectro para rádio cognitivo

Tal como descrito anteriormente nesta secção, o *sensing* pode ser feito em múltiplas dimensões. Apresentam-se agora várias técnicas de *sensing* para rádios cognitivos. Estas técnicas tiram partido das várias características do sinal transmitido, de modo a detectar se existe ou não informação de utilizadores licenciados a utilizar o espectro.

#### *Sensing* baseado na detecção de energia

O *sensing* baseado na detecção de energia é das técnicas de *sensing* mais comuns. Quando o *sensing* é realizado numa determinada banda do espectro, o tipo de sinal recebido resume-se a duas hipóteses:

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_0 : x(n) &= w(n), \\ \mathcal{H}_1 : x(n) &= s(n) + w(n),\end{aligned}\tag{2.1}$$

sendo  $x(n)$  o sinal recebido,  $w(n)$  o ruído aditivo branco gaussiano (Additive White Gaussian Noise - AWGN), e  $s(n)$  o sinal do primário a ser detectado. Logo, a hipótese  $\mathcal{H}_0$  corresponde ao cenário em que o utilizador primário não está a utilizar a banda, ou seja  $s(n) = 0$ . Por outro lado, a hipótese  $\mathcal{H}_1$  corresponde ao cenário em que o utilizador primário está a utilizar a banda.

A energia do sinal recebido é dada pela seguinte expressão

$$Y = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2. \quad (2.2)$$

Nesta técnica, a energia do sinal medida pelo rádio cognitivo,  $Y$ , é comparada com um limiar  $\lambda_E$ , que depende do nível de ruído no meio.

Considerando as duas hipóteses  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ , a probabilidade do mecanismo de *sensing* considerar que o utilizador primário está a usar a banda é expressa por

$$P_D = P_r(M > \lambda_E | \mathcal{H}_1), \quad (2.3)$$

$$P_{FA} = P_r(M > \lambda_E | \mathcal{H}_0), \quad (2.4)$$

em que  $P_D$  corresponde à probabilidade de detecção, ou seja, corresponde à probabilidade da energia do sinal recebido  $M$  ser maior que o limiar  $\lambda_E$ , quando o sinal recebido  $x(n)$  é a soma da energia do ruído AWGN com a do sinal enviado pelo emissor primário.  $P_{FA}$  representa a probabilidade de falso alarme, evento que sucede quando a energia do sinal recebido  $M$  é maior que o limiar  $\lambda_E$  e, quando o sinal recebido  $x(n)$  é constituído apenas pelo ruído AWGN [YA09], [WL11].

A escolha do valor de  $\lambda_E$  é realizada de modo a obter o melhor compromisso entre as probabilidades  $P_D$  e  $P_{FA}$ . Para tal, é necessário conhecer a potência do ruído e a potência do sinal enviado pelo emissor primário.

O ruído pode ser estimado, mas o valor da potência do sinal é difícil de estimar, pois depende dos efeitos (perdas de propagação, desvanecimento, etc.) a que o sinal está sujeito na transmissão, e da distância entre o ou os utilizadores primários e o rádio cognitivo. Deste modo, o parâmetro  $\lambda_E$  é escolhido de forma a cumprir uma certa probabilidade

de falso alarme, sendo nesse caso o conhecimento da variância do ruído suficiente para determinar o limiar  $\lambda_E$  [LJSK05].

O ruído branco pode ser modelado por uma variável aleatória com distribuição Gaussiana, com média nula e variância  $\sigma_w^2$  (logo  $w(n) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_w^2)$ ). Quanto ao sinal do primário, este pode ser representado por uma variável aleatória com distribuição Gaussiana, com média  $\mu_s$  e variância  $\sigma_s^2$ .

Geralmente é usada a curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) para comparar o desempenho dos diferentes limiares  $\lambda_E$ . Esta curva relaciona a probabilidade de detecção com a probabilidade de falso alarme. Com a análise da curva ROC é possível determinar o limiar  $\lambda_E$  ótimo.

É de notar que a performance desta técnica piora com a diminuição da relação sinal-ruído, ou seja, quanto menor forem os valores de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), menor será o desempenho em termos de probabilidade de detecção, pois é cada vez mais difícil de distinguir o sinal do ruído.

### ***Sensing* baseado na forma de onda**

O *sensing* baseado na forma de onda é apenas aplicável em sistemas onde é possível conhecer os diferentes padrões de sinal. Normalmente, estes padrões (preâmbulos, midambles, padrões de regulação de transmissão, etc.) são usados para sincronização, como é o caso dos sistemas wireless [YA09].

Considerando o sinal recebido  $y(n)$ , a métrica de *sensing* baseada na forma de onda é dada por [Tan05]

$$M = \mathcal{Re} \left[ \sum_{n=1}^N y(n) s^*(n) \right], \quad (2.5)$$

onde  $s(n)$  é o sinal conhecido que se espera identificar no sinal recebido. Caso o sinal recebido contenha apenas ruído, então o valor da correlação é dado pela expressão

$$M = \mathcal{Re} \left[ \sum_{n=1}^N w(n) s^*(n) \right]. \quad (2.6)$$

Por outro lado, caso o sinal recebido contenha algum sinal de um utilizador primário,

então da expressão (2.6) vem

$$M = \sum_{n=1}^N |s(n)|^2 + \mathcal{R}e \left[ \sum_{n=1}^N w(n) s^*(n) \right], \quad (2.7)$$

sabendo que  $M$  será tanto maior quanto mais correlacionado  $y(n)$  estiver com o padrão  $s(n)$ . Através da comparação de  $M$  com determinado limiar  $\lambda_W$ , pode-se concluir se existe ou não sinal de utilizadores primários no sinal recebido.

Quanto maior for o número de sinais padrão conhecidos, maior será a performance desta técnica.

### ***Sensing* baseado na ciclo-estacionariedade**

Este tipo de técnica baseia-se no facto de a maioria dos sinais utilizados nas comunicações sem fios serem ciclo-estacionários, contrariamente ao que ocorre com o ruído que é estacionário. Diz-se que um sinal é ciclo-estacionário quando tanto a média como a função auto-correlação são periódicas com período  $T_0$ , ou seja:

$$\begin{aligned} m_x(t) &= m_x(t + kT_0), \\ R_x(t + t, t) &= R_x(t + t + kT_0, t + kT_0). \end{aligned} \quad (2.8)$$

A vantagem do *sensing* baseado em ciclo-estacionariedade, é que é possível diferenciar-se o ruído dos sinais dos utilizadores primários, devido ao facto do ruído ser estacionário, logo este não terá correlação quando modulado com sinais ciclo-estacionários [CB05]. Outra vantagem reside na possibilidade de distinguir sinais transmitidos por múltiplos utilizadores primários [LKHP07].

A função densidade espectral cíclica (CSD) do sinal recebido, pode ser calculada através da seguinte expressão [Gar88]:

$$S(f, \alpha) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} R_y^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f\tau}, \quad (2.9)$$

onde  $R_y^\alpha(\tau)$  representa a função de autocorrelação cíclica, sendo esta expressa da seguinte forma

$$R_y^\alpha(\tau) = E[y(n + \tau)y^*(n - \tau)e^{j2\pi\alpha n}], \quad (2.10)$$

em que  $\alpha$  é a frequência cíclica. A função CSD apresenta à saída valores de pico, quando a frequência cíclica é igual à frequência fundamental do sinal transmitido. Para saber se existe no sinal recebido um sinal com frequência cíclica  $\alpha_1$ , basta utilizar a função CSD, e se à saída desta se observar algum pico, então significa que esse sinal com frequência cíclica  $\alpha_1$  está presente no sinal recebido.

Segundo [YA09], a obtenção, por parte dos utilizadores cognitivos, das frequências cíclicas dos sinais dos utilizadores primários, pode ser feita de duas formas: pode ser assumido que o utilizador cognitivo conhece à partida quais as frequências dos sinais transmitidos; pode ser extraída dessas frequências dos sinais recebidos e usar como recursos para identificação dos sinais transmitidos.

O aumento do número de características do sinal contribui para o aumento da robustez contra o fenómeno de multipercurso e desvanecimento [SLND07]. Por outro lado, isto faz com que aumente o *overhead* e o desperdício da largura de banda.

### ***Sensing* baseado em identificação de rádio**

No *sensing* baseado em identificação de rádio, o completo conhecimento das características do espectro pode ser obtido através da identificação das tecnologias de transmissão utilizadas pelos utilizadores primários. Tal identificação permite a um rádio cognitivo com elevada dimensão de conhecimento fornecer alta precisão [YA06]. O principal objectivo desta técnica de *sensing* é identificar alguma das tecnologias que o rádio cognitivo conhece, de modo a que este possa comunicar a partir desta.

No caso desta técnica, citada em [YA09], há dois cenários principais. Um primeiro, em que o rádio cognitivo procura na rede por possíveis modos de transmissão, cenário denominado IMI (*Initial Mode Identification*). No outro cenário, designado por AMM (*Alternative Mode Monitoring*), o rádio cognitivo monitoriza simultaneamente outros modos de transmissão e comunica num certo modo de transmissão.

### ***Sensing* utilizando *matched-filter***

Esta técnica é usada quando os utilizadores primários transmitem sinais que são conhecidos *a priori* pelo rádio cognitivo e quando o ruído considerado é AWGN. O *matched-filter* é um filtro linear que maximiza o rácio entre a potência do sinal de saída e o ruído para um dado sinal de entrada. A operação de detecção do *matched-filter* é dada pela seguinte expressão

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(n-k)x(k), \quad (2.11)$$

onde  $x(k)$  é o sinal recebido pelo rádio cognitivo, e  $h(k)$  é a resposta impulsiva do filtro. A operação do *matched-filter* equivale à correlação em que é feita a convolução entre  $x(k)$  e  $h(k)$ , sendo este último o filtro cuja resposta ao impulso é o espelho do sinal de referência transladado no tempo [SB11].

### **Comparação das várias técnicas de *Sensing***

Na Figura 2.6, é possível classificar as diferentes técnicas a nível da precisão da detecção de sinais de utilizadores primários, assim como a complexidade associada a estas. Torna-se evidente que a técnica baseada na forma de onda é mais robusta que as técnicas baseadas na detecção de energia e na ciclo-estacionariedade, isto devido ao uso da componente determinística do sinal. No entanto, deve haver uma informação *a priori* sobre as características dos sinais transmitidos pelos primários.

Quando se desconhece por completo os sinais usados pelos utilizadores primários, a única técnica aplicável é a detecção por energia. Por outro lado esta técnica é limitada nos seguintes pontos:

- O ruído pode não ser estacionário e a sua distribuição desconhecida;
- Na presença de efeitos de filtros passa-baixo e tons de interferência o sinal amostrado não descreve a ocupação do espectro;
- Fraca distinção de sinais provenientes de diferentes fontes (diferentes utilizadores primários e outros rádios cognitivos);

- Fraco desempenho na detecção de sinais que usam espalhamento no espectro (*spread spectrum*).

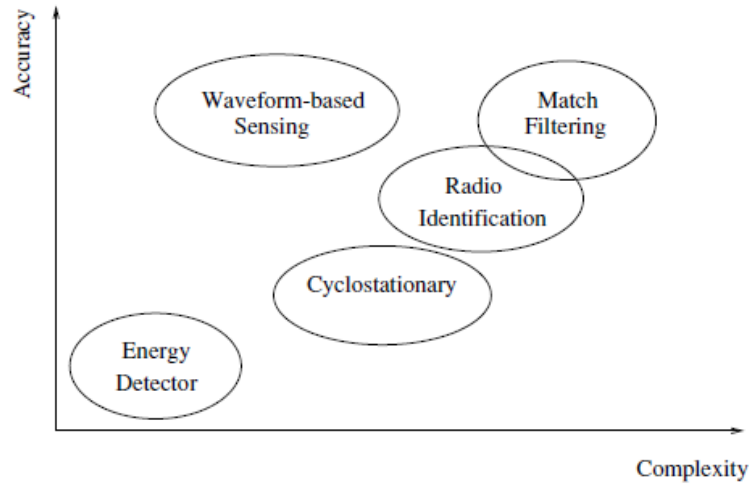


Figura 2.6: Comparação das diferentes técnicas a nível de precisão de *sensing* e complexidade [YA09].

## 2.3 *Sensing* cooperativo

O desempenho do *sensing* está limitado pelo ruído presente no canal e pelos efeitos de desvanecimento, perdas de propagação do sinal transmitido pelo utilizadores primários. Adoptando técnicas de *sensing* cooperativo é possível aumentar a sensibilidade dos rádios cognitivos, traduzindo-se num aumento da probabilidade de detecção e numa diminuição da probabilidade de falso alarme. Deste modo, com o *sensing* cooperativo é melhorada a protecção aos nós primários e o espectro não ocupado é utilizado de uma forma mais eficiente. A cooperação levada a cabo pelos nós não licenciados pode também contribuir para resolver o problema do nó primário escondido e diminuir a duração do *sensing* [WL11].

Um dos maiores desafios do *sensing* cooperativo é o desenvolvimento de algoritmos eficientes de partilha de informação entre os utilizadores secundários [C. 06], [T. 03]. Nas arquitecturas de *sensing* cooperativo o canal de controlo que serve para os nós secundários partilharem informação, pode ser implementado segundo diferentes metodologias. Em [GJMS09] são descritas três metodologias diferentes:

- **Underlay:** Os utilizadores secundários (não licenciados) estão permitidos a operar

desde de que gerem uma interferência abaixo de um determinado limiar.

- **Overlay:** Os utilizadores cognitivos podem transmitir em simultâneo com os utilizadores licenciados, com a particularidade de os utilizadores cognitivos serem informados sobre qual a potência que deverá ser utilizada na transmissão. Esta informação é conseguida pelos utilizadores cognitivos a partir da recepção de mensagens que são enviadas pelos utilizadores não cognitivos.
- **Interweave:** Os utilizadores cognitivos são capazes de detectar espaços livres no espectro e transmitem apenas nesses espaços.

A partir da partilha de informação entre utilizadores secundários é possível haver uma cooperação entre estes, criando dessa forma uma rede de *sensing* cooperativo. A rede de *sensing* cooperativo pode ser implementada de várias formas. Em [WL11] o *sensing* cooperativo, é dividido em dois tipos: o *Sensing* Centralizado e o *Sensing* Distribuído.

No *Sensing* Centralizado, uma unidade central (p.e. um utilizador secundário funcionando como estação base) recolhe as amostras locais observadas pelos múltiplos utilizadores secundários. Com base nessas amostras a unidade central conclui a partir da fusão de regras de decisão (regras AND/OR referidas em [ALB10]) se existem canais livres. Caso existam canais livres cabe à unidade central informar os utilizadores secundários.

No caso em que a rede cognitiva apresente uma elevada quantidade de utilizadores, a largura de banda requerida para a recolha de informação torna-se elevada. De modo a reduzir a largura de banda do canal de partilha de informação, as observações locais dos utilizadores cognitivos podem ser codificadas num único bit. Segundo [SZL07] e [ALB10], é esperado que apenas os utilizadores com informação fiável reportem à unidade central. Deste modo é necessário que alguns dos utilizadores sejam impedidos de transmitir os seus dados por se tratarem de dados não fiáveis. A inibição do envio de decisões por parte destes utilizadores não confiáveis pode ser implementada através da utilização de dois limiares em vez de apenas um, tal como descrito em [SZB07].

Quanto ao mecanismo de *sensing* Distribuído, os utilizadores secundários partilham entre si os seus resultados do processo de *sensing* e individualmente fazem as suas decisões em relação a que parte do espectro usar. Esta forma de cooperação é mais vantajosa do que a anterior, pois não existe a necessidade de haver uma estação base, reduzindo assim

o seu custo e aumentando a sua escalabilidade e robustez.

O *sensing* cooperativo é efectivamente uma boa técnica para melhorar o desempenho da detecção através da diversificação espacial. Contudo, pode exigir o aumento do número de mensagens de controlo devido à partilha de informação entre utilizadores cognitivos, o que em alguns casos poderá ter um peso significativo na diminuição de desempenho da rede cognitiva.

## 2.4 MAC para Redes Cognitivas

A camada *Medium Access Control* (MAC) tem um importante papel em várias funções dos rádios cognitivos, coordenando várias funções que incluem a mobilidade no espectro, a operação de *sensing* do canal, a alocação de recursos e a partilha de espectro [DDSDB12]. A mobilidade no espectro permite que um utilizador não licenciado liberte o canal devido à sua utilização por parte de um utilizador licenciado e, por sua vez, aceda a outro canal livre de modo a restabelecer a comunicação. A função de *sensing* do canal consiste na capacidade que o utilizador cognitivo tem para recolher informação sobre o espectro utilizado, e de manter uma imagem dinâmica dos canais livres. A alocação de recursos é utilizada para atribuir oportunisticamente canais livres aos utilizadores cognitivos, de acordo com os pedidos de QoS (*Quality of Service*). Por fim, a função de partilha de espectro gere as contenções entre utilizadores primários e secundários de modo a diminuir a interferência entre eles.

De uma forma geral os protocolos cognitivos MAC podem ser classificados de acordo com sua complexidade, arquitectura, níveis de cooperação dentro da rede e como as mensagens de sinalização e de dados são geridas durante a comunicação. Segundo estes pontos os protocolos cognitivos MAC são subdivididos em duas categorias:

- ***Direct Access Based (DAB)***: Nesta categoria de protocolos não é conseguida uma optimização global da rede, pois cada par emissor/receptor faz sua optimização individual. Além disso, a negociação de recursos é classicamente abordada segundo um procedimento *handshake* (descrito em [JZS08] e [SZ08]). A arquitectura simples do protocolo limita o custo computacional e latência. Esta categoria apresenta protocolos baseados em contenção e coordenação.

- **Dynamic Spectrum Allocation (DSA):** Os protocolos pertencentes a esta categoria explora algoritmos de optimização complexos para realizar de forma inteligente, justa e eficiente a alocação do espectro disponível. Os algoritmos dos protocolos DSA garantem uma optimização global da rede e uma melhor performance que os protocolos DAB. Por outro lado, os protocolos DSA são normalmente pouco escaláveis, exibindo elevados atrasos de negociação e elevada complexidade.

Ambos os protocolos DAB e DSA podem ser implementados em arquitecturas distribuídas ou centralizadas.

Para finalizar esta secção, descreve-se abreviadamente um dos protocolos MAC para redes cognitivas com maior popularidade, o qual se encontra normalizado pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). O protocolo, designado IEEE 802.22 [SCL<sup>+</sup>09], apresenta uma solução para os níveis PHY e MAC baseados no protocolo *Wireless Regional Area Network* (WRAN), de modo a explorar o espectro livre das bandas de televisão. O protocolo MAC é baseado em contenção, podendo ser incluído na categoria DAB com uma arquitectura centralizada. Cada célula WRAN é constituída por uma estação base e pelos utilizadores secundários, denominados de *Consumer Premise Equipment* (CPE), associados à estação base. A estação base informa os CPEs relativamente aos canais onde terão de realizar o *sensing*, a duração do *sensing* e as restrições das probabilidades de detecção e de false alarme. Os valores das medições recolhidos por cada CPE durante o *sensing* são depois enviados e analisados pela estação base de modo a esta informar posteriormente os CPEs relativamente aos canais que estão livres.

O IEEE 802.22 é constituído por dois estados de *sensing* sendo estes denominados de *fast* e *fine sensing*. No caso do *fast sensing* este tem uma duração curta ( $< 1ms/canal$ ). Dependendo dos resultados do processo de *fast sensing*, a estação base pode requerer num determinado canal um *sensing* mais fiável. Nesse caso, é aplicado o *fine sensing*, o qual requer um período de *sensing* mais longo quando comparado ao *fast sensing*, e utiliza técnicas de *sensing* mais complexas de modo a aumentar a precisão do resultado do processo de *sensing*.

Durante este capítulo introduziu-se o conceito de redes de rádio cognitivo. Foram apresentadas as principais técnicas para efectuar o processo de *sensing* e as principais

exigências para o desenvolvimento de protocolos MAC para redes de rádio cognitivo.



## Capítulo 3

# *Sensing* baseado em Energia

Este capítulo estuda a técnica de *sensing* baseada no detector de energia, técnica esta que será usada posteriormente num dos dois protocolos de acesso ao meio proposto neste trabalho.

Este capítulo encontra-se dividido em três secções. A primeira secção apresenta uma visão geral da estrutura do detector de energia. Na segunda, descreve-se um estudo para o caso de um cenário onde os utilizadores primários efectuem transições ao longo do período de *sensing*. A terceira secção apresenta uma análise para o caso da aplicação do detector de energia, num cenário onde os múltiplos nós primários podem transmitir em simultâneo, considerando-se que se encontram em diferentes posições.

### 3.1 Introdução

De acordo com o exposto no Capítulo 2, das várias técnicas de *sensing* referidas, foi estudada na presente dissertação a técnica de *sensing* baseado em energia, devido à sua simplicidade em termos de implementação e pelo facto de não necessitar de informação à *priori* relativamente ao comportamento dos nós licenciados. Neste tipo de técnica de *sensing* os nós secundários observam a actividade no meio durante a fase de *sensing*, através da análise de um conjunto de amostras do canal que pretendem caracterizar.

A técnica de *sensing* baseada em energia é fundamentada no clássico detector de energia descrito e estudado em [Urk67]. Na Figura 3.1, é apresentado um esquema de blocos da estrutura do detector de energia [GS07], [SB11].

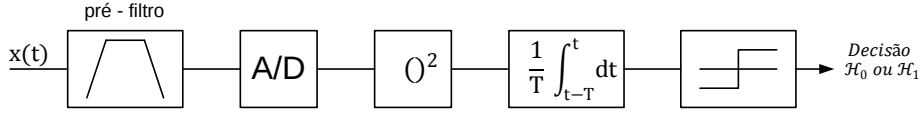


Figura 3.1: Esquema de blocos do detector de energia.

O primeiro bloco é um filtro passa-banda, o qual permite seleccionar a frequência central e o comprimento de onda do canal pretendido. Após a passagem do sinal pelo filtro o sinal é elevado ao quadrado e integrado com determinado tempo de observação,  $T$ . Por fim a saída do integrador é comparada com o limiar predefinido, e é este último bloco que permite decidir se o canal está, ou não, ocupado.

Como descrito analiticamente no Capítulo 2, a detecção do sinal reduz-se apenas a um teste de hipóteses, sendo descritas por:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_0 : x(n) &= w(n) & n &= 1, 2, \dots, S, \\ \mathcal{H}_1 : x(n) &= s(n) + w(n) & n &= 1, 2, \dots, S. \end{aligned} \quad (3.1)$$

A hipótese  $\mathcal{H}_0$  é referente ao caso em que o canal se encontra livre, ou seja, existe apenas ruído  $w(n)$ . A segunda hipótese corresponde ao canal ocupado, ou seja, existe o ruído  $w(n)$  adicionado ao sinal  $s(n)$  do nó primário.

Cumprindo o teorema da amostragem, considera-se que para uma dada banda de *sensing* de  $W$  Hz, e um período de *sensing*  $T_s$ , se realiza uma fase de *sensing* composta pela recolha de  $S$  amostras, onde o número de amostras  $S$  corresponde ao produto  $2WT_s$ .

Nesta dissertação são considerados os seguintes pontos:

- O ruído é *Additive White Gaussian Noise* (AWGN);
- O sinal do nó primário tem distribuição Normal com valor médio  $\mu_s$  e variância  $\sigma_s^2$ .

Ao amostrar o sinal  $x(n)$ , após quadrado e integrado, obtém-se a soma do quadrado das  $S$  Variáveis Aleatórias (RVs) com distribuição Normal, que pode ser representada pela variável  $Y$  com uma distribuição Qui-quadrado. Esta distribuição Qui-quadrado pode ser centrada ou não dependendo para isso do parâmetro  $\lambda$ , o qual é dado por:

$$\lambda = \sum_{i=1}^S \left( \frac{\mu_i}{\sigma_i^2} \right)^2. \quad (3.2)$$

Caso o parâmetro  $\lambda$  seja nulo a distribuição Qui-quadrado é dita centrada. Caso contrário, isto é  $\lambda \neq 0$ , a distribuição Qui-quadrado é dita não centrada.

Quando existe apenas ruído no meio obtém-se  $\lambda = 0$ , ou seja, como o ruído tem média  $\mu_n = 0$  e variância  $\sigma_n^2 = 1$ , a distribuição que representa a soma do quadrado das amostras é uma distribuição Qui-quadrado centrada.

Recorrendo ao teorema do limite central, [Tan05], sabe-se que para um dado valor de amostras ( $S$ ) relativamente elevado (p.e.  $> 50$ ), a distribuição Qui-quadrado  $\chi^2(S)$  pode ser aproximada por uma distribuição Normal  $Y \sim \mathcal{N}(S, 2S)$ . Desta forma, quando o canal está livre (não ocupado por nenhum utilizador licenciado), a energia sentida pelos nós secundários é aproximada por uma distribuição Normal com média  $\mu_Y = S$  e com uma variância  $\sigma_Y^2 = 2S$ .

Relativamente ao caso em que no canal se encontra presente o sinal do nó primário adicionado de ruído, ou seja a hipótese  $\mathcal{H}_1$ , as  $S$  amostras seguem uma distribuição Normal  $\mathcal{N}(\mu_n + \mu_s, \sigma_n^2 + \sigma_s^2)$  com média  $\mu_s$  e com variância  $1 + \sigma_s^2$ .

Ao passar o sinal  $x(n)$  pelo detector de energia, obtém-se à saída do bloco integrador a variável  $Y$  com distribuição Qui-quadrado não centrada com  $2S$  graus de liberdade, sendo o parâmetro de não centralidade dado por  $\lambda = \frac{\mu_s}{1 + \sigma_s^2}$ . Note-se que  $\lambda$  equivale à relação entre o sinal e o ruído [DAS07], ou seja:

$$\lambda = \sum_{n=1}^S SNR(n) = S \times SNR. \quad (3.3)$$

Recorrendo novamente ao teorema do limite central, pode-se aproximar esta distribuição Qui-quadrado por uma distribuição Normal. Assim, a variável  $Y$  é aproximada por uma distribuição Normal com média  $\mu_Y = S + \lambda$  e variância  $\sigma_Y^2 = 2(S + 2\lambda)$ .

Dado que a variável aleatória  $Y$  que expressa a energia acumulada pelo detector pode ser aproximada por duas distribuições normais nos casos das hipóteses  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ , então define-se uma nova variável aleatória  $Z$ , a qual é distribuída de acordo com uma normal standard (com média nula e variância unitária), ou seja, a variável  $Z$  é dada por:

$$Z = \begin{cases} \frac{Y - S}{\sqrt{2S}}, & \mathcal{H}_0, \\ \frac{Y - (S + \lambda)}{\sqrt{2S + 4\lambda}}, & \mathcal{H}_1. \end{cases} \quad (3.4)$$

Formulam-se finalmente as probabilidades de detecção e de falso alarme, sabendo que estas são dadas por:

$$\begin{aligned} P_D &= P_r(Y > \gamma | \mathcal{H}_1), \\ P_{FA} &= P_r(Y > \gamma | \mathcal{H}_0). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Por definição, a função  $Q(x)$  avalia o valor da probabilidade de na cauda de uma distribuição Normal standard se obter um valor superior a  $x$  desvios padrões acima da média. Com isto conclui-se que a probabilidade de detecção e a probabilidade de falso alarme são dadas pelas seguintes expressões:

$$P_D = Q\left(\frac{\gamma - S - S\Lambda}{\sqrt{2S + 4S\Lambda}}\right), \quad (3.6)$$

$$P_{FA} = Q\left(\frac{\gamma - S}{\sqrt{2S}}\right), \quad (3.7)$$

onde o parâmetro  $\Lambda$  corresponde ao rácio entre o sinal e o ruído, ou seja o SNR de uma única amostra, e o parâmetro  $\gamma$  corresponde ao limiar de energia a ser definido para a decisão. Note-se que a probabilidade de falso alarme e a probabilidade de detecção apenas dependem do número de amostras  $S$  e do valor do limiar de energia  $\gamma$ .

### 3.2 Comportamento dos nós primários não constante

Até agora assumiu-se que o estado do nó primário não se altera ao longo da fase de *sensing* (nas  $S$  amostras recolhidas do canal), o que não corresponde a um comportamento realista da utilização do canal. Por vezes o nó primário pode alterar a sua actividade durante o período de *sensing*, correspondendo as  $S$  amostras a situações onde o nó primário pode inicialmente não estar presente no canal e depois utilizá-lo, ou vice-versa. Nesta secção analisa-se esse cenário, em que o canal passa de livre para ocupado e o inverso durante o período de *sensing* (durante as  $S$  amostras).

Admite-se que o nó primário apenas poderá ter uma transição durante o período de *sensing*. Ou seja, é considerado que o nó primário poderá no máximo alterar uma vez o seu comportamento durante o período de *sensing*.

Considerando agora que o nó primário pode utilizar, ou deixar de utilizar o canal

durante a fase de *sensing*, há que adicionar dois cenários novos aos já existentes  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ , sendo definidos da seguinte forma:

- Durante a fase de *sensing* (fase em que são coleccionadas as  $S$  amostras), o nó primário começa por estar inactivo (não utiliza o espectro) e a dada altura passa a estar activo. Este cenário é representado pela hipótese  $\mathcal{H}_{01}$ ;
- Durante a fase de *sensing*, o nó primário começa por estar activo e a dada altura, antes de finalizar a recolha das  $S$  amostras, passa a inactivo. Este cenário é representado através da hipótese  $\mathcal{H}_{10}$ .

Nos novos cenários, nas  $S$  amostras que o detector de energia recolhe, existe somente um conjunto de  $G$  amostras ou de  $S - G$  amostras em que o nó primário permanece activo, tal como representado na Figura 3.2.

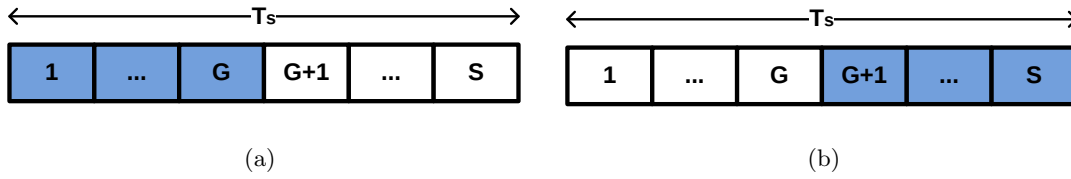


Figura 3.2: Mudança da actividade do nó primário:(a) $\mathcal{H}_{10}$ ;(b) $\mathcal{H}_{01}$ .

No caso  $\mathcal{H}_{10}$  o nó primário encontra-se activo desde da primeira amostra da fase de *sensing* até à amostra  $G$ . Da amostra  $G + 1$  até à  $S$  o nó primário deixa de utilizar o espectro. Quanto ao cenário  $\mathcal{H}_{01}$  corresponde ao caso em que o nó primário está inactivo desde o início da fase de *sensing* até à amostra  $G$ , e entre as amostras  $G + 1$  e  $S$  o nó primário faz utilização do canal.

Começando por analisar a hipótese  $\mathcal{H}_{01}$ , neste cenário à saída do detector de energia obtém-se:

$$\mathcal{H}_{01} : Y_{\mathcal{H}_{01}} = Y_{\mathcal{H}_{01}}^A + Y_{\mathcal{H}_{01}}^B = \sum_{n=1}^G |w(n)|^2 + \sum_{n=G+1}^S |w(n) + s(n)|^2. \quad (3.8)$$

No primeiro somatório de (3.8),  $Y_{\mathcal{H}_{01}}^A$ , segue uma distribuição Qui-quadrado centrada com  $2G$  graus de liberdade. Enquanto que o segundo somatório,  $Y_{\mathcal{H}_{01}}^B$ , segue uma distribuição Qui-quadrado não centrada com  $S - G$  graus de liberdade, e o parâmetro de não

centralidade desta distribuição é dado por  $\lambda$ . Recorrendo novamente ao teorema do limite central, é possível aproximar estas duas distribuições Qui-quadrado das variáveis  $Y_{\mathcal{H}_{01}}^A$  e  $Y_{\mathcal{H}_{01}}^B$  através de duas distribuições normais dadas por:

$$\begin{aligned} Y_{\mathcal{H}_{01}}^A &\sim \mathcal{N}(G, 2G), \\ Y_{\mathcal{H}_{01}}^B &\sim \mathcal{N}(S - G + \lambda, 2(S - G + 2\lambda)). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Sabendo que  $Y_{\mathcal{H}_{01}}$  é dado pela soma das variáveis aleatórias  $Y_{\mathcal{H}_{01}}^A$  e  $Y_{\mathcal{H}_{01}}^B$ , então  $Y_{\mathcal{H}_{01}}$  é uma variável aleatória Normal com média e variância igual às respectivas somas das médias e das variâncias de  $Y_{\mathcal{H}_{01}}^A$  e  $Y_{\mathcal{H}_{01}}^B$ , ou seja:

$$Y_{\mathcal{H}_{01}} = Y_{\mathcal{H}_{01}}^A + Y_{\mathcal{H}_{01}}^B \sim \mathcal{N}(S + \lambda, 2(S + 2\lambda)). \quad (3.10)$$

Tal como foi admitido para a hipótese  $\mathcal{H}_1$ , neste cenário o parâmetro  $\lambda$  é calculado em função do SNR, sendo neste dado por:

$$\lambda = \sum_{n=G+1}^S SNR = (S - G)SNR = (S - G)\Lambda. \quad (3.11)$$

Utilizando as expressões (3.10) e (3.11), a saída do detector de energia é representada pela variável aleatória  $Y_{\mathcal{H}_{01}}$ , com distribuição Normal, média  $\mu_{\mathcal{H}_{01}} = S + (S - G)\Lambda$  e variância  $\sigma_{\mathcal{H}_{01}}^2 = 2S + 4(S - G)\Lambda$ .

Na hipótese  $\mathcal{H}_{01}$ , em que inicialmente apenas existe ruído no canal e posteriormente se observa o sinal do nó primário adicionado ao ruído AWGN, a última amostra recolhida pelos nós secundários contém a presença do nó primário. Deste modo, faz sentido determinar a probabilidade de detecção do nó primário.

Novamente, aproximando  $Y_{\mathcal{H}_{01}}$  por uma Normal standard e recorrendo à função  $Q(x)$ , a probabilidade de detecção neste cenário é dada por:

$$P_D = P_r(Y > \gamma | \mathcal{H}_{01}) = Q\left(\frac{\gamma - S - (S - G)\Lambda}{\sqrt{2S + 4(S - G)\Lambda}}\right). \quad (3.12)$$

Por fim no cenário  $\mathcal{H}_{10}$ , na saída do detector de energia observa-se  $Y_{\mathcal{H}_{10}}$ . Adoptando o mesmo raciocínio descrito anteriormente para a hipótese  $\mathcal{H}_{01}$ , pode-se dividir  $Y_{\mathcal{H}_{01}}$  em dois somatórios.

$$Y_{\mathcal{H}_{10}} = Y_{\mathcal{H}_{10}}^A + Y_{\mathcal{H}_{10}}^B = \sum_{n=1}^G |w(n) + s(n)|^2 + \sum_{n=G+1}^S |w(n)|^2. \quad (3.13)$$

As variáveis aleatórias  $Y_{\mathcal{H}_{10}}^A$  e  $Y_{\mathcal{H}_{10}}^B$  possuem uma distribuição Qui-quadrado, e por aplicação do teorema do limite central, obtêm-se as seguintes distribuições normais que as aproximam:

$$\begin{aligned} Y_{\mathcal{H}_{10}}^A &\sim \mathcal{N}(G + \lambda, 2(G + 2\lambda)), \\ Y_{\mathcal{H}_{10}}^B &\sim \mathcal{N}(S - G, 2(S - G)). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Das duas distribuições normais anteriores, conclui-se que a distribuição da variável  $Y_{\mathcal{H}_{10}}$ , tem média  $\mu_{\mathcal{H}_{10}} = S + \lambda$  e variância  $\sigma_{\mathcal{H}_{10}}^2 = 2(S + 2\lambda)$ . Neste caso,  $\lambda$  é dado por:

$$\lambda = \sum_{n=1}^G SNR = G \times SNR = G\Lambda. \quad (3.15)$$

Contrariamente ao cenário anterior, neste cenário  $\mathcal{H}_{10}$  a(s) amostra(s) finais da fase de *sensing* termina(m) sem a presença do nó primário no canal. Consequentemente, o que interessa calcular neste cenário é a probabilidade de falso alarme, pois o nó secundário irá errar se decidir que o nó primário ainda se encontra a utilizar o canal.

Antes de proceder-se ao cálculo da probabilidade de falso alarme, a variável  $Y_{\mathcal{H}_{10}}$  com distribuição aproximada por uma Normal é primeiramente aproximada por um distribuição Normal standard  $X_{\mathcal{H}_{10}}$ , dada por:

$$X_{\mathcal{H}_{10}} = \frac{Y_{\mathcal{H}_{10}} - S - G\Lambda}{\sqrt{2(S + 2G\Lambda)}} \rightarrow \mathcal{N}(0, 1). \quad (3.16)$$

Obtida a expressão da distribuição Normal standard  $X_{\mathcal{H}_{10}}$ , pode-se então agora calcular a probabilidade de falso alarme. A probabilidade de falso alarme é dada por:

$$P_{FA} = Prob(Y > \gamma | \mathcal{H}_{10}) = Q\left(\frac{\gamma - S - G\Lambda}{\sqrt{2(S + 2G\Lambda)}}\right). \quad (3.17)$$

Tal como foi descrito na secção anterior, as probabilidades de detecção e de falso alarme continuam a depender do número de amostras observadas e do limiar de energia escolhido. Além destes parâmetros estas novas probabilidades também dependem do parâmetro  $G$ ,

ou seja, do número de amostras a partir do qual o nó primário altera a sua actividade durante a fase de *sensing*.

### 3.3 Acesso Simultâneo de Utilizadores Primários

Até aqui foi considerada a existência de um nó primário, localizado relativamente próximo do nó secundário, de forma a que o sinal enviado pelo nó primário seja igual ao recebido pelo nó secundário. Assim as probabilidades de detecção e de falso alarme deduzidas anteriormente são apenas aplicáveis neste tipo cenário, o que é pouco realista.

Nesta secção estuda-se o caso em que múltiplos nós primários podem transmitir em simultâneo no mesmo instante temporal. Além disso, os diversos nós primários podem estar a diferentes distâncias do nó secundário que realiza o *sensing*, com a implicação que este facto tem em termos de desvanecimento da potência recebida.

Em suma, considera-se um cenário onde poderão existir vários nós primários, estando estes a diferentes distâncias do nó secundário. O sinal sentido por um nó secundário é dado pelo somatório de  $n$  sinais individuais, correspondendo aos  $n$  nós primários, sendo cada sinal individual dividido pelo quadrado da distância a que se encontra o respectivo nó primário do nó secundário (note-se que se considerou perdas de propagação com expoente 2, o que representa um cenário com excelentes condições de propagação em termos de atenuação).

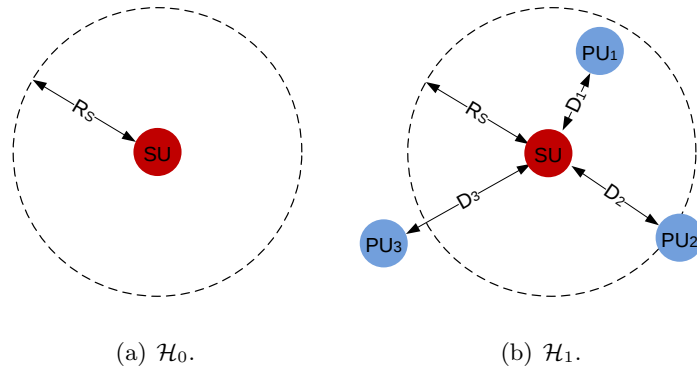


Figura 3.3: Cenários possíveis em que os nós primários comuniquem em simultâneo.

Analisando novamente um conjunto de hipóteses possíveis em termos dos resultados da operação de *sensing*, conclui-se que existem somente duas hipóteses:

$\mathcal{H}_0$  - Nenhum dos nós primários se encontra a transmitir;

$\mathcal{H}_1$  - Existe pelo menos um nó primário a transmitir.

Note-se que contrariamente à secção anterior, nesta análise considera-se que o nó primário não altera a sua actividade durante a fase de *sensing*.

Deste modo, as hipóteses referidas em (3.1) continuam a ser válidas, sendo a única alteração o sinal  $s(n)$ , que agora é representado pela soma de todos os sinais presentes no canal, correspondendo cada sinal a um nó primário activo, ou seja:

$$s(n) = \frac{s_1}{d_1^2} + \frac{s_2}{d_2^2} + \cdots + \frac{s_n}{d_n^2}, \quad (3.18)$$

$d_1, d_2, \dots, d_n$  representam as distâncias a que se encontram cada um dos  $n$  nós primários ao nó secundário que efectua o *sensing*.

Tal como considerado até aqui, o sinal transmitido por um dado nó primário tem distribuição Normal gaussiana com valor médio  $\mu_s$  e variância  $\sigma_s^2$ , ou seja:

$$s_n \sim \mathcal{N}(\mu_s, \sigma_s^2) \quad (3.19)$$

Tendo em conta as propriedades da distribuição Normal, conclui-se que o sinal recebido pelo nó secundário é dado pela seguinte distribuição Normal:

$$s \sim \mathcal{N}(d_1^{-2}\mu_1 + d_2^{-2}\mu_2 + \cdots + d_n^{-2}\mu_n, d_1^{-4}\sigma_1^2 + d_2^{-4}\sigma_2^2 + \cdots + d_n^{-4}\sigma_n^2). \quad (3.20)$$

O sinal sentido pelo nó secundário apresenta uma distribuição Normal com média  $\mu_s = \sum_{i=1}^N d_i^{-2}\mu_i$  e variância  $\sigma_s^2 = \sum_{i=1}^N d_i^{-4}\sigma_i^2$ , em que  $N$  corresponde ao número de nós primários activos.

No primeiro cenário  $\mathcal{H}_0$ , em que existe somente ruído no canal, a expressão da probabilidade de falso alarme mantém-se igual à (3.7), tendo em conta que o detector de energia só recolhe amostras sem a presença de nós primários. Quanto ao segundo cenário, ou seja a hipótese  $\mathcal{H}_1$ , a sua expressão também se mantém igual à (3.6), existindo apenas uma alteração em relação à dedução anterior associada ao parâmetro  $\lambda$ .

$$\lambda = \sum_{n=1}^S \left( SNR \times \sum_{i=1}^N d_i^{-2} \right) = S \times \Omega \quad (3.21)$$

Dadas as probabilidades de detecção (3.6) e de falso alarme (3.7), pode-se analisar o efeito que estas têm no comportamento do nó secundário, tal como foi feito em [HLLZ11].

De seguida deduz-se a probabilidade de acesso ao meio para um determinado nó secundário, podendo observar-se a influência que a probabilidade de detecção e de falso alarme têm sobre a decisão do nó secundário aceder ou não ao canal.

Tendo em conta os cenários  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ , o nó secundário pode aceder ao canal partilhado quando:

1. Não existe nenhum nó primário a transmitir, e o nó secundário verifica que  $Y_s < \gamma$ ;
2. Existe pelo menos um nó primário a transmitir, e o nó secundário verifica que  $Y_s < \gamma$ .

Note-se que ao ocorrer a segunda situação, o nó secundário poderá interferir com os nós primários, pois verifica de forma errónea que pode aceder ao canal. Pode-se então afirmar que a probabilidade de um determinado nó secundário aceder ao meio, é dada pela seguinte expressão:

$$P_{MA} = P(\mathcal{H}_0)(1 - P(Y > \gamma|\mathcal{H}_0)) + P(\mathcal{H}_1)(1 - P(Y > \gamma|\mathcal{H}_1)), \quad (3.22)$$

em que  $P(\mathcal{H}_0)$  e  $P(\mathcal{H}_1)$  correspondem respectivamente às probabilidades do canal estar livre ou ocupado. Quanto à probabilidade condicionada  $P(Y > \gamma|\mathcal{H}_0)$  corresponde ao cenário em que o detector de energia conclui que o canal está ocupado estando na verdade livre, ou seja, trata-se da probabilidade de falso alarme. Por fim a probabilidade condicionada  $P(Y > \gamma|\mathcal{H}_1)$  representa a probabilidade de detecção, visto que se pretende determinar a probabilidade de se detectar que o canal está ocupado, sabendo à partida que o mesmo se encontra ocupado.

Admitindo agora que cada nó primário  $i$  tem uma probabilidade  $p_i$  de transmitir, e que a probabilidade de um nó primário transmitir é independente das probabilidades dos outros nós primários transmitirem. A probabilidade do canal não ser utilizado por nós primários é dada por:

$$p = \prod_{i=1}^N (1 - p_i). \quad (3.23)$$

Conclui-se então que a probabilidade de acesso de um dado nó secundário é dada por:

$$P_{MA} = p(1 - P_{FA}) + (1 - p)(1 - P_D). \quad (3.24)$$

### 3.4 Validação

Nesta secção procede-se à validação da probabilidades de detecção e de falso alarme deduzidas neste capítulo.

De modo a validar-se estas probabilidades recorreu-se à implementação de um algoritmo em linguagem MATLAB para obter dados práticos de simulação e posteriormente compararam-se estes dados com os valores teóricos das probabilidade de detecção e de falso alarme.

Encontra-se representado de forma geral no Algoritmo 3.1 a estrutura do psuedo-código utilizado. Este algoritmo reflecte o funcionamento do detector de energia. Os dados de simulação são resultado de  $N_s$  fases de *sensing*. De forma a se ter uma base de simulação próxima da real são consideradas várias fases de *sensing*, ou seja,  $N_s$  tem que apresentar um valor elevado.

Os parâmetros de entrada deste algoritmo são:

$\mu_s$  - Média do sinal do nó primário;

$\sigma_s$  - Desvio padrão do sinal do nó primário;

$\mu_w$  - Média do ruído AWGN;

$\sigma_w$  - Desvio padrão do ruído AWGN;

$\gamma$  - Limiar de energia;

$S$  - Número de amostras recolhidas durante a fase de *sensing*;

$N_s$  - Número de fases de *sensing* consideradas.

```

parâmetros de entrada:  $\mu_s, \sigma_s, \mu_w, \sigma_w, \gamma, S, N_s$ 

parâmetros de saída :  $P_D, P_{FA}$ 

 $Fases \leftarrow \text{RandomUniform}(0,1,N_s)$  // Gera um vector com  $N_s$  posições

 $H_0 \leftarrow 0$ 

 $H_1 \leftarrow 1$ 

for  $i \leftarrow 1$  to  $N_s$  do
    if  $Fases(i) = H_0$  then
         $w \leftarrow \text{RandomNormal}(\mu_w, \sigma_w, S)$  // Gera um vector com  $S$  posições
         $Y \leftarrow \text{sum}(w^2)$ 
        if  $Y \geq \gamma$  then
             $On\_H_0 \leftarrow On\_H_0 + 1$ 
         $Total\_Off \leftarrow Total\_Off + 1$ 
    if  $Fases(i) = H_1$  then
         $s \leftarrow \text{RandomNormal}(\mu_s, \sigma_s, S)$ 
         $w \leftarrow \text{RandomNormal}(\mu_w, \sigma_w, S)$ 
         $Y \leftarrow \text{sum}((s + w)^2)$ 
        if  $Y \geq \gamma$  then
             $On\_H_1 \leftarrow On\_H_1 + 1$ 
         $Total\_On \leftarrow Total\_On + 1$ 

 $P_{FA} \leftarrow \frac{On\_H_0}{Total\_Off}$ 

 $P_D \leftarrow \frac{On\_H_1}{Total\_On}$ 

```

**Algoritmo 3.1:** Algoritmo para geração de dados.

A escolha do limiar de energia  $\gamma$  foi feita através da aplicação do teorema de Neyman-Pearson [HLLZ11]. Na validação das probabilidades de falso alarme e detecção é definido o limiar para um determinado valor da probabilidade de falso alarme.

Os resultados das simulações para as probabilidades da primeira secção estão apresentados nos gráficos 3.4 e 3.5. As simulações foram efectuadas com um limiar de energia segundo o qual pretende-se obter uma probabilidade de falso alarme de 0.5%.

Foram efectuadas simulações para diferentes períodos de *sensing*. Para cada valor de SNR foram recolhidos dados de 10 000 fases de *sensing*, ou seja,  $N_s = 10\,000$ . Foi também

considerado que o sinal do nó primário apresenta uma distribuição normal com variância igual a 1.

Observando o gráfico da Figura 3.4, verifica-se que a partir dos  $-5dB$  de SNR os resultados práticos encontram-se bastante próximos dos resultados da probabilidade de detecção teórica. No entanto, para baixos valores de SNR os resultados práticos afastam-se dos teóricos. Esta observação deve-se em parte ao facto da variância do sinal do nó primário não ser nula, aumentando a incerteza do sinal que aumenta a dispersão do sinal em relação à média.

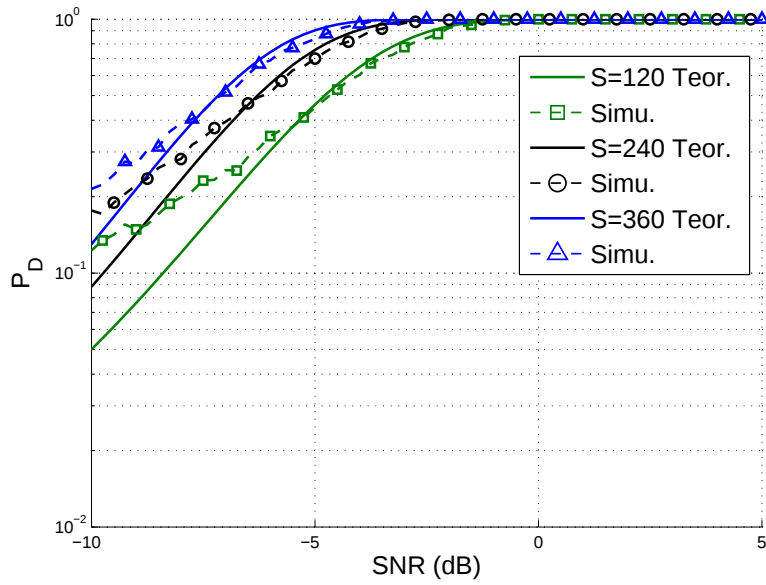


Figura 3.4: Probabilidade de Detecção para o cenário  $\mathcal{H}_1$ .

Tanto com o aumento do SNR como com o aumento do número total de amostras observadas na fase de *sensing*, é evidente o aumento da probabilidade de detecção. Quanto maior for o número de amostras observadas pelo detector maior será a probabilidade detectar correctamente o estado do canal. Isto está directamente relacionado com o parâmetro  $\lambda$ , pois segundo a expressão (3.3), quando maior  $S$  e maior SNR, maior será  $\lambda$  que representa o parâmetro de não centralidade da distribuição Normal do sinal do nó primário. Deste modo, o aumento deste parâmetro reflecte o aumento da energia resultante da fase de *sensing* num cenário onde o sinal do nó primário está presente no canal, enquanto que a energia se mantém aproximadamente constante num cenário em que na fase de *sensing* existe apenas ruído.

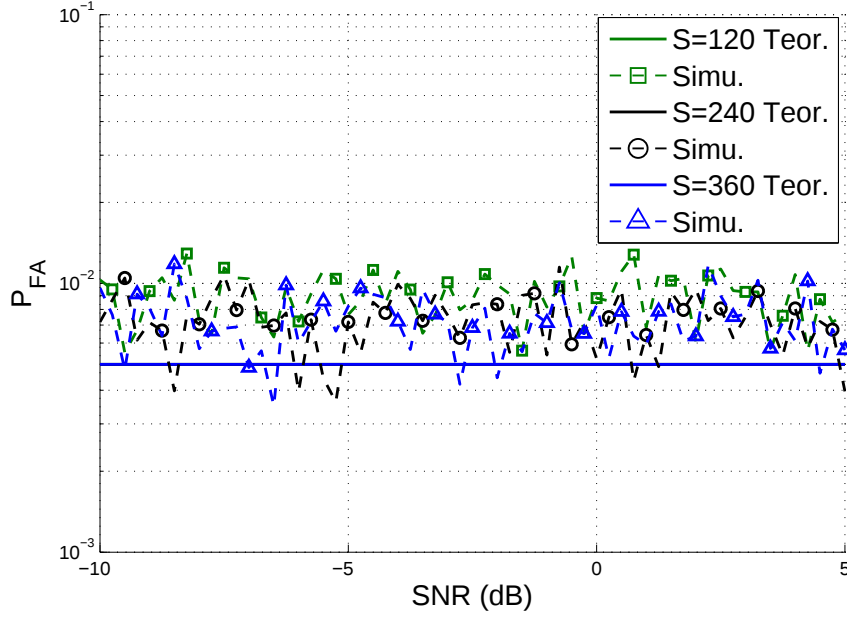


Figura 3.5: Probabilidade de Falso Alarme para o cenário  $\mathcal{H}_0$ .

No gráfico da Figura 3.5 está representada a probabilidade de falso alarme. Como esperado, a probabilidade de falso alarme encontra-se bem próxima dos 0.5%. Os resultados simulados apresentam-se bastante próximos dos teóricos, validando desta forma a dedução teórica apresentada na secção 3.1.

Passando à validação da secção 3.2, nas Figuras 3.6 e 3.7 apresentam-se os resultados das simulações efectuadas para o cenário onde o nó primário poderá não apresentar um comportamento constante durante toda a fase de *sensing*. Neste caso foram considerados os mesmos parâmetros de entrada que no caso anterior, com a excepção do parâmetro  $N_s$ . Nesta simulação foram consideradas 50 000 fases de *sensing*. Além destes parâmetros foi também admitido que a alteração do comportamento do nó primário ocorre segundo uma distribuição Uniforme, ou seja, para uma dada fase de *sensing* em que ocorra alteração do comportamento do nó primário numa das  $S$  amostras de *sensing*, a amostra de transição  $G$  é proveniente de uma distribuição Uniforme.

O algoritmo apresentado anteriormente continua a ser válido neste cenário, tendo apenas algumas alterações. Além das hipóteses  $H_0$  e  $H_1$ , são adicionadas as hipóteses  $H_{10}$  e  $H_{01}$ .

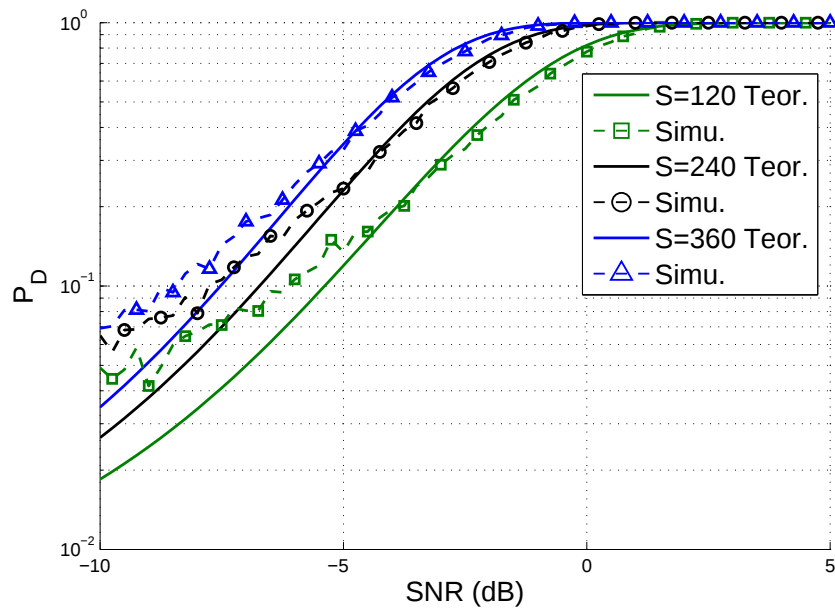


Figura 3.6: Probabilidade de Detecção.

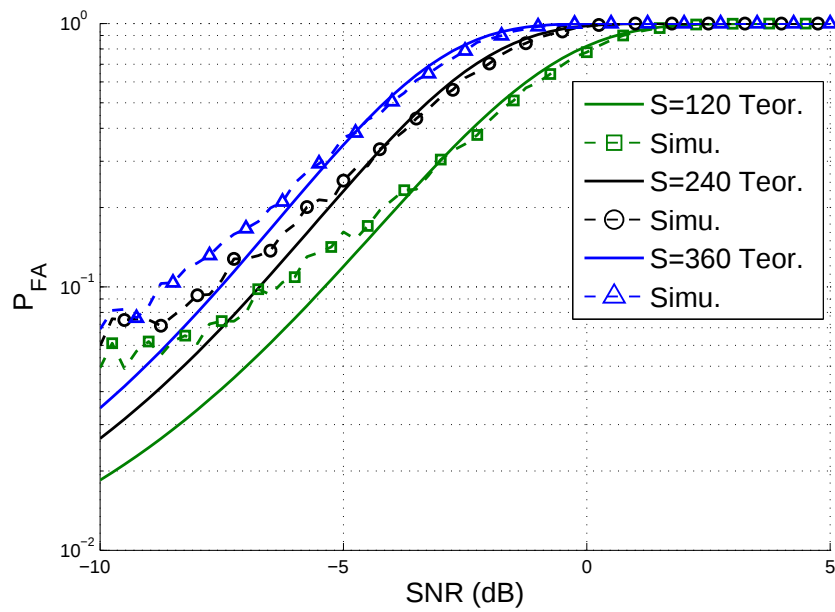


Figura 3.7: Probabilidade de Falso Alarme.

Observando os gráficos das Figuras 3.6 e 3.7, pode-se afirmar que para valores de SNR superiores a  $-5dB$ , os resultados teóricos estão próximos dos resultados obtidos através de simulação. A dedução teórica começa a evidenciar maior erro para valores de SNR inferiores a  $-5dB$ .

Por fim segue-se a validação do último cenário estudado, no qual os nós primários podem, no mesmo instante temporal, transmitir em simultâneo. Para este cenário foi admitido a existência de 5 nós primários e um nó secundário, tal como apresentado na Tabela 3.1, que descreve ainda a probabilidade de acesso ao canal de cada nó primário, e a distância entre cada nó primário e nó secundário. Foi utilizado o Algoritmo 3.1 para a geração de dados de simulação. Para calcular a média e a variância da distribuição Normal do sinal do primário sentido pelo nó secundário foram usadas as expressões (3.20).

| Nó           | 1     | 2     | 3    | 4     | 5     |
|--------------|-------|-------|------|-------|-------|
| Distância(m) | 8.62  | 5.68  | 7.33 | 4.92  | 2.03  |
| $p_i$ (%)    | 14.46 | 19.79 | 4.05 | 17.13 | 10.26 |

Tabela 3.1: Localização e probabilidade de acesso ao canal de cada nó primário.

É admitido que todos os nós primários transmitem o seu sinal segunda uma distribuição Normal com média  $\mu_s$  e variância  $\sigma_s^2$ . No caso desta simulação a relação entre o valor de SNR sentido pelo nó secundário e o sinal transmitido por cada um dos utilizadores primários é dado por  $SNR_{SU} = SNR_{PU} + 5$ . Admite-se que os sinais individuais dos nós primários apresentam variância unitária.

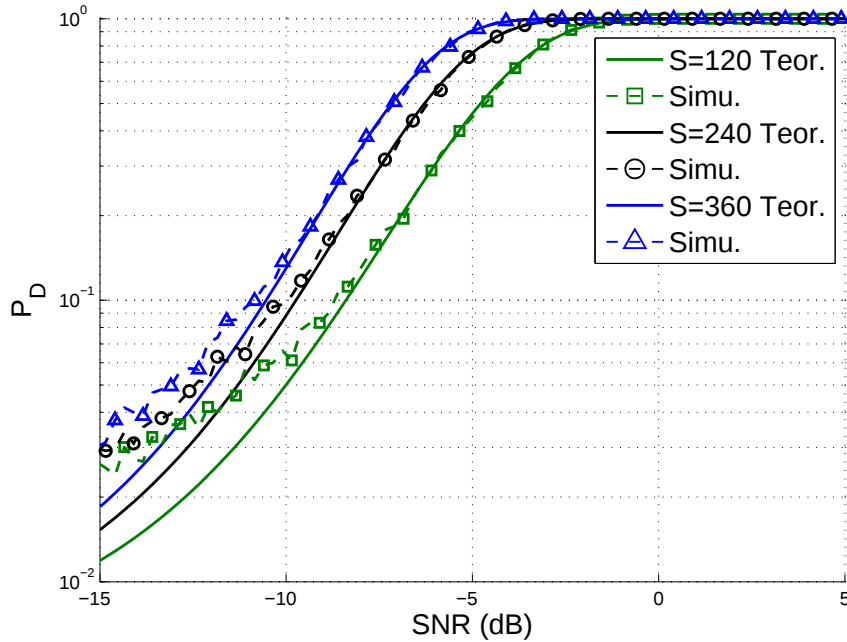


Figura 3.8: Probabilidade de Detecção.

Nas Figuras 3.8 e 3.9 representam-se os dados teóricos e os de simulação das probabilidades de falso alarme e de detecção. Tal como anteriormente descrito, o limiar da energia foi obtido segundo o Teorema de Neyman-Pearson. Foi obtido um limiar energia de modo a garantir uma probabilidade de falso alarme de 0.5%.

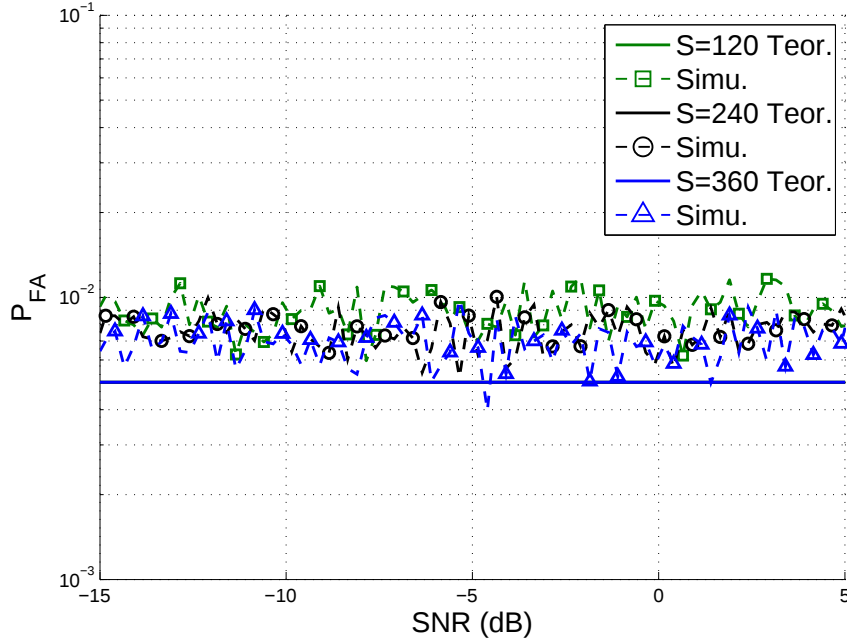


Figura 3.9: Probabilidades de Falso Alarme.

Os resultados da simulação a partir dos  $-10dB$  de SNR encontram-se aproximadamente coincidentes com os resultados teóricos, ou seja, validam as probabilidades deduzidas a partir desse valor de SNR. É possível verificar que o aumento das amostras observadas e o aumento do SNR traduz um aumento da probabilidade de detecção.

Na Figura 3.10 representa-se a probabilidade de acesso ao meio do nó secundário. Recorrendo à Tabela 3.1 e à expressão (3.23) é possível calcular a probabilidade  $p$ , ou seja, a probabilidade do meio estar vazio, sendo neste cenário de 0.49. Como se pode verificar com o aumento do valor de SNR a probabilidade do nó secundário aceder ao canal tende para  $p$ . Para valores baixos de SNR a probabilidade do nó secundário aceder ao canal é aproximadamente 1. Isto é devido ao facto da probabilidade da detecção apresentar um valor muito baixo, consequentemente, o nó secundário decide várias vezes de forma errada que o canal está vazio. É desta forma que as probabilidades de falso alarme e detecção

influenciam o comportamento do nó secundário. Note-se que para uma probabilidade de falso alarme elevada, o nó secundário em vez de interferir com os nós primários, como ocorre neste cenário simulado, iria na verdade desperdiçar acessos ao canal vazio.

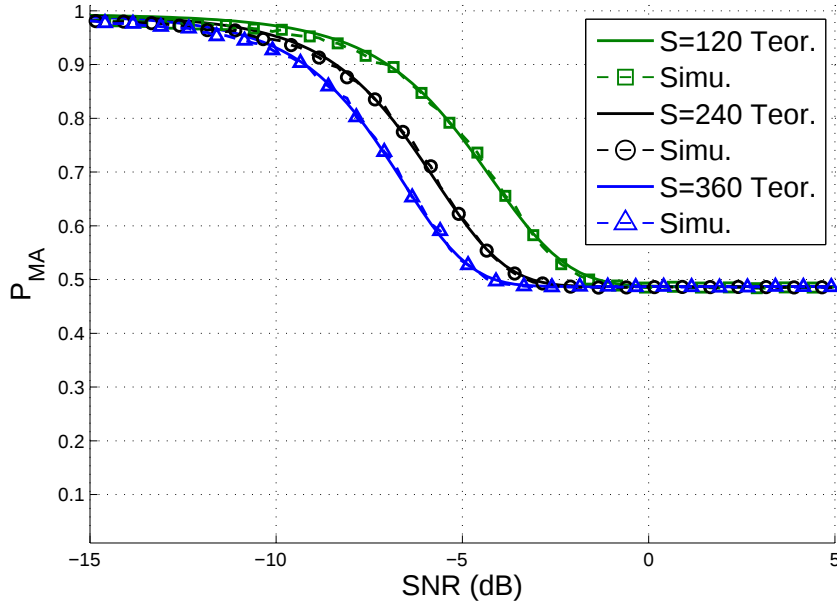


Figura 3.10: Probabilidade de acesso ao meio,  $P_{MA}$ .

Finalizado este capítulo em que foram apresentadas as deduções das probabilidades de detecção e de falso alarme para diferentes cenários de operação, apresenta-se no próximo capítulo um protocolo de *sensing* onde se utilizam as probabilidades aqui validadas.

## Capítulo 4

# Sistemas Cognitivos *Single-radio*

Uma vez deduzidas e validadas as probabilidades que descrevem o desempenho do *sensing* baseado em energia, é apresentada neste capítulo a comparação entre vários critérios de parametrização do detector de energia, num cenário onde os nós secundários utilizam um único rádio (*single-radio*) para realizar as operações de *sensing* e de transmissão de dados. Este capítulo tem como missão caracterizar o impacto que os diferentes métodos de parametrização do limiar de decisão do detector de energia provocam em termos do desempenho de uma rede cognitiva. A comparação entre critérios será obtida através da caracterização do desempenho de uma rede cognitiva, na qual os utilizadores não licenciados realizam o processo de *sensing* por intermédio de um detector de energia.

Este capítulo encontra-se dividido em três secções. Na primeira é realizada uma descrição detalhada do funcionamento da rede cognitiva. A segunda secção descreve os critérios de parametrização considerados. Por fim, os resultados das simulações realizadas para validar o estudo são apresentados e discutidos na Secção 4.3.

### 4.1 Descrição da Rede de Rádio Cognitivo

O limiar de decisão de um detector de energia pode ser parametrizado segundo diferentes critérios, objectivando um bom compromisso entre as probabilidades de detecção e de falso alarme. A forma como o detector de energia decide sobre o estado (livre ou ocupado) de um determinado canal, é dependente da parametrização do limiar de decisão e do número de amostras considerado no processo de *sensing*. Deste modo, pretende-se

analisar neste capítulo o desempenho de diferentes critérios de parametrização, variando o número de amostras utilizadas no detector de energia. Para tal, foi considerada um rede de rádios cognitivos onde se aplicaram os diferentes critérios de parametrização. A comparação entre critérios é obtida em função do desempenho que a rede cognitiva apresenta para cada critério. O desempenho da rede é caracterizado através da interferência causada pelos nós secundários aos nós primários e pela taxa de sucesso de transmissão alcançada pelos nós secundários.

A rede cognitiva considerada neste trabalho é constituída por um par de nós primários (emissor/receptor) e um par de nós secundários (emissor/receptor), tal como representado na Figura 4.1. O emissor secundário utiliza a técnica de *sensing* baseada em energia para detectar a actividade dos utilizadores primários.

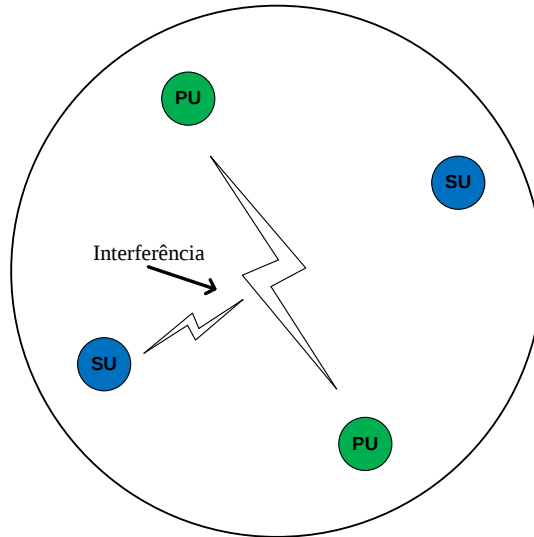


Figura 4.1: Rede sem fios com nós secundários e primários.

Os nós secundários utilizam um único rádio, sendo a rede classificada como uma arquitectura do tipo *single-radio*. Com esta arquitectura, os utilizadores secundários não são capazes de executar o processo de *sensing* e transmitir no mesmo instante temporal. Desta forma, os utilizadores secundários apresentam um ciclo de operação que está dividido em dois períodos, sendo o primeiro o período de *sensing* ( $T_S^{SU}$ ) e o segundo o período de transmissão ( $T_D^{SU}$ ). Durante o processo de *sensing* os utilizadores secundários recolhem  $N_S$  amostras do canal com uma taxa de amostragem que cumpre o Teorema de

Nyquist, relativamente à banda que se pretende monitorizar. Os utilizadores secundários encontram-se sincronizados durante todo o período de *sensing*, de modo a que nenhum utilizador secundário possa ocupar o espectro durante esse período e, dessa forma, ser detectado erradamente pelos restantes utilizadores secundários como um utilizador primário.

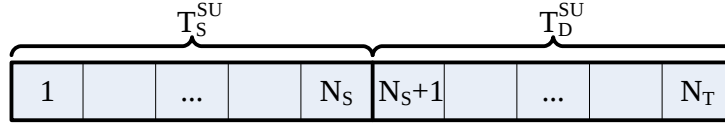


Figura 4.2: Estrutura da Trama adoptada pelos utilizadores secundários.

Os dois períodos de operação dos utilizadores secundários podem ser agrupados, tal como representado na Figura 4.2, formando assim uma trama com uma duração  $T_F^{SU}$  equivalente à soma dos períodos de *sensing* e de transmissão:

$$T_F^{SU} = T_S^{SU} + T_D^{SU}. \quad (4.1)$$

No primeiro período da trama, o período de *sensing*, o nó secundário emissor recolhe amostras do canal durante o intervalo temporal  $T_S^{SU}$ . Tal com exposto no Capítulo 3, cada uma das amostras retiradas pelo detector de energia corresponde a uma das seguintes hipóteses:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_0 : x(n) &= w(n) & n &= 1, 2, \dots, S, \\ \mathcal{H}_1 : x(n) &= s(n) + w(n) & n &= 1, 2, \dots, S. \end{aligned} \quad (4.2)$$

A hipótese  $\mathcal{H}_0$  representa o caso em que os nós primários se encontram inactivos, ou seja existe apenas ruído AWGN no canal. Por outro lado, a hipótese  $\mathcal{H}_1$  representa o caso em que o canal se encontra ocupado por um nó primário.

Após o período de *sensing*, o rádio cognitivo decide se o canal se encontra livre ou ocupado, baseando a sua decisão no nível de energia recebida nas  $N_S$  amostras. A decisão do rádio cognitivo tem maior ou menor precisão, a qual é aferida pelas probabilidades de detecção e falso alarme, já descritas no Capítulo 3 e representadas respectivamente nas expressões (4.3) e (4.4):

$$P_D = Q\left(\frac{\gamma - N_S - N_S\Lambda}{\sqrt{2N_S + 4N_S\Lambda}}\right), \quad (4.3)$$

$$P_{FA} = Q\left(\frac{\gamma - N_S}{\sqrt{2N_S}}\right). \quad (4.4)$$

Caso o utilizador secundário emissor decida que o canal se encontra livre, então durante o período de transmissão é estabelecida comunicação com o utilizador secundário receptor. Por outro lado, caso o utilizador secundário emissor decida que o canal está ocupado, então este limita-se a esperar pelo próximo período de *sensing* da trama seguinte, permanecendo inactivo durante todo o período de transmissão  $T_D^{SU}$ .

É importante referir que se admite ao longo deste capítulo que o emissor secundário possui sempre dados para transmitir. De seguida, caracterizam-se os débitos de transmissão dos utilizadores primários e secundários.

#### 4.1.1 Débito

Os nós primários acedem ao canal com probabilidade  $\tau_{PU}$ . De modo a simplificar, é admitido que a actividade dos nós primários só se altera no início de cada trama dos nós secundários. A duração da trama dos nós primários,  $T_F^{PU}$ , será sempre  $g$  vezes superior à duração total da trama dos nós não licenciados ( $T_F^{PU} = g \cdot T_F^{SU}$ ,  $g \geq 1s$ ). Os nós secundários acedem ao canal com probabilidade  $\tau_{SU}$ , dada por

$$\tau_{SU} = (1 - \tau_{PU})(1 - P_{FA}) + \tau_{PU}(1 - P_D), \quad (4.5)$$

onde o primeiro termo da expressão (4.5) corresponde ao caso em que o rádio cognitivo detecta com sucesso que o canal se encontra livre. O segundo termo corresponde ao rádio cognitivo decidir de forma errada que o canal se encontra livre.

A partir da expressão (4.5) deduz-se a probabilidade de um nó secundário interferir com um nó primário, ou seja a probabilidade  $P_I$  do nó secundário falhar a detecção durante a presença do nó primário no canal,

$$P_I = \tau_{PU}(1 - P_D). \quad (4.6)$$

Convém salientar que se assume que quando existem transmissões simultâneas de um nó primário e de um nó secundário nenhum dos nós receptores é capaz de recuperar a informação transmitida. Este cenário considera o pior desempenho que os nós podem alcançar quando existem transmissões em simultâneo (pior caso em termos de interferência).

O débito global da rede cognitiva é definido pela soma do débito alcançado pelos nós secundários e primários. O débito alcançado pelo nós secundários é definido pelo rácio entre a duração do período médio de transmissão com sucesso e a duração total da trama.

$$S_{SU} = \frac{T_D^{SU}(1 - \tau_{PU})(1 - P_{FA})}{T_F^{SU}}. \quad (4.7)$$

Por outro lado, o débito alcançado pelos nós primários é apenas limitado pelas situações em que canal se encontra ocupado e o nó secundário falha a detecção, sendo definido por:

$$S_{PU} = \tau_{PU}P_D. \quad (4.8)$$

Deste modo, o débito global alcançado na rede cognitiva *single-radio* é definido pela seguinte expressão:

$$S = \frac{T_D^{SU}(1 - \tau_{PU})(1 - P_{FA})}{T_F^{SU}} + \tau_{PU}P_D. \quad (4.9)$$

## Validação

Após a dedução teórica dos débitos da rede, validam-se de seguida as expressões apresentadas através de simulação da rede cognitiva descrita. O método utilizado para esta validação foi método das réplicas [Tah87]. Este refere que deve ser reunido um conjunto de amostras independentes, realizando posteriormente um tratamento estatístico das mesmas. A partir do conjunto de amostras  $(x_i)$  é possível obter o seu valor médio  $(\bar{X})$  e a sua variância  $(s^2)$ . Com estes dados é possível determinar o seu intervalo de confiança. Quando a variável aleatória tem uma distribuição normal, o valor esperado da variável aleatória está compreendido no intervalo obtido pela expressão (4.10), com uma probabilidade  $1 - \varphi$  e um número de amostras  $n$ , onde o parâmetro  $t_{\frac{\varphi}{2}}$  é obtido através

da consulta da distribuição  $t$  de *Students*.

$$(\bar{X}) - t_{\frac{\varphi}{2}} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq (\bar{X}) + t_{\frac{\varphi}{2}} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.10)$$

O conjunto de amostras  $x_i$  provém da simulação da rede cognitiva com cinco períodos diferentes de actividade dos utilizadores primários ( $n = 5$ ). Foi considerado  $\varphi = 5\%$ , o que garante um nível de confiança do intervalo de erro de 95%.

Nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 representam-se os valores de débito resultante das simulações realizadas para três cenários diferentes (em que o único parâmetro alterado é o valor de  $\tau_{PU}$ ), em função de diferentes valores de SNR. Tanto o número de amostras  $N_S$  como o limiar de decisão  $\gamma$  foram obtidos de modo a maximizar expressão teórica do débito global da rede. Esta maximização foi realizada com o recurso ao software *Mathematica*, onde foi calculado, para um determinado valor de SNR, o débito global da rede em função da variação dos parâmetros  $N_S$  e  $\gamma$ . Após o cálculo foi seleccionado o número de amostras  $N_S$  e o limiar de energia  $\gamma$  para os quais se verifica o maior valor de débito. Os restantes parâmetros considerados na simulação da rede cognitiva estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parametrização da rede cognitiva.

|            |         |                    |            |
|------------|---------|--------------------|------------|
| W          | 10 kHz  | Taxa de amostragem | 50 $\mu s$ |
| $T_F^{SU}$ | 21.3 ms | $\sigma_s^2$       | 3          |

A Figura 4.3 apresenta o débito global da rede cognitiva ( $S$ ), o débito alcançado pelos utilizadores primários ( $S_{PU}$ ) e o débito alcançado pelos utilizadores secundários ( $S_{SU}$ ), para um cenário em que os utilizadores primários têm uma probabilidade de acesso ao canal igual a  $\tau_{PU} = 0.3$ . Como é possível observar, as deduções teóricas dos débitos encontram-se validadas pela simulação para todos os valores de SNR, pois os valores teóricos encontram-se quase sobrepostos aos valores resultantes de simulação. Verifica-se que com o aumento dos valores de SNR o débito útil dos utilizadores secundários e o débito útil dos utilizadores primários também aumenta. Isto acontece porque a potência do sinal transmitida pelos utilizadores primários é tão baixa que os utilizadores secundários durante o processo de *sensing* não são capazes detectar com sucesso a sua presença. Deste modo, para baixos

valores de SNR não é garantida a total protecção aos utilizadores primários contra a interferência provocada pelos utilizadores secundários, e com isso diminui o débito alcançado pelos utilizadores primários. Quanto ao débito alcançado pelos utilizadores secundários, este é menor para valores de SNR baixos, porque nesses cenários não é garantida uma baixa probabilidade de falso alarme. Ou seja, nesses cenários ocorrem situações em que o meio se encontra livre, mas os utilizadores secundários não acedem ao meio porque o limiar de energia definido é menor que a energia do ruído recolhida durante o processo de *sensing*.

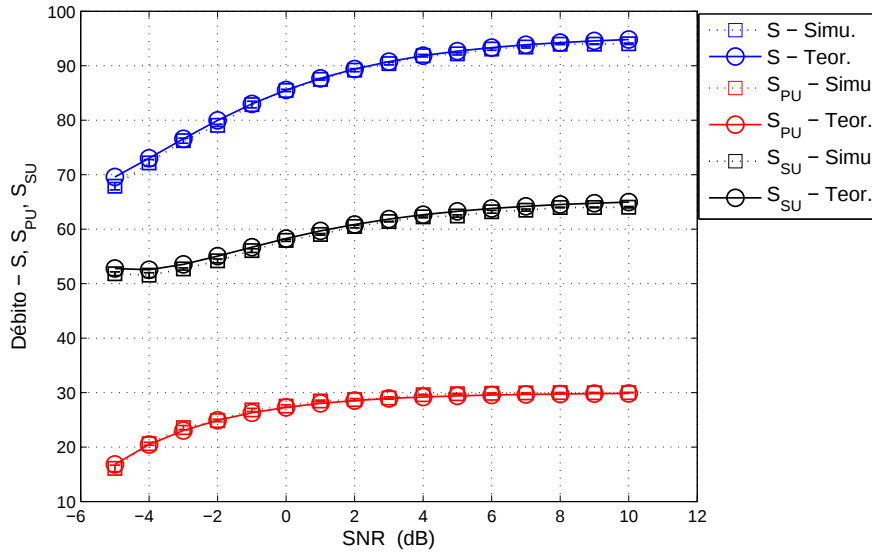


Figura 4.3: Validação dos débitos para  $\tau_{PU} = 0.3$ .

Na Figura 4.4 encontram-se representados o débitos  $S$ ,  $S_{PU}$  e  $S_{SU}$  resultantes das simulações em que os utilizadores primários têm uma probabilidade de acesso de  $\tau_{PU} = 0.5$ . Como se pode observar neste cenário os valores teóricos encontram-se dentro dos intervalos de confiança dos resultados de simulação, ou seja a dedução teórica dos débitos  $S_{SU}$ ,  $S_{PU}$  e  $S$  é validada. Tal como no cenário anterior, o menor desempenho do detector de energia para baixos valores de SNR contribui para um menor débito alcançado pelos utilizadores primários e secundários.

Por fim, na Figura 4.5 representam-se os mesmos débitos representados nos dois casos anteriores, mas para um cenário em que os utilizadores primários têm uma probabilidade de acesso ao canal igual a  $\tau_{PU} = 0.7$ . Neste cenário as expressões teóricas  $S$ ,  $S_{PU}$  e  $S_{SU}$

também são validadas com sucesso. Comparando os três cenários ( $\tau_{PU} = 0.3$ ,  $\tau_{PU} = 0.5$  e  $\tau_{PU} = 0.7$ ), o aumento do débito alcançado pelos utilizadores primários em função do aumento dos valores de SNR é menos acentuado neste último caso. Ou seja, neste cenário, em que a probabilidade de acesso dos utilizadores primários é igual a 0.7, é garantida uma maior protecção aos utilizadores primários para os mesmos valores de SNR que os cenários onde  $\tau_{PU}$  é igual a 0.3 e 0.5.

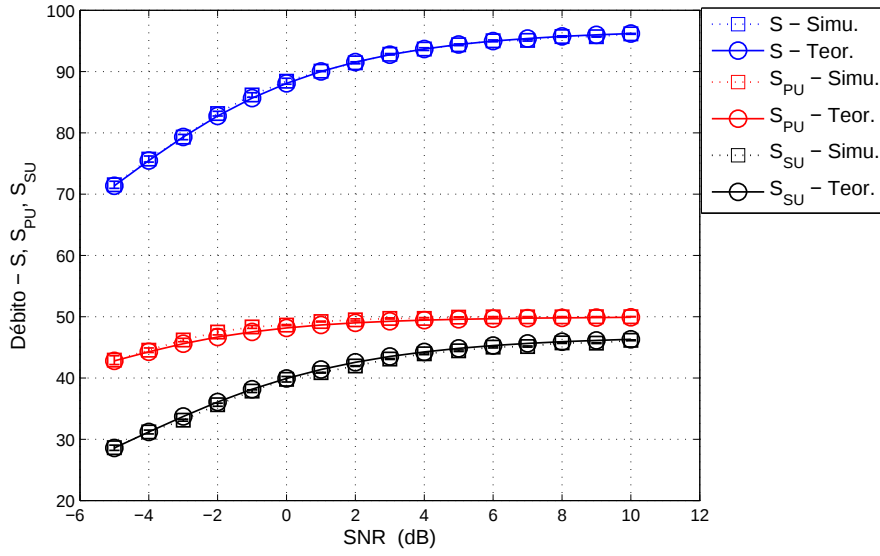


Figura 4.4: Validação dos débitos para  $\tau_{PU} = 0.5$ .

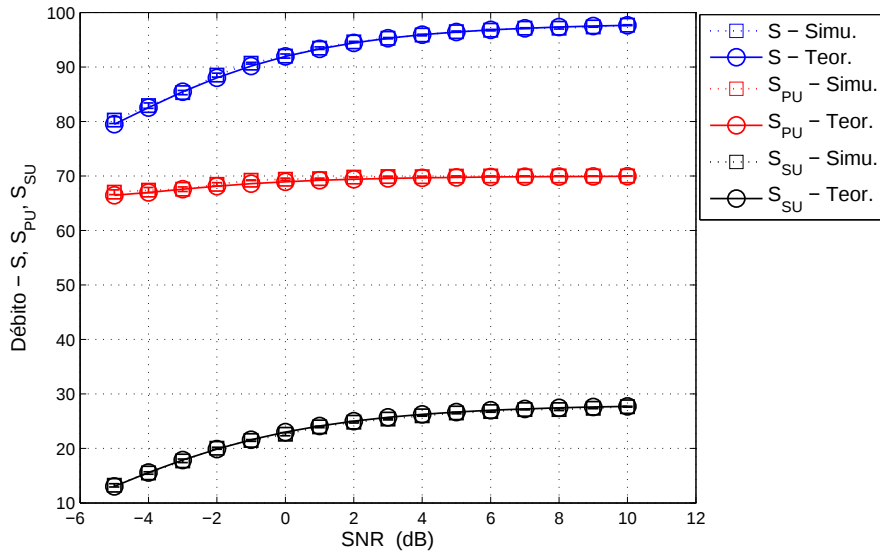


Figura 4.5: Validação dos débitos para  $\tau_{PU} = 0.7$ .

Descrita a rede cognitiva e os débitos que a caracterizam, apresentam-se na próxima secção os diferentes critérios a serem analisados na parametrização do limiar de decisão do detector de energia utilizados pelos utilizadores secundários.

## 4.2 Parametrização dos critérios de *Sensing*

Tal como referido anteriormente, no caso do *sensing* baseado em energia, o sucesso da operação de detecção depende sobretudo da duração da observação do meio (número de amostras recolhidas) e da parametrização do limiar de decisão utilizada. Em diversos trabalhos já publicados são propostos diferentes critérios de parametrização do limiar de energia. Dado não existir nenhum estudo comparativo dos impactos dos diferentes critérios de parametrização, ao nível do desempenho da rede, este capítulo apresenta um estudo comparativo que pretende identificar as suas vantagens e desvantagens. Foram seleccionados cinco critérios de parametrização que serão apresentados de seguida (de entre os critérios seleccionados encontram-se os critérios adoptados em [GS07] e [LA08]).

### 4.2.1 Critérios de parametrização

#### 1) Critério de parametrização $C_1$

Este critério de parametrização é um dos mais utilizados na literatura e pretende limitar a interferência causada aos utilizadores primários. Para tal, a probabilidade de interferência ( $P_I$ ) é definida como o nível máximo de interferência admissível tolerada pelos utilizadores primários. Reescrevendo (4.6) como

$$P_D = 1 - \frac{P_I}{\tau_{PU}}, \quad (4.11)$$

e recorrendo a (4.3), o limiar de decisão  $\gamma$  é dado por

$$\gamma = \mathcal{Q}^{-1}\left(1 - \frac{P_I}{\tau_{PU}}\right) \sqrt{2(N_S + 2\Lambda)} + N_S + \Lambda. \quad (4.12)$$

Este critério irá garantir uma determinada protecção aos utilizadores primários. Por outro lado, a parametrização do limiar de decisão não tem em consideração a probabilidade

de falso alarme. Deste modo, poderá diminuir o desempenho dos utilizadores secundários. Este critério é adoptado em [GS07].

### 2) Critério de parametrização $C_2$

O segundo critério a ser analisado parametriza o limiar de decisão ( $\gamma$ ) e o débito global da rede ( $S$ ) com os valores que maximizam o produto entre a probabilidade de acesso dos utilizadores secundários e a probabilidade dos utilizadores secundários não interferirem com os utilizadores primários. O critério pode ser apresentado como

$$\begin{aligned} \text{Descobrir:} \quad & \gamma^* \\ \text{Maximizar:} \quad & C_2 = (1 - P_I)\tau_{SU} \\ \text{Condição:} \quad & N_S \geq 2WT_S^{SU}, \end{aligned} \tag{4.13}$$

onde  $\gamma^*$  é o limiar de decisão óptimo. A condição  $N_S \geq 2WT_S^{SU}$  impõe uma taxa de amostragem que satisfaça o Teorema de Nyquist ( $W$  representa a largura de banda do canal onde é executado o processo de *sensing*). Este critério pretende alcançar o melhor equilíbrio entre a interferência causada pelos utilizadores secundários e as oportunidades dos utilizadores secundários utilizarem o canal.

### 3) Critério de parametrização $C_3$

O terceiro critério tenta maximizar o desempenho do processo de *sensing* através da maximização do produto entre a probabilidade de detecção e a probabilidade do rádio cognitivo detectar correctamente que o canal se encontra livre.  $C_3$  é representado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Descobrir:} \quad & \gamma^* \\ \text{Maximizar:} \quad & C_3 = P_D(1 - P_{FA}) \\ \text{Condição:} \quad & N_S \geq 2WT_S^{SU}. \end{aligned} \tag{4.14}$$

### 4) Critério de parametrização $C_4$

O quarto critério tem em consideração o facto de que se o utilizador primário acede ao canal com probabilidade igual a  $\tau_{PU}$ , então o utilizador secundário poderá aceder no máximo com probabilidade igual a  $1 - \tau_{PU}$ . Deste modo, este critério encontra a

parametrização que iguala a probabilidade dos utilizadores secundários acederem ao canal à probabilidade máxima de acesso, dada por

$$\tau_{SU} = (1 - \tau_{PU}), \quad (4.15)$$

que pela equação (4.5) é equivalente à condição

$$(1 - \tau_{PU})P_{FA} - \tau_{PU}(1 - P_D) = 0. \quad (4.16)$$

Este critério define o limiar de decisão a partir da resolução da equação anterior (4.16), e é descrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Descobrir: } & \gamma^* \\ \text{Onde: } & C_4 = (1 - \tau_{PU})P_{FA} - \tau_{PU}(1 - P_D) \\ \text{Condição: } & N_S \geq 2WT_S^{SU}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

$C_4$  é o critério de parametrização adoptado em [LA08].

## 5) Critério de parametrização $C_5$

Finalmente, o quinto critério de parametrização relaciona a probabilidade de detecção com a probabilidade de acesso ao canal dos utilizadores secundários. O critério  $C_5$  encontra o melhor compromisso entre as duas probabilidades através da maximização do produto entre elas:

$$\begin{aligned} \text{Descobrir: } & \gamma^* \\ \text{Maximizar: } & C_5 = P_D \tau_{SU} \\ \text{Condição: } & N_S \geq 2WT_S^{SU} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Este critério é semelhante ao critério  $C_2$ . Contudo, em  $C_2$  a protecção aos utilizadores primários é conseguida através da incorporação da probabilidade de interferência, que depende da probabilidade de acesso dos utilizadores primários. Neste caso, o nível de protecção dos utilizadores primários é medido através da probabilidade de detecção, que não depende da actividade dos utilizadores primários.

### 4.2.2 Análise dos critérios de parametrização

Apresentados os critérios de parametrização do limiar de decisão, é agora analisado o seu comportamento em função das probabilidades de detecção e falso alarme.  $P_D$  e  $P_{FA}$ , definidas respectivamente em (4.3) e (4.4), estão representadas na Figura 4.6 para diferentes valores de limiar de decisão ( $\gamma$ ), e considerando o número de amostras de *sensing*  $N_S = 20$ ,  $SNR = -5dB$  e  $\tau_{PU} = 0.5$ . Na Figura 4.6 também se encontram ilustrados os valores numéricos obtidos para cada um dos critérios em função de cada limiar de decisão, previamente apresentados em (4.13), (4.14), (4.17) e (4.18). Também se encontra representado o limiar de decisão resultante da expressão (4.12) para uma probabilidade de interferência ( $P_I$ ) igual a 0.04.

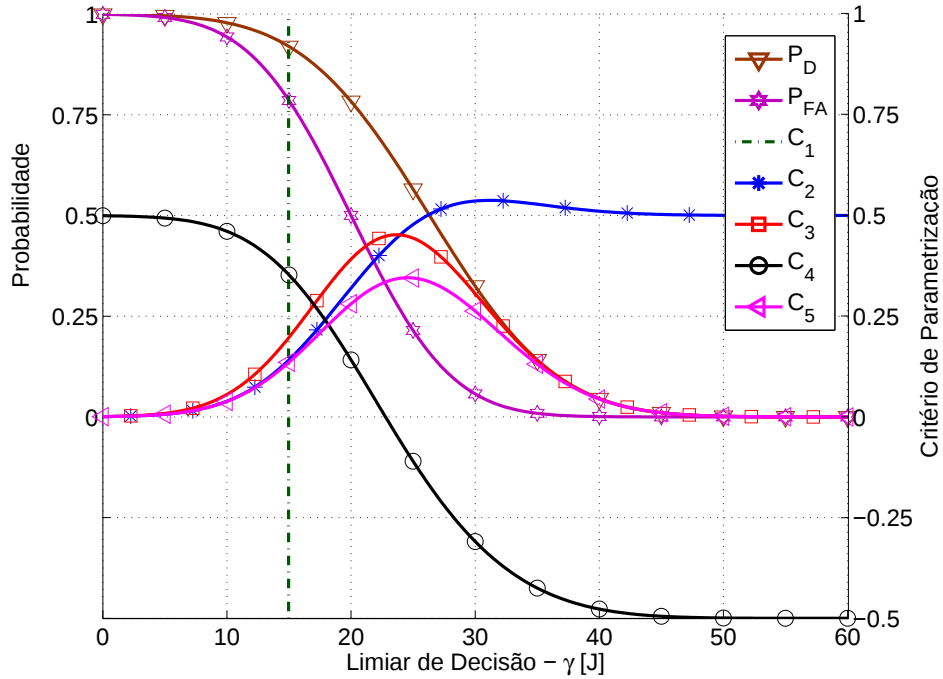


Figura 4.6:  $P_D$ ,  $P_{FA}$  e critérios de parametrização  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$  para diferentes limiares de decisão  $\gamma$  ( $SNR = -5dB$ ,  $\tau_{PU} = 0.5$  and  $N_S = 20$ ). " $C_1$ " indica o limiar de decisão resultante do critério  $C_1$  para  $P_I = 0.04$ .

A partir da figura é possível observar que devido ao baixo SNR, as curvas de  $P_D$  e de  $P_{FA}$  se encontram muito próximas, não permitindo desta forma que o detector de energia opere próximo do ponto óptimo de operação, onde  $P_D \approx 1$  e  $P_{FA} \approx 0$ . Como consequência, os limiares de decisão calculados com os critérios propostos não correspondem ao ponto

óptimo de operação, resultando em limiares de decisão entre os  $15J$  ( $C_1$ ) e os  $31J$  ( $C_2$ ).  $C_2$  é o critério de parametrização de  $\gamma$  que oferece a menor protecção aos utilizadores primários relativamente à interferência provocada pelos utilizadores secundários, pois a probabilidade de detecção apresenta um valor muito pequeno ( $P_D = 0.29$ ) para o limiar de decisão óptimo definido pelo critério  $C_2$ .

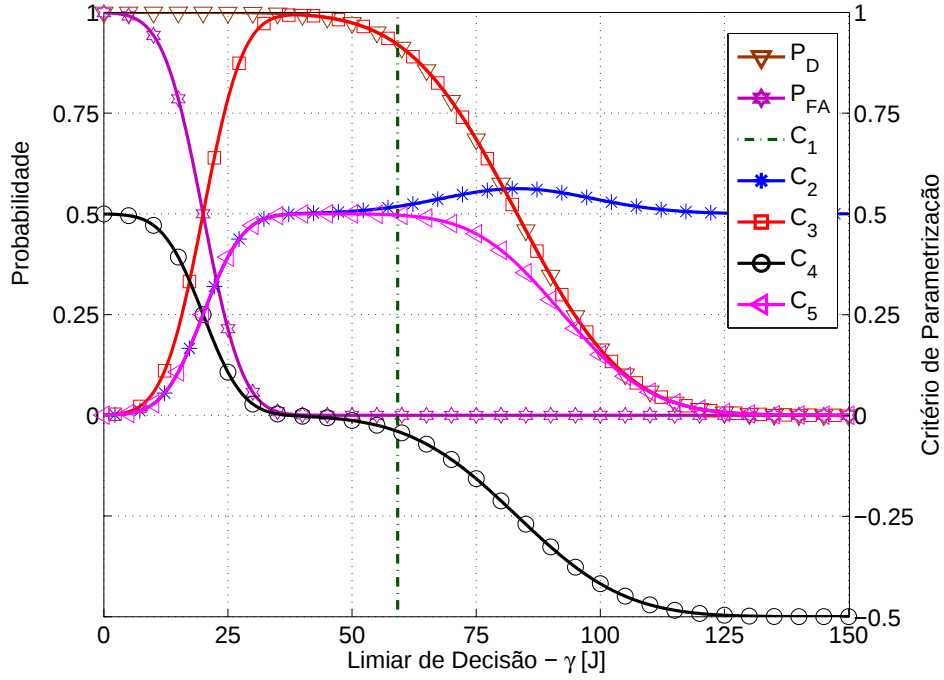


Figura 4.7:  $P_D$ ,  $P_{FA}$  e critérios de parametrização  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$  para diferentes limiares de decisão  $\gamma$  ( $SNR = 5\text{dB}$ ,  $\tau_{PU} = 0.5$  and  $N_S = 20$ ). " $C_1$ " indica o limiar de decisão resultante do critério  $C_1$  para  $P_I = 0.04$ .

A Figura 4.7 apresenta as mesmas curvas representadas na Figura 4.6, mas para um sinal com SNR superior ( $SNR = 5\text{dB}$ ). Neste caso, a zona descendente das probabilidades  $P_D$  e  $P_{FA}$  encontram-se mais distanciadas. As distâncias entre os limiares de decisão resultantes da parametrização de cada critério também são maiores. O limiar de decisão óptimo para o caso do critério  $C_4$  é o menor entre os vários critérios, sendo o limiar de decisão o valor de energia onde o valor da probabilidade  $P_{FA}$  iguala o valor da probabilidade  $1 - P_D$ . Nos critérios  $C_3$  e  $C_5$  é observado um limiar de decisão muito semelhante, a rondar os  $\gamma = 40J$ . Por fim, o critério  $C_2$  apresenta novamente o maior limiar de decisão, aproximadamente  $83J$ . Tal como no caso da Figura 4.6, o critério  $C_2$  continua a

ser o que oferece menor protecção aos utilizadores primários, pois é o que apresenta menor probabilidade de detecção,  $P_D = 0.49$ . Para os critérios  $C_3$ ,  $C_4$  e  $C_5$  observa-se uma probabilidade de detecção muito próxima de 1, garantindo maior protecção aos utilizadores primários pelo facto dos utilizadores secundários detectarem com maior precisão a presença de utilizadores primários.

Concluída a análise das diferentes parametrizações do limiar de decisão realizadas por cada critério, analisa-se na próxima secção o desempenho da rede cognitiva descrita na Secção 4.1, em função da utilização de cada um dos critérios.

### 4.3 Avaliação do desempenho dos critérios

Nesta secção são apresentados os resultados das simulações realizadas de forma a analisar o desempenho dos critérios de parametrização do limiar de decisão anteriormente descritos. O desempenho de cada critério é avaliado através do débito obtido pelos utilizadores secundários e pela interferência provocada aos utilizadores primários.

#### 4.3.1 Simulações

Foi considerada uma rede cognitiva constituída por um par de utilizadores primários (emissor/receptor) e um par de utilizadores secundários (emissor/receptor) e que segue o modo de operação descrito na Secção 4.1. No caso da parametrização através do critério  $C_1$ , foi admitida uma probabilidade de interferência igual a 0.04. Na Tabela 4.2 encontram-se apresentados os parâmetros adoptados na simulação.

Tabela 4.2: Parametrização da rede cognitiva.

|            |                |                    |             |
|------------|----------------|--------------------|-------------|
| $W$        | 10 <i>kHz</i>  | Taxa de amostragem | 50 $\mu s$  |
| $T_F^{SU}$ | 21.3 <i>ms</i> | $\Lambda$ (SNR)    | 5 <i>dB</i> |
| $\mu_s$    | 3.16 (5dB)     | $\sigma_s^2$       | 3           |

#### 4.3.2 Resultados da simulação

Os critérios de parametrização do limiar de decisão foram simulados para diferentes valores do número de amostras  $N_S$ . Desta forma, é possível observar o efeito da duração

do processo de *sensing* no desempenho de cada critério de parametrização do limiar de decisão.

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam para cada critério de parametrização a interferência provocada pelos utilizadores secundários aos utilizadores primários em função de diferentes períodos de *sensing* ( $T_S^{SU}$ ). A interferência medida traduz o período de tempo em que a comunicação entre os utilizadores primários é interrompida por um utilizador secundário. Este evento ocorre quando o processo de *sensing* dos utilizadores secundários falha a detecção de utilizadores primários. O desempenho dos critérios é analisado para três cenários diferentes :  $\tau_{PU} = 0.3$ ,  $\tau_{PU} = 0.5$  e  $\tau_{PU} = 0.7$ .

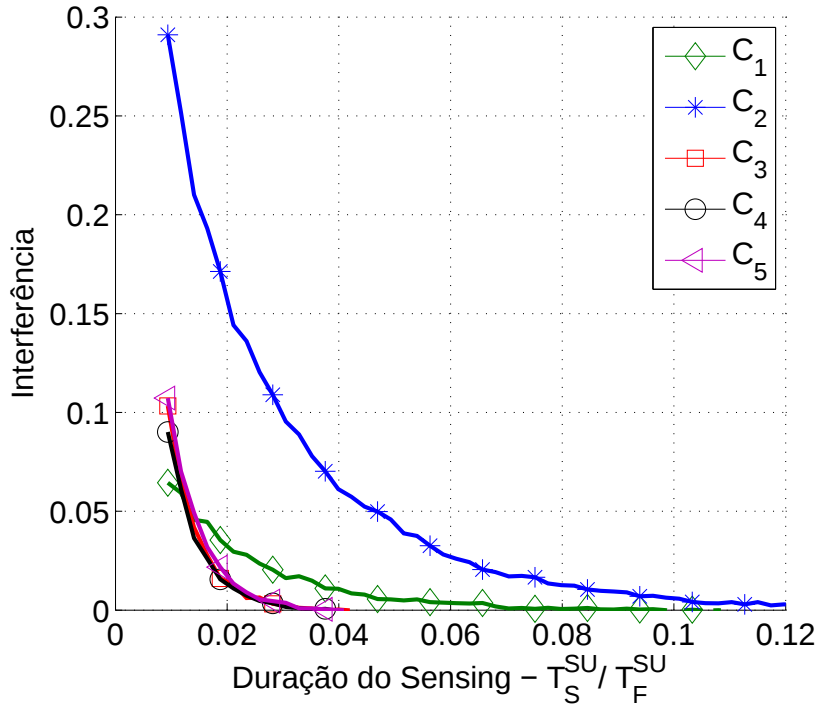


Figura 4.8: Interferência provocada aos utilizadores primários ( $SNR = 5\text{dB}$  e  $\tau_{PU} = 0.3$ ).

A partir dos resultados é possível concluir que quando o período de *sensing* é superior a  $0.05 T_S^{SU} / T_D^{SU}$ , os critérios que garantem maior protecção aos utilizadores primários contra a interferência provocada pelos utilizadores secundários, são os critérios  $C_3$  e  $C_4$ . Note-se que o critério  $C_5$  no cenário em que os utilizadores primários apresentam uma probabilidade de acesso ao canal de 0.3, à semelhança dos critérios  $C_3$  e  $C_4$ , garante elevado nível de protecção aos utilizadores primários. No entanto, à medida que a proba-

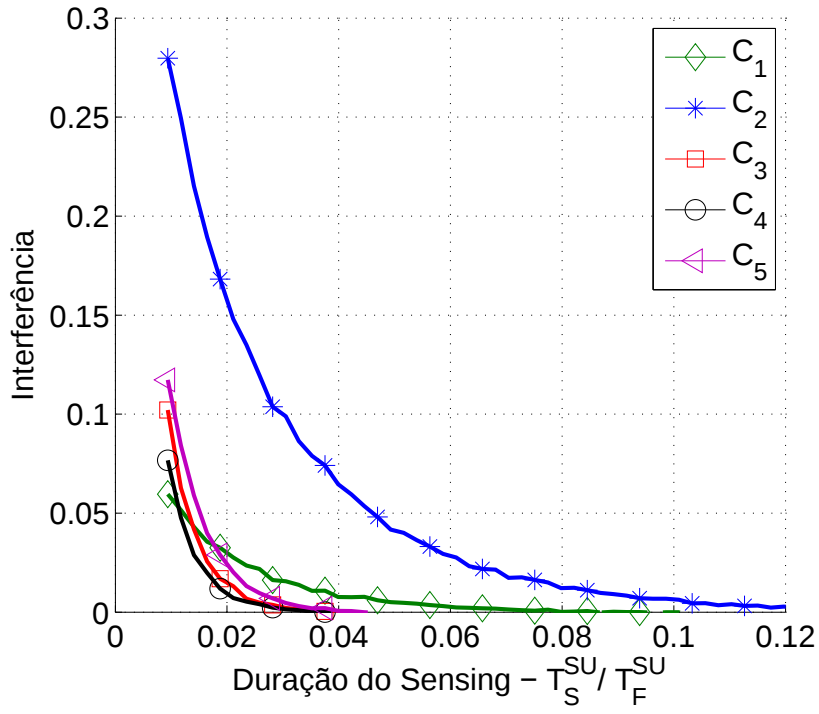


Figura 4.9: Interferência provocada aos utilizadores primários ( $SNR = 5\text{dB}$  e  $\tau_{PU} = 0.5$ ).

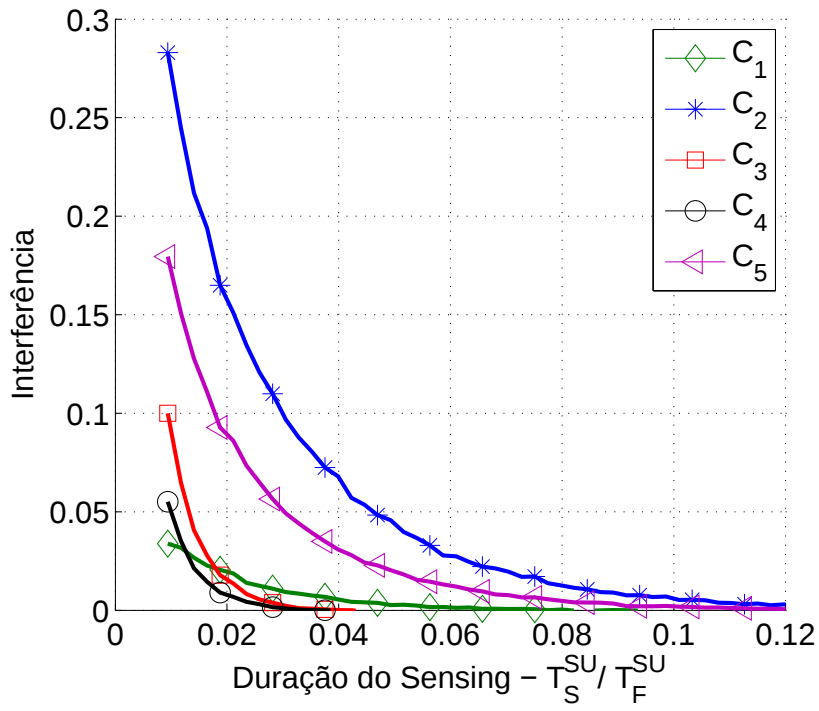


Figura 4.10: Interferência provocada aos utilizadores primários ( $SNR = 5\text{dB}$  e  $\tau_{PU} = 0.7$ ).

bilidade de acesso  $\tau_{PU}$  aumenta, a protecção garantida aos utilizadores primários diminui consideravelmente.

Em relação aos critérios  $C_2$  e  $C_5$  (neste critério quando  $\tau_{PU} > 0.3$ ) é necessário um elevado período de *sensing* para que se anule a interferência provocada aos utilizadores primários. Isto significa que os critérios  $C_3$  e  $C_4$  obtêm melhor desempenho, em termos do nível de interferência provocada aos utilizadores primários, do que os critérios  $C_2$  e  $C_5$ . Para que os critérios  $C_2$  e  $C_5$  apresentem os mesmos valores de interferência que os critérios  $C_3$  e  $C_4$  é necessário que o período de *sensing* seja superior ao dobro do período de *sensing* ( $0.1 T_S^{SU} / T_D^{SU}$ ) observado nos critérios  $C_3$  e  $C_4$ .

Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 representam-se os débitos dos utilizadores secundários resultantes da aplicação de cada critério de parametrização do limiar de energia para os mesmos cenários apresentados nos gráficos de interferência. Comparando o valor máximo do débito alcançado pelos utilizadores secundários com os critérios  $C_2$  e  $C_5$ , verifica-se que este diminui de forma significativa quando são adoptados maiores períodos de *sensing*. Desta forma, conclui-se que os critérios  $C_2$  e  $C_5$  fracassam na garantia de protecção aos utilizadores primários e na obtenção do máximo débito para os utilizadores secundários.

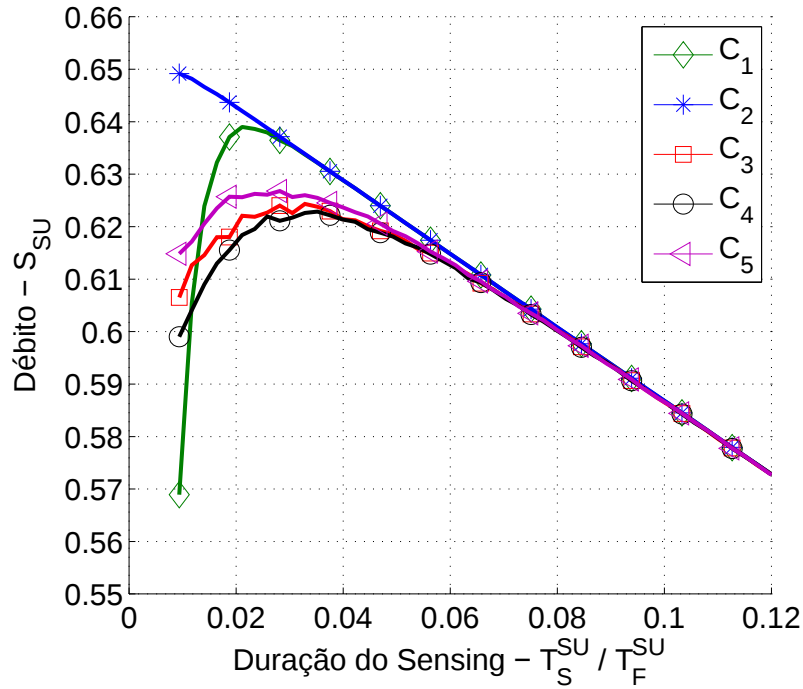


Figura 4.11: Débito dos utilizadores secundários ( $SNR = 5\text{dB}$  e  $\tau_{PU} = 0.3$ ).

O critério  $C_1$  parametriza o limiar decisão de modo a limitar probabilidade de interferência ( $P_I$ ) a 4%. Contudo, o nível interferência excede os 4% se o período de *sensing* for demasiado pequeno, como é possível observar na Figura 4.8. Verifica-se que o critério  $C_1$  consegue obter um bom desempenho em termos do débito dos utilizadores secundários. Por outro lado, caso seja definida uma condição de  $P_I$  muito pequena (menor que 1%), o débito alcançado pelos utilizadores secundários será menor do que o alcançado pelos outros critérios. Isto significa que se o critério  $C_1$  parametrizar o limiar de decisão de forma a obter as mesmas probabilidades de interferência conseguidas pelos critérios  $C_3$  e  $C_4$ , o débito dos utilizadores secundários será muito menor do que o dos outros critérios.

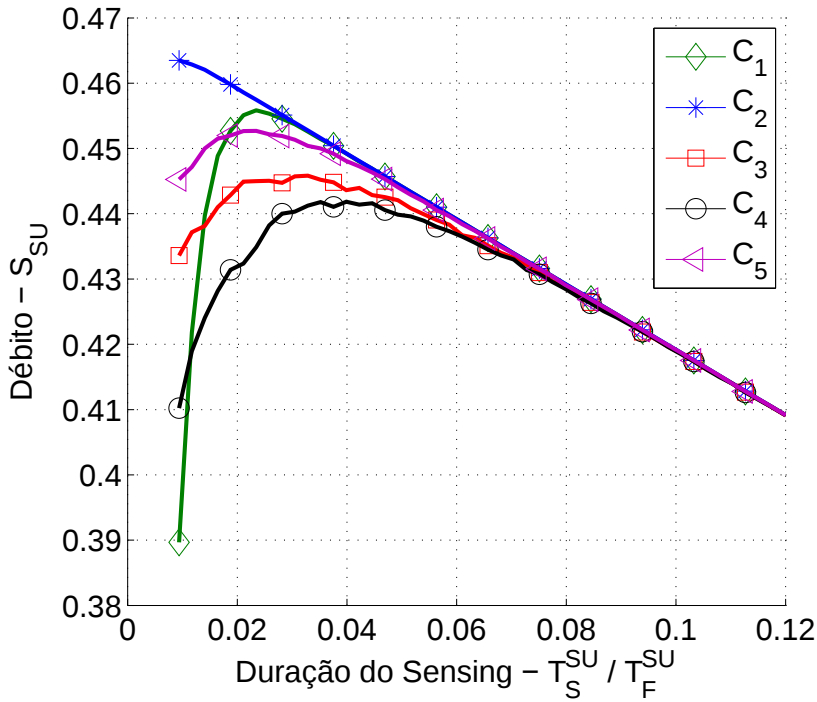


Figura 4.12: Débito dos utilizadores secundários ( $SNR = 5\text{dB}$  e  $\tau_{PU} = 0.5$ ).

De uma forma geral conclui-se que os critérios  $C_3$  e  $C_4$  podem ser considerados mais vantajosos quando é necessária uma boa protecção para os utilizadores primários contra a interferência provocada pelos utilizadores secundários. Ao comparar os critérios  $C_3$  e  $C_4$ , é possível observar que a protecção aos utilizares primários é garantida de forma similar. Os dois critérios apresentam valores muito semelhantes de interferência para os mesmos períodos  $T_S^{SU}$  de *sensing*. Para os mesmos períodos de *sensing*, o débito dos utilizadores secundários alcançado pela aplicação do critério  $C_3$  é maior que no caso da aplicação do

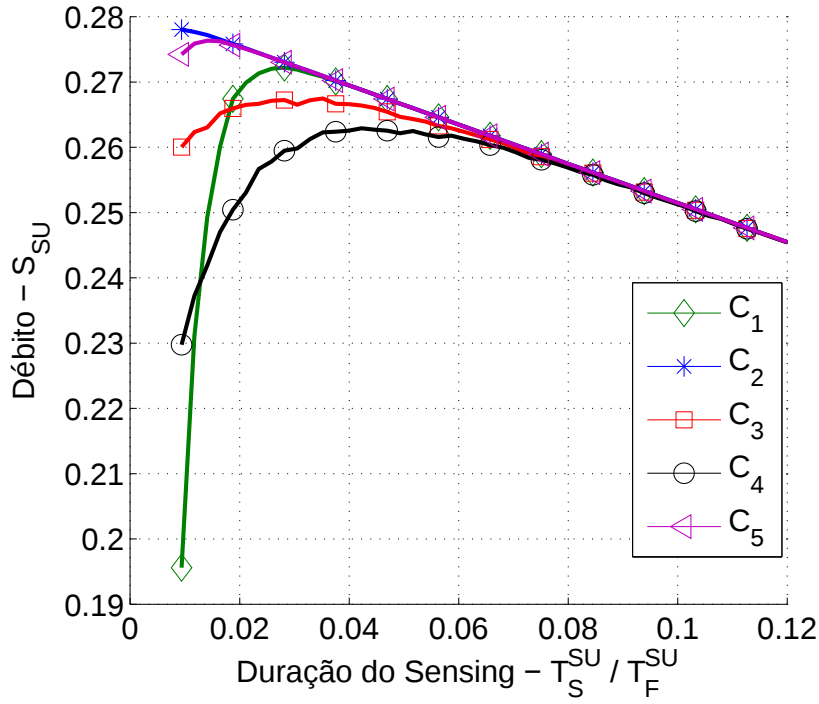


Figura 4.13: Débito dos utilizadores secundários ( $SNR = 5\text{dB}$  e  $\tau_{PU} = 0.7$ ).

critério  $C_4$ . Desta forma, pode-se considerar que o critério  $C_3$ , é o critério que apresenta o melhor compromisso entre a protecção aos utilizadores primários e o débito atingido pelos utilizadores secundários.

## 4.4 Conclusões

Neste capítulo foram comparados diferentes critérios de parametrização do limiar de decisão da técnica de *sensing* baseado em energia. Apesar dos critérios  $C_1$  e  $C_4$  serem frequentemente adoptados na literatura, a partir dos resultados de simulação foi demonstrado que o critério  $C_3$  apresenta um desempenho muito semelhante em termos da protecção garantida aos utilizadores primários contra a interferência provocada pelos utilizadores secundários. Em termos dos débitos atingidos pelos utilizadores secundários, o critério  $C_3$  apresenta melhor desempenho que o critério  $C_4$ .

Como nota final, se o sistema de comunicação adoptado pelos utilizadores primários permitir um nível de interferência mais elevado, os critérios  $C_2$  e  $C_5$  podem ser os mais indicados a utilizar pelos rádios cognitivos, pois estes critérios apresentam melhor desem-

penho em termos do débito dos utilizadores secundários.

A partir dos resultados apresentados neste capítulo, é possível obter uma melhor compreensão acerca das diferentes parametrizações do limiar de energia adoptadas pelos rádios cognitivos, mais propriamente em cenários em que os rádios cognitivos operem consecutivamente entre o processo de *sensing* e a transmissão de dados. Estes resultados permitem avaliar a melhor parametrização do limiar de energia, em função do nível de interferência permitido pela rede primária e do débito pretendido para os utilizadores secundários.

## Capítulo 5

# Protocolo MAC Distribuído

### 5.1 Introdução

Nas redes de rádio cognitivo, o processo de *sensing* realizado no espectro licenciado é um dos pontos mais importantes no desempenho da rede. Vários sistemas de *sensing* têm sido estudados de forma a maximizar a eficiência da rede secundária. Neste capítulo é proposto um protocolo MAC baseado em contenção, que explora a parametrização das contenções dos utilizadores secundários de modo a diminuir a interferência provocada aos utilizadores primários e aumentar a eficiência da rede secundária. Partindo de uma rede constituída por vários utilizadores secundários, em que as filas de transmissão de cada utilizador secundário se encontram saturadas (significando que os utilizadores secundários tem sempre pelo menos uma trama para transmitir), e por um par (emissor/receptor) de utilizadores primários, é proposto um método para estimar a probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores primários. Deste modo, o controlo do acesso ao meio dos utilizadores secundários poderá ser regulado em função do acesso dos primários com o objectivo de limitar o nível de interferência. É demonstrado neste capítulo que cada nó secundário é capaz de estimar a probabilidade de acesso do nó primário, caso esteja informado acerca do número total de utilizadores pertencentes à rede secundária, da janela de contenção adoptada por si e pelos restantes utilizadores secundários e do número de transmissões realizadas com sucesso.

Este capítulo encontra-se dividido em três secções. Na primeira é descrito o método de estimação utilizado pelos utilizadores secundários para estimar a probabilidade de acesso

dos utilizadores primários. Na segunda secção é apresentada a validação da estimação da probabilidade de acesso dos utilizadores primários. Por fim, na última secção, é estudado um método para parametrização da contenção dos utilizadores secundários.

## 5.2 Descrição do Sistema

Neste capítulo considera-se uma rede rádio cognitiva distribuída onde os utilizadores primários e secundários coexistem na mesma área geográfica. É assumido que cada utilizador secundário se encontra equipado com um único rádio (interface *single-radio*) e acede a um canal de cada vez. O acesso ao canal é realizado por meio do mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), de modo evitar colisões durante a transmissão de dados. Este mecanismo utiliza um esquema de *sensing* que permite verificar se o meio se apresenta livre ou ocupado. De forma a simplificar a análise, é considerada uma rede single-hop que é constituída por  $n$  utilizadores secundários e um par (emissor/receptor) de utilizadores primários. Desta forma, poderão ocorrer colisões entre utilizadores secundários e entre o emissor primário e o(s) utilizador(es) secundário(s). Admite-se ao longo deste capítulo que todos os utilizadores secundários possuem sempre dados que aguardam transmissão.

Quando um utilizador secundário tem um novo pacote de dados para transmitir, este primeiramente escuta o canal durante um pré-determinado intervalo de tempo, designado por DIFS (*Distributed Interframe Space*), com o intuito de verificar se outro utilizador secundário ou primário está a utilizar o mesmo canal de comunicação. Caso o canal permaneça livre durante o período DIFS, o utilizador secundário inicia o período aleatório de contenção de forma a diminuir a probabilidade de colisão de pacotes. No período de contenção o utilizador inicializa, primeiramente, um contador da contenção com o número de *slots* aleatoriamente escolhido segundo uma distribuição uniforme num intervalo  $[0, C_W - 1]$ , onde  $C_W$  representa a janela de contenção. O contador da contenção é decrementado enquanto o canal se encontra livre, sendo parado quando alguma transmissão é detectada no canal. A contagem decrescente é retomada quando o canal permanece novamente livre durante um período igual ao intervalo de tempo DIFS. A transmissão só ocorre quando o contador da contenção atinge o valor zero. É considerado que os *slots* livres têm

uma duração menor que os *slots* ocupados por uma ou mais transmissões no meio. No caso de se detectar alguma actividade no canal durante o período DIFS, é inicializado o contador da contenção mas sendo decrementado somente após o canal se encontrar livre.

O procedimento descrito acima é de certa forma semelhante ao funcionamento do protocolo IEEE 802.11. Mas contrariamente ao protocolo IEEE 802.11, onde a janela de contenção é duplicada quando um pacote colide, neste esquema os utilizadores secundários utilizam sempre uma janela de contenção fixa, que é regulada no fim de cada transmissão. Nesta abordagem considera-se que apenas existe um emissor primário, que transmite de acordo com uma determinada distribuição probabilística. É considerado que o utilizador primário emissor não detecta as transmissões dos utilizadores secundários.

No cenário proposto, a probabilidade de um determinado utilizador secundário transmitir num *slot* aleatoriamente escolhido, é definida por  $\tau_{SU}$ . No mecanismo de transmissão dos utilizadores secundários é usada para todas as transmissões a mesma janela de contenção  $C_W$ . Deste modo, o sistema comporta-se como o IEEE 802.11, quando apenas um estado de *backoff* é realizado. A probabilidade  $\tau_{SU}$  é dada por [Bia00]:

$$\tau_{SU} = \frac{2}{1 + C_W}. \quad (5.1)$$

A partir da probabilidade  $\tau_{SU}$  é possível deduzir a probabilidade do meio estar livre de utilizadores secundários no instante de temporal da transmissão de um determinado utilizador secundário. Esta é expressada por

$$P_{Idle_{SU}} = (1 - \tau_{SU})^{n-1}. \quad (5.2)$$

Para que a transmissão de um determinado utilizador secundário tenha sucesso é necessário que:

- Não exista colisão com outros utilizadores secundários ou com os utilizadores primários;
- Não ocorra nenhum erro a nível físico.

Desta forma, a probabilidade da transmissão com sucesso por parte de um determinado

utilizador secundário é representada por:

$$P_{SU} = (1 - P_C)(1 - P_e), \quad (5.3)$$

onde  $P_C$  representa a probabilidade de haver colisão com outros utilizadores secundários ou com utilizadores primários, no intervalo temporal de transmissão. A probabilidade  $P_e$  corresponde à probabilidade de ocorrer erro a nível físico (falhando a descodificação da informação do lado do receptor). A probabilidade do utilizador secundário colidir com outros utilizadores secundários ou com utilizadores primários no instante de transmissão de dados é dada por

$$P_C = 1 - (1 - \tau_{PU})(1 - \tau_{SU})^{n-1}. \quad (5.4)$$

Substituindo na expressão (5.3) a probabilidade  $P_C$  representada em (5.4), a probabilidade dos utilizadores primários acederem ao meio ( $\tau_{PU}$ ) é representada da seguinte forma

$$\tau_{PU} = 1 - \frac{P_{SU}}{(1 - \tau_{SU})^{n-1}(1 - P_e)}. \quad (5.5)$$

Admite-se que cada utilizador secundário consegue recolher a partir da sub-camada MAC a seguinte informação:

- $n_{Tx}$  - número de tentativas de transmissões que foram realizadas;
- $n_{Tx_S}$  - número de tentativas de transmissões que foram realizadas com sucesso.

Além disso, os utilizadores secundários são capazes de observar durante o período de contenção o número de *slots* livres ( $S_I$ ) e o número de *slots* ocupados ( $S_B$ ).

É possível utilizar os dados recolhidos pelos nós secundários para calcular de forma aproximada a probabilidade de um determinado utilizador secundário transmitir sem que a sua transmissão colida com a de outros utilizadores (secundários e primários) presentes no meio. A probabilidade de sucesso na transmissão de um dado utilizador secundário é dada por

$$P_{SU} \approx \hat{P}_{SU} = \frac{n_{Tx_S}}{n_{Tx}}. \quad (5.6)$$

Recorrendo às expressões (5.1), (5.5) e (5.6) conclui-se que a probabilidade  $\tau_{PU}$ , ou seja a probabilidade dos utilizadores primários acederem ao meio, é expressa da seguinte

forma

$$\tau_{PU}(C_W, n, P_e) = 1 - \frac{n_{TxS}}{n_{Tx}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{2}{1+C_W}\right)\right)^{n-1} \cdot (1 - P_e)}. \quad (5.7)$$

Por outro lado, a probabilidade dos utilizadores acederem ao meio também pode ser obtida através da expressão da probabilidade de colisão. Logo recorrendo à expressão (5.4) observa-se que probabilidade  $\tau_{PU}$  é também dada por

$$\tau_{PU} = 1 - \frac{1 - \hat{P}_C}{(1 - \tau_{SU})^{n-1}}. \quad (5.8)$$

Analisando a probabilidade  $P_C$ , conclui-se que esta representa a probabilidade de um determinado utilizador secundário detectar um *slot* ocupado no instante de transmissão. Desta forma, a probabilidade de colisão pode ser aproximada pela probabilidade de ocorrer um *slot* ocupado. Recorrendo à informação que os utilizadores secundários possuem, a probabilidade  $P_C$  é dada por

$$P_C \approx \hat{P}_C = \frac{S_B}{S_I + S_B}. \quad (5.9)$$

Por fim, igualando as expressões (5.7) e (5.8) é possível isolar a probabilidade  $P_e$  e concluir que a probabilidade de ocorrer um erro a nível físico é dada por

$$P_e = 1 - \frac{n_{TxS} \cdot (S_B + S_I)}{n_{Tx} \cdot S_I}. \quad (5.10)$$

Logo, verifica-se que para estimar a probabilidade dos utilizadores primários acederem ao meio é necessário que cada utilizador secundário saiba o número total de utilizadores secundários existentes na rede cognitiva ( $n$ ) e qual a janela de contenção adoptada pelos utilizadores secundários ( $C_W$ ). Como já referido anteriormente, assume-se que todos os utilizadores adoptam a mesma janela de contenção  $C_W$ . Uma das soluções para resolver este problema é recorrer a uma rede descentralizada com um nó coordenador. Este nó coordenador pode aceitar o registo de todos os utilizadores secundários, e por sua vez informar estes em relação à janela de contenção a ser utilizada com base na probabilidade de acesso dos utilizadores primários apresentada em (5.7).

A partir dos dados recolhidos pelos utilizadores primários é possível também estimar a probabilidade de ocorrer um erro no nível físico.

### 5.3 Validação

Nesta secção validam-se as probabilidades referidas anteriormente através de resultados de simulação obtidos com o simulador ns-2 [Inf07]. O protocolo MAC dos utilizadores da rede cognitiva foi implementado através da modificação do protocolo IEEE 802.11 disponibilizado no simulador.

De forma a validar a expressão (5.1), que traduz a probabilidade de acesso ao canal de cada utilizador secundário, foi simulado o comportamento da rede cognitiva no simulador ns-2. Na validação desta probabilidade foi considerada uma rede cognitiva sem utilizadores primários e com dez utilizadores secundários ( $n = 10$ ). Os parâmetros considerados na simulação encontram-se definidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parametrização da rede cognitiva sem utilizadores primários.

|                               |            |                       |            |
|-------------------------------|------------|-----------------------|------------|
| DIFS                          | 50 $\mu s$ | Taxa de Transferência | 11 Mbps    |
| Duração do <i>Slot</i>        | 20 $\mu s$ | Atraso de Propagação  | 2 $\mu s$  |
| Janela de Contenção ( $C_W$ ) | 114.6      | Tamanho da Trama      | 1500 bytes |

Como descrito na secção anterior, os utilizadores secundários recorrem ao mecanismo de contenção de forma a acederem ao meio, e todos os utilizadores adoptam a mesma janela de contenção, a qual permanece constante ao longo de todo o período de simulação. A janela de contenção adoptada é escolhida com base na expressão (5.11) proposta em [Bia00], que descreve a janela de contenção para a qual a rede secundária apresenta a melhor eficiência e justiça no acesso ao canal quando não existe actividade de primários, isto é:

$$C_{W_{opt}} \approx n\sqrt{2T_C^*}. \quad (5.11)$$

Os parâmetros  $n$  e  $T_C^*$  em (5.11) representam respectivamente o número de nós secundários presentes na rede e a duração de uma colisão (tendo sido aproximado neste trabalho pela duração de uma trama). Admite-se que os utilizadores secundários são capazes de observar o meio e identificar *slots* livres ( $S_I$ ) e ocupados ( $S_B$ ) durante o período de contenção. A partir dessa informação os utilizadores ao fim de cada período de contenção calculam a probabilidade do meio se encontrar livre ( $P_{Idle}$ ). Na Figura 5.1 encontra-se representada a probabilidade  $P_{Idle}$  teórica e a estimada pelos utilizadores secundários ao longo do período

de simulação da rede cognitiva. O valor teórico da probabilidade é resultante da expressão (5.2) em que a probabilidade de acesso  $\tau_{SU}$  é dada pela expressão (5.1).

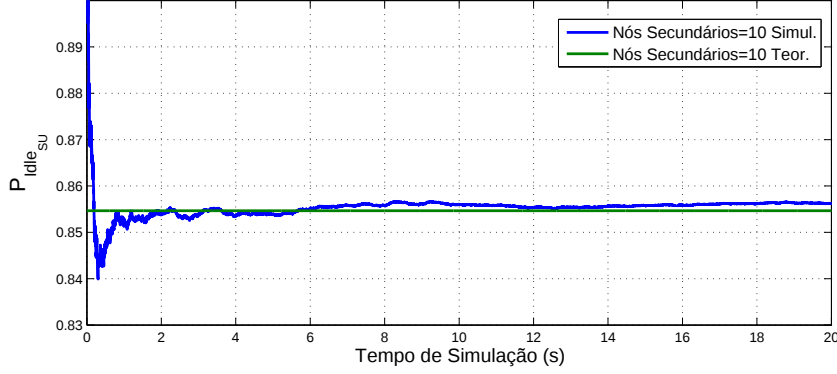


Figura 5.1: Validação da probabilidade  $P_{Idle_{SU}}$ .

Como é possível observar, após os primeiros três segundos de simulação a probabilidade  $P_{Idle}$  permanece aproximadamente constante e apresenta um valor muito próximo do valor teórico, concluindo-se deste modo que é validada com sucesso. Logo, pode-se afirmar que a dedução da expressão da probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores secundários também se encontra validada. A probabilidade  $P_{Idle}$  na parte inicial da simulação apresenta elevada oscilação, sendo justificada pelo facto de terem ocorrido até esse instante poucos eventos de meio livre e ocupado durante todos o períodos de contenção observados pelos utilizadores secundários. Desta forma compreende-se que seja necessário pelo menos um período de três segundos de recolha de amostras para que a estimação da probabilidade  $P_{Idle}$  baseada nessas amostras seja considerada válida.

Realizada a validação da probabilidade dos utilizadores secundários acederem ao meio, segue-se a validação da probabilidade de acesso dos utilizadores primários. Neste caso, é considerada a rede descrita na secção anterior, ou seja uma rede constituída por um par (emissor/receptor) de utilizadores primários e  $n$  utilizadores secundários (neste caso serão considerados dez utilizadores secundários).

De modo a obter um padrão de actividade do emissor primário de acordo com uma determinada probabilidade  $\tau_{PU}$ , é assumindo que as tramas do emissor primário têm uma duração fixa de  $T_{PU}$  e que na sub-camada MAC antes do envio de uma determinada trama é agendado o envio da trama seguinte. Ou seja, considerando por exemplo o envio

sequencial de duas tramas  $F_1$  e  $F_2$ , antes do envio da trama  $F_1$  o emissor primário define qual o intervalo de tempo que vai esperar até enviar a trama  $F_2$ . Após definido esse intervalo de tempo é enviada a trama  $F_1$  e este processo é executado consecutivamente durante todo o período de simulação. O intervalo de tempo entre envio de tramas é definido a partir de uma distribuição exponencial com média  $1/\lambda$ . Recorrendo à expressão (5.12) é possível definir o parâmetro  $\lambda$  da distribuição exponencial de modo obter uma determinada probabilidade de acesso  $\tau_{PU}$ ,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{T_{PU}}{\tau_{PU}}. \quad (5.12)$$

Parametrizado o padrão de actividade do emissor primário espera-se que os utilizadores secundários, recorrendo à informação de sucesso de transmissões ( $n_{Tx}$  e  $n_{Tx_S}$ ), à janela de contenção e ao número de nós secundários existente na rede, sejam capazes de estimar a probabilidade de acesso dos utilizadores primários, a partir da expressão (5.7). A estimação é realizada após cada período de contenção de cada utilizador secundário. Encontram-se apresentados na Tabela 5.2 os parâmetros de simulação. Foi considerado durante a simulação que o canal é perfeito, ou seja, não ocorrem erros no canal ( $P_e = 0$ ).

Tabela 5.2: Parametrização da rede cognitiva sem utilizadores primários.

|                              |            |                       |           |
|------------------------------|------------|-----------------------|-----------|
| DIFS (Utilizador Secundário) | 50 $\mu s$ | Taxa de Transferência | 11 Mbps   |
| $C_W$ do Secundário          | 114.6      | Atraso de Propagação  | 2 $\mu s$ |
| Duração do <i>Slot</i>       | 20 $\mu s$ | Tamanho da Trama      | 1500 byte |

A Figura 5.2 ilustra os resultados de simulação obtidos para diferentes actividades de primário( $\tau_{PU}$ ). Cada ponto da Figura 5.2 representa a média das probabilidades  $\tau_{PU}$  estimadas pelos dez utilizadores secundários em função do período de simulação da rede cognitiva. Associado à estimação média da probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores primários encontra-se também representado o desvio padrão das dez estimativas efectuadas pelos dez utilizadores secundários.

Como se observa, no início da simulação os valores apresentam-se pouco constantes, o que é justificado pelo pequeno número de amostras recolhidas pelos utilizadores secundários, resultando numa estimação ainda pouco precisa da probabilidade de acesso dos

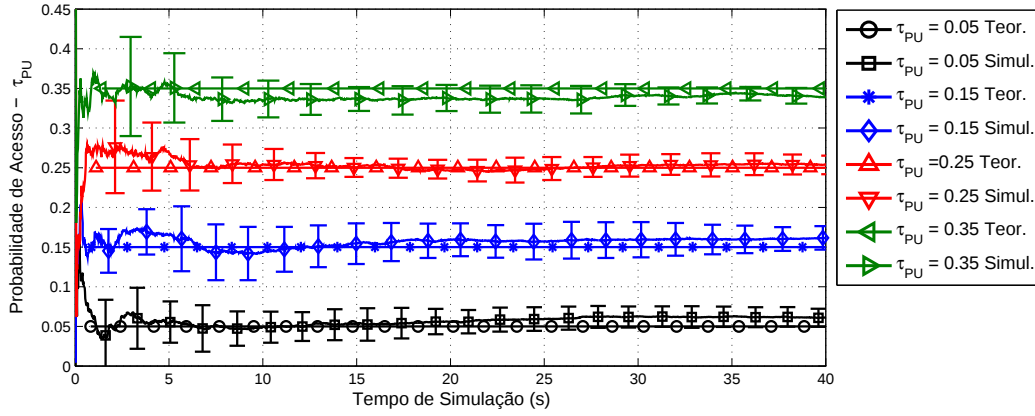


Figura 5.2: Estimação da probabilidade de acesso dos primários ( $\tau_{PU}$ ).

utilizadores primários. Após alguns segundos de observação do meio durante o período de contenção, os utilizadores estimam um valor de  $\tau_{PU}$  aproximadamente constante e próximo do valor real da probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores primários. Desta forma, conclui-se que se um determinado utilizador secundário tem conhecimento de quantos utilizadores secundários constituem a rede secundária e, garantindo-se que todos os nós da rede secundária adoptam a mesma janela de contenção, é possível estimar a probabilidade de ocupação do meio por parte da rede primária.

## 5.4 Parametrização da Contenção

Nesta última secção é proposto um modelo que tem como objectivo parametrizar as contenções dos utilizadores secundários em função da probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores primários e em função do nível de interferência admissível pelos nós primários.

Os utilizadores secundários e primários que formam a rede cognitiva não estão continuamente a utilizar o meio, e a probabilidade dos utilizadores secundários não utilizarem o meio é definida por

$$P_{Idle_{SU}} = (1 - \tau_{SU})^n, \quad (5.13)$$

onde  $\tau_{SU}$  corresponde à probabilidade de um determinado utilizador secundário aceder ao meio e,  $n$  corresponde o número total de utilizadores secundários. Desta forma, considerando que os utilizadores primários têm probabilidade  $\tau_{PU}$  de acederem ao meio, verifica-se que a probabilidade do meio estar completamente livre é representada pela seguinte ex-

pressão:

$$P_{Idle} = (1 - \tau_{SU})^n \cdot (1 - \tau_{PU}). \quad (5.14)$$

Um utilizador secundário ao aceder ao meio obtém sucesso na transmissão de dados caso nesse instante temporal não acessem ao meio outros utilizadores secundários ou utilizadores primários. Como tal, a probabilidade de um determinado utilizador secundário transmitir com sucesso é dada por

$$P_{S_{SU}} = n\tau_{SU}(1 - \tau_{SU})^{n-1} \cdot (1 - \tau_{PU})^{T_{SU}}, \quad (5.15)$$

onde  $T_{SU}$  representa o período em *slots* no qual o utilizador secundário utiliza o meio para transmissão de dados.

Por outro lado, os utilizadores primários transmitem com sucesso caso nenhum utilizador secundário acesse no mesmo instante temporal da transmissão dos utilizadores primários, e a probabilidade que traduz essa condição é representada por

$$P_{S_{PU}} = \tau_{PU}(1 - \tau_{SU})^{n \cdot T_{PU}}, \quad (5.16)$$

onde  $T_{PU}$  equivale ao período total da trama de dados dos utilizadores primários (representado em unidades de *slot*). Note-se que são excluídas as colisões entre transmissões de diferentes utilizadores primários, pois como referido inicialmente neste capítulo é apenas considerado a existência de um utilizador primário emissor.

Recorrendo as expressões (5.14), (5.15) e (5.16) conclui-se que a probabilidade de ocorrerem colisões na rede cognitiva é dada por

$$P_C = 1 - P_{Idle} - P_{S_{SU}} - P_{S_{PU}}. \quad (5.17)$$

A partir da representação destas probabilidades é agora possível deduzir o débito global da rede cognitiva. O débito global da rede cognitiva resulta da soma do débito alcançado pelos utilizadores secundários e do débito alcançado pelos utilizadores primários. O débito dos utilizadores secundários ( $S_{SU}$ ) é definido pela taxa de transferência de dados

com sucesso por unidade de tempo, sendo representado por

$$S_{SU} = \frac{n \cdot \tau_{SU} \cdot T_{SU} \cdot (1 - \tau_{SU})^{n-1} \cdot (1 - \tau_{PU})^{T_{SU}}}{P_{Idle} \cdot T_I + P_{SU} \cdot T_{SU} + P_{PU} \cdot T_{PU} + P_C \cdot T_C}. \quad (5.18)$$

Os parâmetros  $T_I$  e  $T_C$  são definidos respectivamente pela duração de um *slot* e pela duração do período de colisão (assume-se que  $T_C$  equivale ao período de uma trama dos utilizadores secundários). Quanto ao débito obtido pelos utilizadores primários ( $S_{PU}$ ) é definido através da perda de transmissões que colidem com os utilizadores secundários, ou seja,

$$S_{PU} = \tau_{PU} \cdot (1 - \tau_{SU})^{nT_{SU}}. \quad (5.19)$$

Deste modo, o débito global da rede cognitiva alcançado pelos utilizadores primários e secundários é definido pela seguinte expressão:

$$S = S_{SU} + S_{PU}. \quad (5.20)$$

Recorrendo ao software MATLAB são representados nas Figuras 5.3 e 5.4 o plano representativo do débito  $S_{SU}$  e o plano representativo do débito  $S_{PU}$  em função de diferentes valores de  $\tau_{PU}$  (probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores primários) e  $C_W$  (janela de contenção dos utilizadores secundários). Os parâmetros considerados encontram-se representados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Parâmetros considerados na geração de resultados.

|          |                  |          |                  |
|----------|------------------|----------|------------------|
| $n$      | 10               | $T_{SU}$ | 65.4 <i>Slot</i> |
| $T_{PU}$ | 65.4 <i>Slot</i> | $T_I$    | 1 <i>Slot</i>    |

A partir da Figura 5.3 observa-se que para uma probabilidade de acesso ao meio nula por parte dos utilizadores primários o débito máximo alcançado pelos utilizadores secundário resulta da aplicação de uma janela de contenção de aproximadamente 114. Note-se que este valor corresponde ao valor de janela resultante da expressão proposta em [Bia00] e apresentada na secção anterior, sendo esta a janela de contenção óptima para máxima eficiência da rede cognitiva sem a presença de utilizadores primários. Com o aumento da probabilidade de acesso dos utilizadores primários o débito alcançado pelos

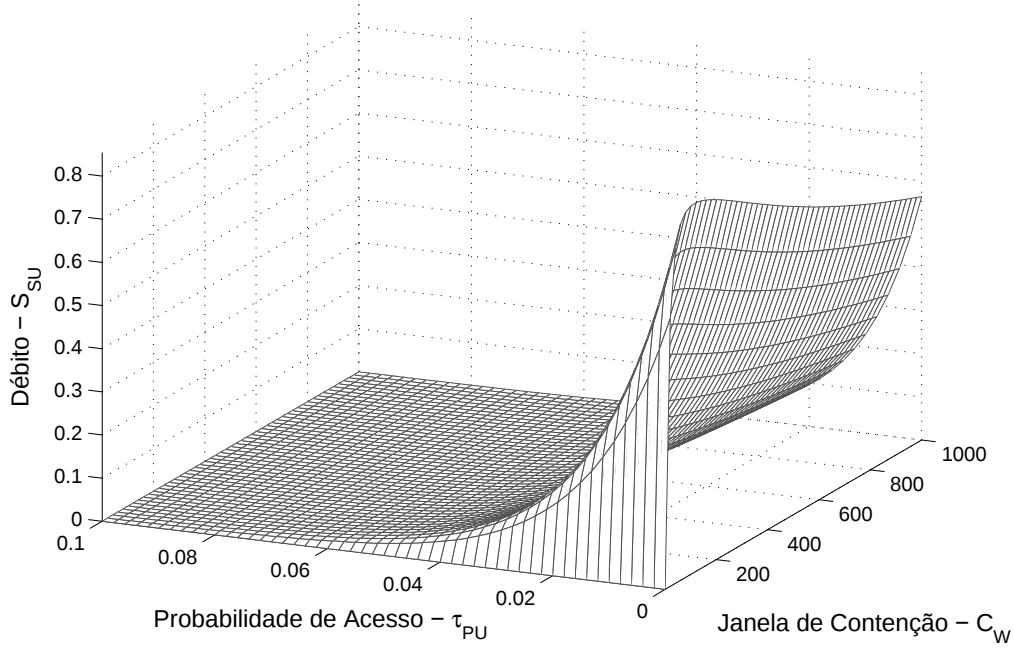


Figura 5.3: Débito alcançado pelos utilizadores secundários em função de  $C_W$  e  $\tau_{PU}$ .

utilizadores secundários diminui consideravelmente, observando-se que o débito máximo resulta da aplicação de janelas de contenção ligeiramente menores. Isto significa que quanto maior a probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores primários menor é a janela de contenção que maximiza o débito dos utilizadores secundários. Os utilizadores secundários ao conterem menos acedem mais vezes ao meio, resultando assim numa maior interferência provocada aos utilizadores primários. Conclui-se que a parametrização da contenção dos utilizadores secundários não deverá ser realizada somente em função do seu débito, pois não realiza da melhor forma o compromisso entre a interferência provocada aos utilizadores primários e o débito alcançado pelos utilizadores secundários.

Na Figura 5.4 observa-se que o débito alcançado pelos utilizadores primários aumenta em função do aumento da sua probabilidade de acesso e em função do aumento da janela de contenção adoptada pelos utilizadores secundários. Deste modo, com uma maior contenção dos utilizadores secundários, a probabilidade dos utilizadores secundários acederem é menor e por consequência provocam uma menor interferência aos utilizadores primários.

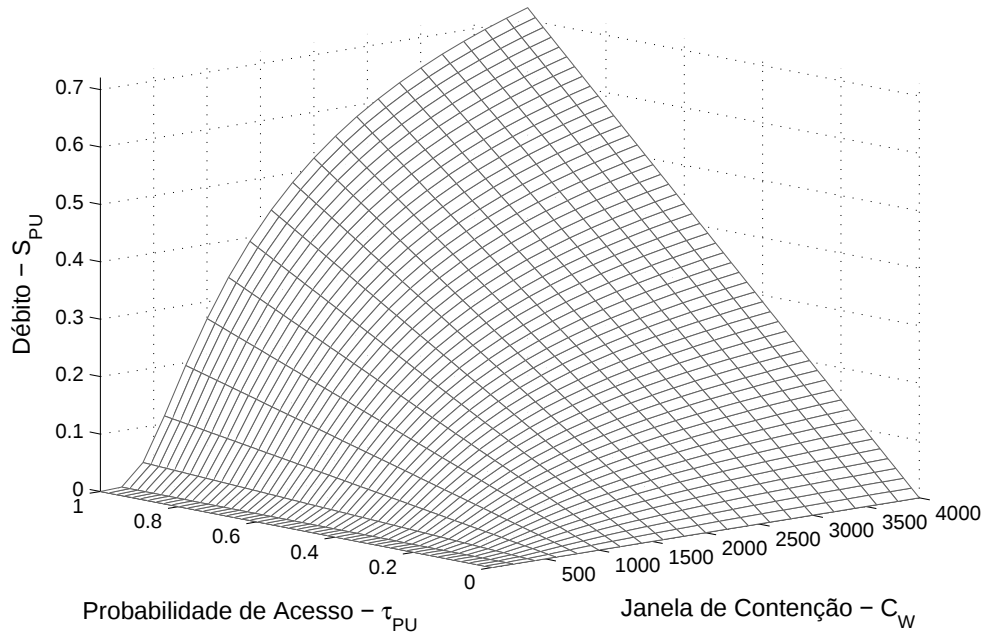


Figura 5.4: Débito alcançado pelos utilizadores primários em função de  $C_W$  e  $\tau_{PU}$ .

Considerando um valor máximo admissível para a probabilidade de colisão  $P_C$ , encontra-se representado na Figura 5.5 a janela de contenção óptima em função da probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores primários. Para tal recorreu-se à expressão (5.17) e impôs-se a probabilidade de colisão máxima permitida na rede cognitiva.

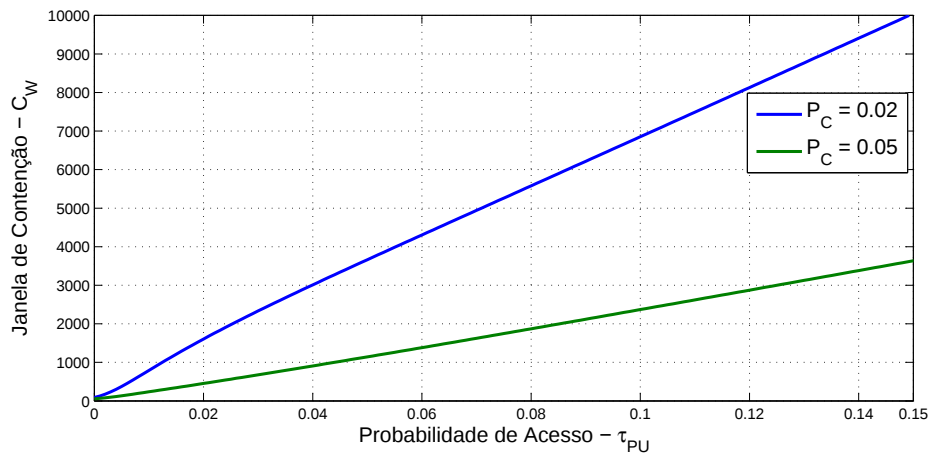


Figura 5.5: Janela de contenção em função de diferentes probabilidade de acesso dos utilizadores primários.

Comparando os dois casos apresentados na Figura 5.5, verifica-se que para os mesmos valores de  $\tau_{PU}$  a janela de contenção óptima adoptada pelos utilizadores secundários é menor para o caso da probabilidade  $P_C$  igual a 0.05. Isto significa que quanto menor for o valor de colisões tolerado na rede cognitiva, maior será a janela de contenção que impõe a condição de limitação de  $P_C$  a ser adoptada pelos utilizadores secundários.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 encontram-se representados respectivamente o débito alcançado pelos utilizadores secundários e o débito alcançado pelos utilizadores primários em função da probabilidade de acesso ao meio do utilizador primário. Foram consideradas as janelas de contenção óptimas representadas na Figura 5.5 para os diferentes valores de  $\tau_{PU}$ .

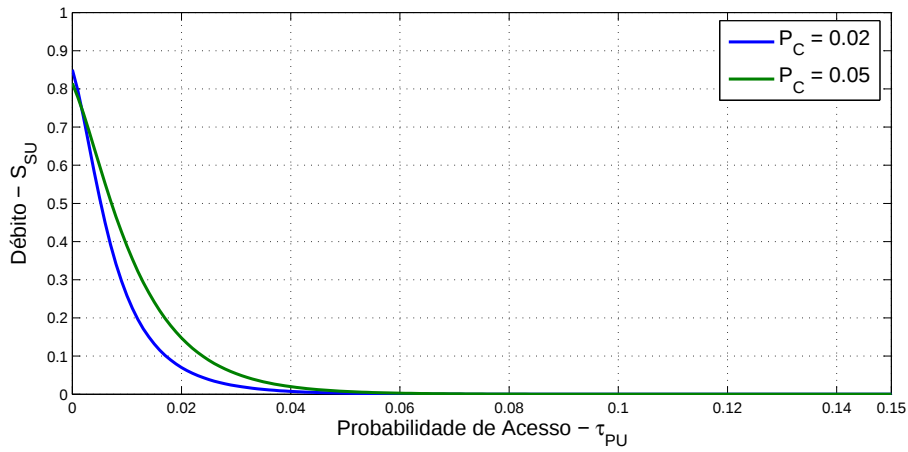


Figura 5.6: Débito  $S_{SU}$  em função de diferentes probabilidade de acesso dos utilizadores primários.

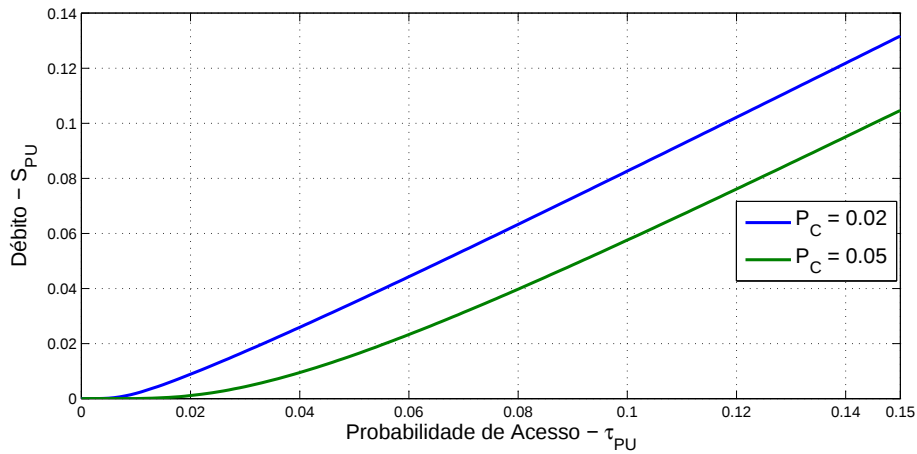


Figura 5.7: Débito  $S_{PU}$  em função de diferentes probabilidade de acesso dos utilizadores primários.

Observando a Figura 5.6, verifica-se um débito maior para  $P_C = 0.05$ . Neste caso, a janela de contenção é menor do que no caso da probabilidade de colisão igual a 0.02. Deste modo, no cenário em que a rede admite um probabilidade de colisão igual 0.05, os períodos de contenção dos utilizadores secundários são menores do que no cenário onde é imposta uma probabilidade de colisão igual a 0.02. O menor período de contenção permite que os utilizadores secundários obtenham maior probabilidade de acesso ao meio, e com isso maior débito.

Por outro lado, a partir da Figura 5.7, observa-se que para os mesmos valores de  $\tau_{PU}$  o maior débito alcançado pelos utilizadores primários corresponde ao caso em que o limite máximo da probabilidade de colisão da rede cognitiva é igual a 0.02. Verifica-se que quanto maior o valor admitido de colisões na rede cognitiva menor será a janela de contenção adoptada pelos utilizadores secundários. Por sua vez os utilizadores secundários poderão aceder mais vezes ao meio e assim alcançarão um débito maior, ao contrário do débito alcançado pelos utilizadores primários que será menor devido às colisões provocadas pelos utilizadores secundários.

## 5.5 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado um método a partir do qual os utilizadores secundários podem estimar a probabilidade de acesso dos utilizadores primários numa rede cognitiva onde é adoptado o mecanismo de acesso baseado em contenção. Verificou-se que para a realização do método apresentado é necessário que os utilizadores secundários possuam informação acerca de determinadas características da rede. Esta informação inclui o número total de utilizadores pertencentes à rede secundária, a janela de contenção adoptada por si e pelos restantes utilizadores secundários e o número de transmissões realizadas com sucesso.

Na última secção deste capítulo foi apresentado um modelo no qual se analisaram os efeitos que diferentes parametrizações das contenções da rede secundária apresentam sobre os débitos alcançados pelos utilizadores primários e secundários.



## Capítulo 6

# Conclusões

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

### 6.1 Considerações Finais

Nesta dissertação foi abordado um domínio emergente em termos de investigação científica nos tempos actuais, as redes de rádio cognitivo. Foi sobretudo focada a análise dos mecanismo de acesso ao meio destinados a redes de rádio cognitivo.

Numa primeira abordagem, foi realizado um estudo da técnica de *sensing* baseado no detector de energia realizada por um determinado utilizador secundário. A partir do estudo concluiu-se que é possível representar teoricamente as probabilidades de detecção e de falso alarme para uma conjunto diversificado de condições que a rede primária apresente. Mais especificamente, foram estudados dois cenários. No primeiro cenário considerou-se que a rede primária não apresenta uma actividade constante ao longo do período de *sensing*. No segundo cenário pretendeu-se analisar o desempenho da técnica de *sensing* baseada em energia quando os múltiplos utilizadores primários podem transmitir em simultâneo no mesmo instante temporal. Neste último cenário, foi considerado o desvanecimento com a distância da potência do sinal do primário recebida pelo utilizador secundário. Da análise dos dados obtidos através de simulação para os diferentes cenários considerados, concluiu-se que as probabilidades de detecção e de falso alarme são validadas com elevada precisão

através das expressões teóricas para um canal onde o ruído é AWGN.

Além do contributo da validação das expressões teóricas das probabilidades de detecção e de falso alarme, verifica-se que a comparação entre os critérios de parametrização do limiar de decisão do detector de energia também oferece um grande contributo para o estudo da técnica de *sensing*. A partir dos resultados apresentados nesta análise comparativa, foi possível obter uma melhor compreensão acerca das diferentes parametrizações do limiar de energia adoptados pelos rádios cognitivos, mais propriamente em cenários em que os rádios cognitivos operem consecutivamente entre o processo de *sensing* e a transmissão de dados. Concluiu-se a partir dos resultados de simulação que o critério  $C_3$  apresentou um desempenho em termos da protecção garantida aos utilizadores primários contra a interferência provocada pelos utilizadores secundários, muito semelhante aos dos critérios  $C_1$  e  $C_4$ , sendo estes últimos frequentemente adoptados pela literatura. Por outro lado, em termos dos débitos atingidos pelos utilizadores secundários, o critério  $C_3$  apresentou um desempenho melhor que o critério  $C_4$ .

Por fim, propôs-se no Capítulo 5, um protocolo MAC distribuído baseado em contenção. Conclui-se que cada nó secundário é capaz de estimar a probabilidade de acesso dos nós primários caso esteja informado acerca do número total de utilizadores pertencentes à rede secundária, da janela de contenção adoptada por toda a rede secundária e do número de transmissões realizadas com sucesso. Concluiu-se também que a parametrização da contenção dos utilizadores secundários influencia de forma directa o débito alcançado pelos utilizadores primários e secundários.

O facto de a presente dissertação ter por base uma tecnologia recente à qual está subjacente uma enorme possibilidade de inovação, consistiu numa das principais fontes de motivação existentes durante a elaboração da dissertação. Fica, no entanto, a consciência de que apenas foram abordados alguns aspectos de uma grande área de investigação, ficando em aberto alguns assuntos que poderiam ser estudados, encontrando-se os mesmos referidos na secção seguinte.

## 6.2 Trabalho Futuro

Durante o desenvolvimento do trabalho referente aos Capítulos 3 e 4, considerou-se apenas o estudo da técnica de *sensing* baseada em energia num contexto de *sensing* não cooperativo, ou seja cada utilizador secundário realiza o seu processo de *sensing* e individualmente decide sobre o estado (livre/ocupado) do meio, sem que para isso recorra a informações de outros utilizadores secundários presentes na rede cognitiva. Tendo isto em conta, seria interessante num trabalho futuro considerar uma rede de rádios cognitivos cooperativos e estudar os assuntos expostos nos Capítulos 3 e 4, de forma a analisar o impacto sobre o desempenho da técnica de *sensing* baseada em energia.

Embora seja apresentado o modelo da parametrização da contenção dos utilizadores secundários no Capítulo 5, este não se encontra validado por simulação. Deste modo, um trabalho futuro passaria pela validação das expressões dos débitos apresentados nesse modelo, e posteriormente pela validação do método de parametrização das contenções dos utilizadores secundários, em função da probabilidade de acesso ao meio dos utilizadores primários e em função do nível de interferência admissível pela rede primária.

No trabalho realizado validou-se ainda o método de estimação da probabilidade de acesso dos utilizadores primários. Quanto ao método de parametrização das contenções dos utilizadores secundários, este requer maior investigação, nomeadamente em termos de validação dos resultados teóricos apresentados.

Após a validação do método referido anteriormente será ainda interessante abordar futuramente a sugestão referida na Secção 5.2, onde se propõe recorrer a uma rede descentralizada com um nó coordenador, e onde este pode aceitar o registo de todos os utilizadores secundários. O nó coordenador por sua vez, informa cada utilizador secundário registado acerca da janela de contenção a ser utilizada, com base na probabilidade de acesso dos utilizadores primários estimada pelos utilizadores secundários.



# Bibliografia

- [ALB10] Ian F Akyildiz, Brandon F Lo, and Ravikumar Balakrishnan. Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks : A Survey. *Physical Communications*, 2010.
- [Bia00] G. Bianchi. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 18(3):535 –547, Mar. 2000.
- [C. 06] C. Guo, T. Zhang, Z. Zeng, and C. Feng. Investigation on Spectrum Sharing Technology Based on Cognitive Radio. *in Proc. IEEE Int. Conf. on Communications and Networking in China, Beijing, China*, pages 1 –5, Oct. 2006.
- [CB05] D. Cabric and R.W. Brodersen. Physical Layer Design Issues Unique to Cognitive Radio Systems. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on*, volume 2, pages 759 –763 Vol. 2, Sept. 2005.
- [CMB04] D. Cabric, S.M. Mishra, and R.W. Brodersen. Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios. In *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on*, volume 1, pages 772 – 776 Vol.1, Nov. 2004.
- [Com03] Federal Communications Commission. FCC, ET Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order. Dec. 2003.

- [CP06] Ruiliang Chen and Jung-Min Park. Ensuring Trustworthy Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks. In *Networking Technologies for Software Defined Radio Networks, 2006. SDR '06.1st IEEE Workshop on*, pages 110–119, Sept. 2006.
- [DAS07] F. F. Digham, M.-S. Alouini, and M. K. Simon. On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels. *Communications, IEEE Transactions on*, 55(1):21–24, Jan. 2007.
- [DDSDB12] A. De Domenico, E.C. Strinati, and M.-G. Di Benedetto. A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 14(1):21–44, Jan. 2012.
- [Gar88] W.A. Gardner. Signal Interception: A Unifying Theoretical Framework for Feature Detection. *Communications, IEEE Transactions on*, 36(8):897–906, Aug. 1988.
- [GJMS09] A. Goldsmith, S.A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa. Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective. *Proceedings of the IEEE*, 97(5):894–914, May 2009.
- [GS07] Amir Ghasemi and Elvino S. Sousa. Optimization of Spectrum Sensing for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks. In *Proc. IEEE CCNC 2007*, pages 1022–1026, Jan. 2007.
- [HLLZ11] Weijia Han, Jiandong Li, Qin Liu, and Linjing Zhao. Spatial False Alarms in Cognitive Radio. *Communications Letters, IEEE*, 15(5):518–520, May 2011.
- [HWA<sup>+</sup>07] Wendong Hu, D. Willkomm, M. Abusubaih, J. Gross, G. Vrantis, M. Gerla, and A. Wolisz. COGNITIVE RADIOS FOR DYNAMIC SPECTRUM ACCESS - Dynamic Frequency Hopping Communities for Efficient IEEE 802.22 Operation. *Communications Magazine, IEEE*, 45(5):80–87, May 2007.
- [Inf07] Information Sciences Institute. NS-2 network simulator (version 2.31). Software Package retrieved from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2007.

- [JJL<sup>+</sup>07] S.D. Jones, E. Jung, Xin Liu, N. Merheb, and I-Jeng Wang. Characterization of Spectrum Activities in the U.S. Public Safety Band for Opportunistic Spectrum Access. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, pages 137–146, Apr. 2007.
- [JZS08] Juncheng Jia, Qian Zhang, and Xuemin Shen. HC-MAC: A Hardware-Constrained Cognitive MAC for Efficient Spectrum Management. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(1):106–117, Jan. 2008.
- [LA08] Won-Yeol Lee and I.F. Akyildiz. Optimal Spectrum Sensing Framework for Cognitive Radio Networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(10):3845–3857, Oct. 2008.
- [LJSK05] J.J. Lehtomaki, M. Juntti, H. Saarnisaari, and S. Koivu. Threshold Setting Strategies for a Quantized Total Power Radiometer. *Signal Processing Letters, IEEE*, 12(11):796–799, Nov. 2005.
- [LKHP07] Jarmo Lunden, Visa Koivunen, Anu Huttunen, and H. Vincent Poor. Spectrum Sensing in Cognitive Radios Based on Multiple Cyclic Frequencies. In *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on*, pages 37–43, Aug. 2007.
- [MS07] Chetan N. Mathur and K. P. Subbalakshmi. Digital Signatures for Centralized DSA Networks. In *Consumer Communications and Networking Conference, 2007. CCNC 2007. 4th IEEE*, pages 1037–1041, Jan. 2007.
- [N. 07] N. Khambekar, L. Dong, and V. Chaudhary. Utilizing OFDM Guard Interval for Spectrum Sensing. *Proc. IEEE Wireless Commun. and Networking Conf.*, pages 38–42, Mar. 2007.
- [Ora09] Valeria Orani. *Wavelet Spectrum Sensing and Transmission System (WS-SaT-System) based on WPDM*. Phd thesis, University of Cagliari, 2009.

- [SB11] Mansi Subhedar and Gajanan Birajdar. Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Networks: A Survey. *International Journal of Next-Generation Networks*, 3(2):37–51, 2011.
- [SCL<sup>+</sup>09] C. Stevenson, G. Chouinard, Zhongding Lei, Wendong Hu, S. Shellhammer, and W. Caldwell. IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard. *Communications Magazine, IEEE*, 47(1):130 –138, Jan. 2009.
- [SLND07] P. D. Sutton, J. Lotze, K. E. Nolan, and L. E. Doyle. Cyclostationary Signature Detection in Multipath Rayleigh Fading Environments. In *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on*, pages 408 –413, Aug. 2007.
- [SZ08] Hang Su and Xi Zhang. Cross-Layer Based Opportunistic MAC Protocols for QoS Provisionings Over Cognitive Radio Wireless Networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(1):118 –129, Jan. 2008.
- [SZB07] Chunhua Sun, Wei Zhang, and K. Ben. Cluster-Based Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems. In *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, pages 2511 –2515, June 2007.
- [SZL07] Chunhua Sun, Wei Zhang, and K.B. Letaief. Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radios under Bandwidth Constraints. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE*, pages 1 –5, Mar. 2007.
- [T. 03] T. Weiss, J. Hillenbrand, A. Krohn, and F. Jondral. Efficient Signaling of Spectral Resources in Spectrum Pooling Systems. in *Proc. IEEE Symposium on Commun. and Veh. Technol., Eindhoven, Netherlands*, Nov. 2003.
- [Tah87] Hamdy A. Taha. *Operations Research: An Introduction, 4th ed.* Macmillan Publishing Co., Inc., Indianapolis, IN, USA, 1987.
- [Tan05] H. Tang. Some Physical Layer Issues of Wide-band Cognitive Radio Systems. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN*

2005. *2005 First IEEE International Symposium on*, pages 151 –159, Nov. 2005.

- [Urk67] H. Urkowitz. Energy Detection of Unknown Deterministic Signals. *Proceedings of the IEEE*, 55(4):523 – 531, Apr. 1967.
- [WL11] Beibei Wang and K. J. Ray Liu. Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey. *J. Sel. Topics Signal Processing*, 5(1):5 –23, 2011.
- [YA06] Tevfik Yucek and Hüseyin Arslan. Spectrum Characterization for Opportunistic Cognitive Radio Systems. In *Proceedings of the 2006 IEEE conference on Military communications*, MILCOM'06, pages 1805–1810, Piscataway, NJ, USA, 2006. IEEE Press.
- [YA09] T. Yucek and H. Arslan. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1):116–130, 2009.



## Apêndice A

# Código de Simulação do ns-2

Neste apêndice é apresentada uma breve descrição da implementação, no simulador ns-2, do método utilizado por cada utilizador secundário para estimar a probabilidade de acesso dos utilizadores primários. De acordo com o que foi descrito no Capítulo 5, é considerada uma rede cognitiva constituída por um par (emissor/receptor) de utilizadores primários e  $n$  utilizadores secundários, em que cada utilizador secundário recorre ao protocolo MAC baseado em contenção, descrito na Secção 5.2, para aceder ao meio.

Na implementação do protocolo MAC baseado em contenção foi considerado um conjunto de  $n + 2$  nós, em que o nó 0 e o nó 1 correspondem respectivamente ao emissor primário e ao receptor primário, e a gama de nós 2 a  $n + 2$  correspondem a utilizadores secundários.

De seguida, é descrita a implementação do método de estimação da probabilidade de acesso dos utilizadores primários realizada no protocolo MAC. Após a descrição são apresentadas pequenas partes de código das funções do protocolo MAC que contemplam as operações necessárias para realizar o método.

Tal como exposto na Secção 5.2, um determinado utilizador secundário é capaz de estimar a probabilidade de acesso dos utilizadores primários caso possuam a informação acerca de determinadas características da rede. Sendo estas o número total de utilizadores pertencentes à rede secundária, a janela de contenção adoptada por si e pelos restantes utilizadores secundários e a sua probabilidade de transmitir com sucesso. Admitiu-se que o número total de utilizadores da rede secundária é conhecido por cada utilizador

secundário e garantiu-se que todos os utilizadores secundários adoptam a mesma janela de contenção. Deste forma, verifica-se que a única informação que fica a faltar para a realização do método é a probabilidade de transmissão com sucesso conseguida pelo utilizador secundário.

Verificou-se que a forma mais simples de calcular a probabilidade de transmissão com sucesso seria recorrer ao calculo da probabilidade oposta, ou seja a probabilidade do utilizador secundário numa dada transmissão não obter sucesso. Deste modo, foram implementados no protocolo MAC dois contadores, um contador do número total de pacotes transmitidos e outro contador do número total de pacotes transmitidos sem sucesso. Pretende-se que o contador do número total de pacotes transmitidos seja incrementado sempre que um pacote é transmitido (ver linhas 18 e 19 da função *Mac\_miop :: transmit* representada em A.1), enquanto que o contador do número total de pacotes transmitidos sem sucesso deve ser incrementado sempre que ocorra o pedido de retransmissão de um pacote, pois este evento resulta da perda de um pacote (ver linha 11 da função *Mac\_miop :: send\_timer* representada em A.2). Importa referir que em todas as simulações realizadas na Secção 5.3, o protocolo foi configurado de modo a não serem realizadas retransmissões.

Implementados os contadores do número total de pacotes transmitidos e do número total de pacotes transmitidos sem sucesso, conclui-se que cada utilizador secundário possui todas as informações necessárias à realização do método de estimação da probabilidade de acesso dos utilizadores primários. Assim sendo, cada utilizador secundário no fim da cada período de contenção, recorre à expressão (5.7) para estimar a probabilidade de acesso dos utilizadores primários (ver a função *Mac\_miop :: backoffHandler* representada em A.3).

A nível da implementação do protocolo MAC é importante referir que foi necessário garantir que o comportamento do emissor primário nunca é influenciado pela existência de utilizadores secundários no meio. Para garantir essa condição, foi implementada a inibição do emissor primário entrar em modo recepção. Esta inibição encontra-se realizada a partir do código apresentado entre as linhas 17 e 20 da função *Mac\_miop :: recv* representada em A.4.

```

1 inline void Mac_miop::transmit(Packet *p, double timeout)
2 {
3     tx_active_ = 1;
4     if (EOTtarget_) {
5         assert (eotPacket_ == NULL);
6         eotPacket_ = p->copy();
7     }
8     if(rx_state_ != MAC_IDLE) {
9         //assert(dh->dh_fc.fc_type == MAC_Type_Control);
10        //assert(dh->dh_fc.fc_subtype == MAC_Subtype_ACK);
11        assert(pktRx_);
12        struct hdr_cmh *ch = HDR_CMH(pktRx_);
13        ch->error() = 1;          /* force packet discard */
14    }
15    dwnntarget_->recv(p->copy(), this);
16
17    // Added by AF
18    if(tx_state_ == MAC_SEND)
19        tx_tot = tx_tot + 1; //Increment Count the number of send packets
20    // **
21    mhSend_.start(timeout);
22    mhIF_.start(txtime(p));
23 }

```

Listing A.1: Função *Mac\_miop::transmit*.

```
1 void Mac_miop::send_timer()
2 {
3     switch(tx_state_) {
4         (...)
5     /*
6      * Sent DATA, but did not receive an ACK packet.
7      */
8     case MAC_SEND:
9
10        // Added by AF
11        tx_nok = tx_nok + 1; //Increment the counter of the number of failed
           packets
12        // **
13
14        RetransmitDATA();
15        break;
16    /*
17     * Sent an ACK, and now ready to resume transmission.
18     */
19    case MAC_ACK:
20        assert(pktCTRL_);
21        Packet::free(pktCTRL_);
22        pktCTRL_ = 0;
23        break;
24    case MAC_IDLE:
25        break;
26    default:
27        assert(0);
28    }
29    tx_resume();
30 }
```

Listing A.2: Função *Mac\_miop::send\_timer*.

```

1 void Mac_miop::backoffHandler()
2 {
3     // Added by AF
4     if(addr()>=2){ //Nodes 0 and 1 are primary nodes. The rest are secondary
        nodes
5         /*****
6         *Calculation of the Probability of Access of primary users*
7         *****/
8         double Ps_su = 0,Tsu = 0, SU_nodes = 0,P_idlet;
9         // Número de nós secundários
10        SU_nodes = (this->num_nodes - 2);
11        if(tx_tot>0)
12            Ps_su = 1 - tx_nok/tx_tot; //Probability of Success of the secondary
                user
13        Tsu = 2/(double)(cw_ + 1);
14        P_idlet = pow( 1 - Tsu, SU_nodes-1); //Probabilidade de idle
15        double P_put = 0;
16        if(P_idlet>0)
17            P_put = 1 - (Ps_su/(double)(P_idlet));
18
19        double now = Scheduler::instance().clock();
20        printf("P_pu \t%d\t%2.9f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n",addr(), now, tx_tot,
                tx_nok, Ps_su, P_idlet, P_put);
21    }
22    // **
23    (...)

```

Listing A.3: Função *Mac\_miop::backoffHandler*.

```
1 void Mac_miop::recv(Packet *p, Handler *h)
2 {
3     struct hdr_cmn *hdr = HDR_CMN(p);
4     /*
5      * Sanity Check
6      */
7     assert(initialized());
8     /*
9      * Handle outgoing packets.
10     */
11     if(hdr->direction() == hdr_cmn::DOWN) {
12         send(p, h);
13         return;
14     }
15
16     // Added by AF
17     if(addr()==0){
18         Packet::free(p); // Is inhibited receive mode to primary user (node 0)
19         return;
20     }
21     // **
22     (...)
```

Listing A.4: Função *Mac\_miop::recv*.

## Apêndice B

### *Script* de Simulação do ns-2

Neste apêndice é apresentado o script de simulação utilizado na configuração do simulador ns-2 de forma a simular a rede cognitiva descrita no Capítulo 5.

```
1 #=====
2 #                               Options
3 #=====
4 set opt(x) 100
5 set opt(y) 100
6 set opt(nn) 12; # number of nodes
7 #(node 0 / node 1)=(transmitter / receptor) Primary Users
8 #(2, 3, ..., 12) Secondary Users
9 set opt(stop) 300;
10 set opt(tr) out.tr
11 set pu 20;      # Probability Access for Primary
12 set lambdasu 500; # Traffic Generator of Secondary Users
13 #=====
14 #                               MAC
15 #=====
16 Mac/miop set dataRate_      11.0e6
17 Mac/miop set basicRate_    1.0e6
18 Mac/miop set RTSThreshold_  3000
19 Mac/miop set CWMin_ 114.6069; #Contention Window of Secondary Users
```

```

20 #=====
21 #                               Nodes
22 #=====
23 set opt(seed) 1045.0 ;# random seed
24 if {$opt(seed) > 0} {
25   ns-random $opt(seed)
26 }
27 set ns_ [new Simulator]
28 set tracefd [open $opt(tr) w]
29 $ns_ trace-all $tracefd
30 set topo [new Topography]
31 $topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)
32 create-god $opt(nn)
33 $ns_ node-config -adhocRouting DumbAgent \
34                 -llType LL \
35                 -macType Mac/miop \
36                 -ifqType Queue/DropTail \
37                 -ifqLen 50 \
38                 -antType Antenna/OmniAntenna \
39                 -propType Propagation/TwoRayGround \
40                 -phyType Phy/WirelessPhy \
41                 -channelType Channel/WirelessChannel \
42                 -topoInstance $topo \
43                 -agentTrace OFF \
44                 -routerTrace OFF \
45                 -macTrace OFF \
46                 -movementTrace OFF
47
48 for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
49   # WIRELESS TERMINAL instantiation
50   set WT($i) [ $ns_ node $i ]
51
52   # setting the position for each node
53   $WT($i) set X_ 10.0
54   $WT($i) set Y_ 10.0
55   $WT($i) set Z_ 0.0
56 }

```

```

57 #=====
58 #                      Agents
59 #=====
60 for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i 1} {
61     set p($i) [new Agent/MAC_GEN_STATS $i]
62     # associa o agent MAC_GENT_STATS ao no
63     $ns_ attach-agent $WT($i) $p($i)
64     # associa o agent ao porto 290
65     # porto do agent MAC_GENT_STATS
66     $WT($i) attach $p($i) 290
67
68 }
69 for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
70
71     set mac_($i) [$WT($i) getMac 0];
72     ## manter esta ordem de atribuicao de parametrizacao
73     $ns_ at 0.0000001 "$p($i) set_num_nodes $opt(nn)";
74     $ns_ at 0.0000001 "$p($i) set_percent_broadcast 0.0";
75     $ns_ at 0.0000001 "$p($i) set_mode 0";
76
77
78     # Modified by Antonio Furtado
79     if {$i== 0} { ;#PUs
80 set Tx_duration 0.0013827; #Packet transmission duration in seconds
81 set lambda [expr {$pu/($Tx_duration * 100)}]
82 puts "Lambda : $lambda "
83 $ns_ at 0.0000001 "$p($i) set_lambda $lambda";
84     } else { ;#SUs
85 $ns_ at 0.0000001 "$p($i) set_lambda $lambdasu";
86     }
87     # =====
88
89     # $ns_ at 0.0000001 "$p($i) set_scale 0.15";
90     # $ns_ at 0.0000001 "$p($i) set_shape 150";
91     # da BUG 20.0
92     # logger instantiated at mac that is the same as $p() - static variable
93     $ns_ at 0.00000000001 "$mac_($i) set_num_nodes $opt(nn)";

```

```

94     $ns_ at 0.000000011 "$mac_($i) create_queue_logger";
95
96     if {$i!= 1} { ;# Node 1 is only receptor does not start the traffic
          generator
97     ## start sending at each agent
98     $ns_ at 0.00000111 "$p($i) start";
99 }
100     $ns_ at $opt(stop) "$p($i) print";
101 }
102 # $ns_ at $opt(stop).9 "puts \"end file\""
103 #=====
104 #                               End
105 #=====
106 Agent/Ping instproc recv {from rtt} {
107     $self instvar node_
108     puts "node [$node_ id] received ping answer from \
109         $from with round-trip-time $rtt ms."
110 }
111
112 $ns_ at $opt(stop).1 "stop"
113 $ns_ at $opt(stop).9 "$ns_ halt"
114
115 proc stop {} {
116     exit 0
117 }
118
119 puts "Starting Simulation..."
120 $ns_ run

```

## Apêndice C

# Publicações

Neste apêndice são apresentados os artigos realizados ao longo desta dissertação. O artigo intitulado "Energy Sensing Parameterization Criteria for Cognitive Radios", foi submetido e aceite na Conferência *9th IEEE International Symposium on Wireless Communication systems*, no ano de 2012. O segundo artigo, intitulado "Towards a Realistic Primary Users' Behavior in Single Transceiver Cognitive Networks", encontra-se em fase de revisão na revista internacional *IEEE Communications Letters*. Ambos os artigos têm por base todo o trabalho realizado ao longo do projecto desta dissertação.



# Energy Sensing Parameterization Criteria for Cognitive Radios

Miguel Luís<sup>(1)(2)</sup>, António Furtado<sup>(1)</sup>, Rodolfo Oliveira<sup>(1)(2)</sup>, Rui Dinis<sup>(1)(2)</sup>, Luis Bernardo<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>CTS, UNINOVA, Dep.<sup>o</sup> de Eng.<sup>a</sup> Electrotécnica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, FCT,  
Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal

<sup>(2)</sup>IT, Instituto de Telecomunicações, Portugal

**Abstract**—Energy-based sensing (EBS) has been a topic of strong research in the last years due to its importance to Cognitive Radios (CRs). While EBS has been used in several works, different parameterizations have been adopted. In this work we compare different parameterization criteria to determine the decision threshold to the energy detector. We compare their performance through simulations by characterizing the interference caused to primary users and the throughput achieved by the secondary users. We also assess their relative performance.<sup>1</sup>

**Keywords:** Energy Sensing, Cognitive Radio.

## I. INTRODUCTION

Cognitive Radio (CR) have been proposed as a solution to alleviate the increasing demand for radio spectrum [1]. The nodes equipped with CRs, usually denominated Secondary Users (SUs), must be aware of the activity of the licensed users, denominated Primary Users (PUs), in order to dynamically access the spectrum without causing them harmful interference.

Spectrum Sensing (SS) aims at detecting the availability of vacant portions (holes) of spectrum and has been a topic of considerable research over the last years [1]. It plays a central role in CRs. The traditional SS techniques include Waveform-based sensing (WBS) [2], a coherent technique that consists on correlating the received signal with *a priori* known set of different waveform patterns; Matched Filter-based sensing (MFBS) [3], an optimal sensing scheme where the received signal is also correlated with a copy of the transmitted one; and Cyclostationarity-based sensing (CBS) [4], a technique that exploits the periodic characteristics of the received signals, *i.e.*, carrier tones, pilot sequences, etc. MFBS assumes prior knowledge of the primary's signal, while WBS assumes that the received signal matches with one of the patterns previously known. This means that these sensing techniques are not feasible in some bands, where several communication technologies may operate without *a priori* knowledge. On other hand, CBS is impracticable for signals that do not exhibit cyclostationarity properties. Energy-based sensing (EBS) [5], [6] is the simplest spectrum sensing technique and its main advantage is related

with the fact that it does not need any *a priori* knowledge of PU's signal. At the same time, it is well known that EBS can exhibit low performance in specific comparative scenarios [7], or when noise's variance is unknown or very large. EBS has been studied in several CR scenarios, namely on local and cooperative sensing schemes [1]. More recently, several EBS schemes adopting sub-nyquist sampling have been proposed, which are advantageous in terms of the sensing duration [8].

In this work we consider a CR network where SUs use local EBS to detect PUs' activity. Because current radios can not sense and transmit at the same time, CRs using EBS are usually synchronized in a sensing period, during which PUs' activity is detected. This is a classical scenario for EBS CRs, frequently considered in the last years [6], [9]. During the sensing period the CRs perform the channel sampling task at Nyquist rate. EBS performance depends on the number of channel samples collected during the sensing period, and on the energy threshold used to decide about PUs' activity. Several studies already characterized the optimal sensing period duration that maximizes SU's throughput for a given interference constraint. In [6] the detection probability is initially assigned to a fixed regulatory constraint that imposes the maximum level of admissible interference, and the authors determine the optimal duration of the sensing period for a given energy threshold. The detection probability is achieved by adopting a constant energy threshold and by finding the number of channel samples that meet the probability value and maximize SUs' throughput. In [9], instead of assigning a constant value, the energy threshold is defined as a value that equals the sensing error probabilities when PUs use or do not use the channel. It was shown that by equalling the error probabilities for both cases, the duration of the sensing period is independent of the energy threshold.

While [6] and [9] follow different strategies to parameterize the energy threshold, both guarantee PUs protection by determining the right amount of channel samples needed to meet the interference constraint. In this paper we investigate new strategies to parameterize the EBS. Our goal is to analyze other parameterization criteria for the energy threshold and characterize the throughput of such a system for an extended range of sensing period durations. As far as we know, this is the first attempt to compare different EBS parameterization strategies and evaluate its impact in the performance of PUs interference and SUs throughput.

<sup>1</sup>This work was partially supported by COST Action IC0902 "Cognitive Radio and Networking for Cooperative Coexistence of Heterogeneous Wireless Networks", funded by the European Science Foundation, and by the Portuguese Science and Technology Foundation under the grant SFRH/BD/68367/2010 and the projects PTDC/EEA-TEL/115981/2009, PTDC/EEA-TEL/099074/2008, PEst-OE/EEI/LA0008/2011 and PEst-OE/EEI/UI0066/2011.

The rest of this paper is organized as follows. In the next section we introduce the adopted system. Section III describes the parameterization criteria evaluated in the analysis. Simulation results are discussed in Section IV. Finally, some concluding remarks are given in Section V.

## II. SYSTEM DESCRIPTION

We consider a pair of PUs accessing the channel and a pair of SUs that access the channel opportunistically. SUs are equipped with a single radio transceiver. However, because SUs are unable to distinguish SUs and PUs transmissions, each SU will have to divide its operation cycle (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 SU's frame,  $T_F^{SU}$ , is divided into  $N_T$  slots where each slot duration is given by the channel sampling period. The first  $N_S$  slots are allocated to the spectrum sensing (channel sampling) and the remaining ones ( $N_S + 1$  to  $N_T$ ) are used to access the channel. In this paper we assume that SUs always have a packet to transmit. All SUs are synchronized to the beginning of the frame.

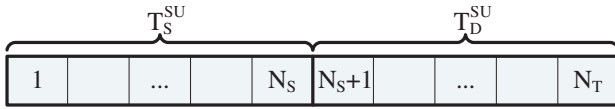


Fig. 1. SU's frame structure.

### A. Spectrum Sensing

To distinguish between occupied and vacant spectrum bands, SUs sample the channel during the sensing period  $T_S^{SU}$ , and for each sample  $n$  two hypotheses can be distinguished

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

where  $s(n)$  denotes the transmitted signals by PUs, modeled as a Gaussian variable with mean  $\mu_s$  and variance  $\sigma_s^2$ , i.e.,  $s(n) = \mathcal{N}(\mu_s, \sigma_s^2)$ .  $w(n)$  is assumed to be a zero-mean additive white Gaussian noise (AWGN) with unit variance, i.e.,  $w(n) = \mathcal{N}(0, 1)$ . The condition  $\mathcal{H}_0$  represents the case when PUs are absent.  $\mathcal{H}_1$  indicates that there exists a signal transmitted by a PU.

EBS relies on the classical energy detector [5]. In the detection stage, each SU calculates the amount of energy received in  $N_S$  samples, given by

$$Y = \sum_{n=1}^{N_S} |x(n)|^2, \quad (2)$$

and compares it with the energy threshold  $\gamma$  to decide whether a PU is present or absent. Under the hypothesis  $\mathcal{H}_0$ , the decision variable  $Y$  follows a central chi-square distribution with  $2N_S$  degrees of freedom. Under the hypothesis  $\mathcal{H}_1$ ,  $Y$  follows a non-central chi-square distribution also with  $2N_S$  degrees of freedom, and a non centrality parameter  $\lambda$ , denoting the signal-to-noise ratio (SNR) [10]. However, if the number

of samples  $N_S$  is large enough<sup>2</sup>, it is possible to use the Central Limit Theorem (CLT) to approximate the chi-square distribution to a Gaussian distribution [11]:

$$Y \sim \begin{cases} \mathcal{N}(N_S, 2N_S), & \mathcal{H}_0 \\ \mathcal{N}(N_S + \lambda, 2(N_S + 2\lambda)), & \mathcal{H}_1. \end{cases} \quad (3)$$

Therefore, for a single SU the probability of detection ( $P_D$ ) and probability of false alarm ( $P_{FA}$ ) are represented by

$$P_D = Pr(y > \gamma | \mathcal{H}_1) = \mathcal{Q} \left( \frac{\gamma - (N_S + \lambda)}{\sqrt{2(N_S + 2\lambda)}} \right) \quad (4)$$

$$P_{FA} = Pr(y > \gamma | \mathcal{H}_0) = \mathcal{Q} \left( \frac{\gamma - N_S}{\sqrt{2N_S}} \right) \quad (5)$$

where  $\mathcal{Q}(\cdot)$  is the complementary distribution function of the standard Gaussian. By observing equations (4) and (5) we can see that both  $P_D$  and  $P_{FA}$  only depend on the number of samples ( $N_S$ ) and energy threshold ( $\gamma$ ).

### B. System Throughput

PUs will access the channel with a probability  $\tau_{PU}$ . For the sake of simplicity, the beginning of PU's transmission always matches with the beginning of SU's sensing period. We also assume that PU's frame duration,  $T_F^{PU}$ , is  $g > 0$  times SU's total frame duration ( $T_F^{PU} = g \cdot T_F^{SU}$ ), meaning that a PU will not change its activity until the end of a SU's frame. A SU accesses the channel with probability  $\tau_{SU}$ , given by [6]

$$\tau_{SU} = (1 - \tau_{PU})(1 - P_{FA}) + \tau_{PU}(1 - P_D), \quad (6)$$

where the first term in equation (6) is due to the successful identification of an unused channel, while the second one represents the case when the channel is erroneously deemed idle due to a detection error.

Following the same rationale, we derive the expression for the Probability of Interference  $P_I$ , i.e., the probability of misdetecting a PU when it is transmitting:

$$P_I = \tau_{PU}(1 - P_D). \quad (7)$$

The overall system throughput, is defined as the sum of both throughputs achieved by PUs and SUs. The throughput achieved by a SU is defined as the ratio between the expected transmitting successful frames and the frame's duration:

$$S_{SU} = \frac{T_D^{SU}(1 - \tau_{PU})(1 - P_{FA})}{T_F^{SU}}. \quad (8)$$

On the other hand, PUs' throughput is only limited by the miss-detection situations, which can be approximated by

$$S_{PU} = \tau_{PU}P_D. \quad (9)$$

Therefore, the throughput achieved by PUs and SUs is

$$S = \frac{T_D^{SU}(1 - \tau_{PU})(1 - P_{FA})}{T_F^{SU}} + \tau_{PU}P_D. \quad (10)$$

<sup>2</sup>The sampling rate must satisfy the Nyquist sampling theorem.

### III. SPECTRUM SENSING PARAMETERIZATION CRITERIA

This section introduces the different criteria analyzed in this work. As stated before, we aim to compare different EBS parameterization criteria ( $C_x$ ) for the decision threshold ( $\gamma$ ) adopted by SUs and analyze the parameterization for variable spectrum sensing durations ( $N_S$ ). We compare the parameterization criteria adopted in [6] and [9], together with other variants.

#### A. Parameterization Criteria

1) *Parameterization Criterion  $C_1$* : Let us start by one of the first and most studied parameterization criterion in the literature: the limitation of the admissible interference, which works as a level of protection to PUs. For that,  $P_I$  is set to the PUs' maximum admissible level of interference. Rewriting (7) as

$$P_D = 1 - \frac{P_I}{\tau_{PU}}, \quad (11)$$

and using (4), the decision threshold  $\gamma$  can be obtained as follows:

$$\gamma = \mathcal{Q}^{-1}\left(1 - \frac{P_I}{\tau_{PU}}\right) \sqrt{2(N_S + 2\lambda)} + N_S + \lambda. \quad (12)$$

This criterion will guarantee a determined protection to PUs. However, it does not consider the probability of false alarm in  $\gamma$ 's parameterization, which may decrease the performance of SUs. This criterion was adopted in [6].

2) *Parameterization Criterion  $C_2$* : The second criterion parameterizes  $\gamma$  and  $S$  as the values that maximize the product between the non-interfering probability and the SU access probability. This criterion can be stated as

$$\begin{aligned} \text{Find:} & \quad \gamma^* \\ \text{Maximize:} & \quad C_2 = (1 - P_I)\tau_{SU} \\ \text{Subject to:} & \quad N_S \geq 2WT_S^{SU}, \end{aligned} \quad (13)$$

where  $\gamma^*$  is the optimal decision threshold. The constraint  $N_S \geq 2WT_S^{SU}$  imposes the Nyquist sampling rate ( $W$  represents the bandwidth of the sensed band). While  $C_2$  does not limit the level of interference caused to PUs, it achieves the best tradeoff between the amount of interference caused by SUs and their chances of accessing the channel.

3) *Parameterization Criterion  $C_3$* : The third criterion tries to maximize the sensing success by maximizing the product between the probability of detection and the probability of correct rejection ( $1 - P_{FA}$ ).  $C_3$  can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} \text{Find:} & \quad \gamma^* \\ \text{Maximize:} & \quad C_3 = P_D(1 - P_{FA}) \\ \text{Subject to:} & \quad N_S \geq 2WT_S^{SU}. \end{aligned} \quad (14)$$

4) *Parameterization Criterion  $C_4$* : The fourth criterion takes into account the fact that if a PU accesses the channel with probability  $\tau_{PU}$ , then the SU has a maximum channel access probability equal to  $1 - \tau_{PU}$ . Hence, this criterion finds the parameterization that equals SUs' channel access

probability to the maximum channel access probability, which can be written as

$$\tau_{SU} = (1 - \tau_{PU}), \quad (15)$$

which by equation (6) is equivalent to the condition

$$(1 - \tau_{PU})P_{FA} - \tau_{PU}(1 - P_D) = 0. \quad (16)$$

This criterion finds the decision threshold that solves the previous equation (16) and is described as follows:

$$\begin{aligned} \text{Find:} & \quad \gamma^* \\ \text{Where:} & \quad C_4 = (1 - \tau_{PU})P_{FA} - \tau_{PU}(1 - P_D) \\ \text{Subject to:} & \quad N_S \geq 2WT_S^{SU} \end{aligned} \quad (17)$$

$C_4$  is the parameterization criterion adopted in [9].

5) *Parameterization Criterion  $C_5$* : Finally, the fifth parameterization criterion relates the probability of detection with the probability of SUs transmission.  $C_5$  finds the best tradeoff between the two probabilities by maximizing its product:

$$\begin{aligned} \text{Find:} & \quad \gamma^* \\ \text{Maximize:} & \quad C_5 = P_D\tau_{SU} \\ \text{Subject to:} & \quad N_S \geq 2WT_S^{SU} \end{aligned} \quad (18)$$

This criterion is similar to  $C_2$ . However, in  $C_2$  PU's protection is considered by incorporating the probability of interference, which depends on the PU's access probability (see (7)). In this case the level of PU's protection is measured by  $P_D$ 's value and does not depend on the activity of the PUs.

#### B. Parameterization criteria's analysis

$P_D$  and  $P_{FA}$ , given in (4) and (5) respectively, are plotted in Figure 2 for different values of decision threshold  $\gamma$ , considering a constant number of spectrum sensing samples  $N_S = 20$ ,  $SNR = -5\text{dB}$  and  $\tau_{PU} = 0.5$ . Figure 2 also illustrates the numeric values obtained for each criterion obtained for each threshold, which are determined by (13), (14), (17) and (18). We also exhibit the decision threshold computed with (12) for  $P_I = 0.04$ . From the figure we can see that due to the low

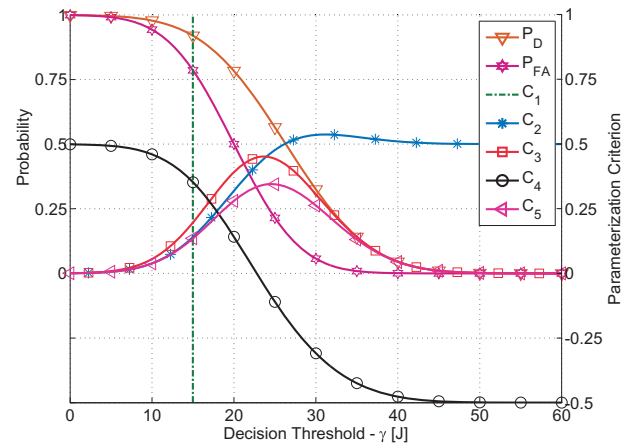


Fig. 2.  $P_D$ ,  $P_{FA}$  and parameterization criteria  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$  for different thresholds  $\gamma$  ( $SNR = -5\text{dB}$ ,  $\tau_{PU} = 0.5$  and  $N_S = 20$ ). " $C_1$ " indicates the threshold computed with criterion  $C_1$  given  $P_I = 0.04$ .

SNR condition,  $P_D$  and  $P_{FA}$  curves are very close to each other, meaning that the energy detector can not operate near the optimal point of operation, where  $P_D \approx 1$  and  $P_{FA} \approx 0$ . Another consequence is that the optimal decision thresholds calculated with the proposed criteria lie in a small range - from approximately 23J ( $C_4$ ) to 31J ( $C_2$ ). This means that  $C_2$  offers the lowest level of PU's protection against SU's interference, because the probability of detection exhibits the smallest value for the optimal threshold determined by  $C_2$ .

Figure 3 plots the same curves for better signal conditions, i.e.  $SNR = 5dB$ . In this case the descending zone of  $P_{FA}$  and  $P_D$  are more distant. We observe the same relationship regarding the distance between the thresholds achieved by each parameterization criterion. The lowest optimal decision threshold stands for  $C_4$ , which is maximized when the  $P_{FA}$  and the  $1 - P_D$  exhibit the same value.  $C_3$  and  $C_5$  achieve similar thresholds, around  $\gamma = 40J$ . Finally, the criterion  $C_2$  achieves the highest decision threshold, around 83J. As in the previous figure,  $C_2$  is still the criterion that offers the lowest protection to PUs because  $P_D \approx 0.49$  for the optimal threshold determined by  $C_2$ , while  $P_D$  is close to 1 for the thresholds achieved with  $C_3$ ,  $C_4$  and  $C_5$ .

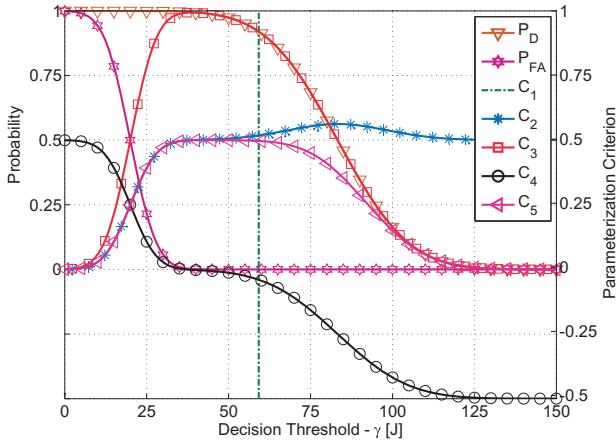


Fig. 3.  $P_D$ ,  $P_{FA}$  and parameterization criteria  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$  for different thresholds  $\gamma$  ( $SNR = 5dB$ ,  $\tau_{PU} = 0.5$  and  $N_S = 20$ ). " $C_1$ " indicates the threshold computed with criterion  $C_1$  given  $P_I = 0.04$ .

#### IV. PERFORMANCE EVALUATION

This section presents simulation results that compare the performance achieved with the described parameterization criteria. The performance of each criterion is evaluated through the throughput obtained by SUs and the interference caused to PUs.

##### A. Simulation Setup

We have considered a scenario formed by one PU transmitter-receiver pair and one SU transmitter-receiver pair. The operation mode of PUs and SUs is as described in Section II.  $P_I = 0.04$  was adopted for the parameterization criterion  $C_1$ . The remaining simulation parameters are described in Table I.

TABLE I  
PARAMETERS USED FOR PERFORMANCE EVALUATION.

|            |            |                 |            |
|------------|------------|-----------------|------------|
| W          | 10 kHz     | Sampling Rate   | 50 $\mu s$ |
| $T_F^{SU}$ | 21.3 ms    | $\lambda$ (SNR) | 5 dB       |
| $\mu_s$    | 3.16 (5dB) | $\sigma_s^2$    | 3          |

##### B. Simulation Results

The parameterization criteria were applied for different  $N_S$  values that comply with the Nyquist sampling rate. By this way it is possible to analyze the effect of the sensing duration in the performance of the parameterization criterion. Figure 4 illustrates the interference caused to PUs for each parameterization criterion at different spectrum sensing periods. The interference was measured as the amount of time a PU communication is mistakenly interrupted by a SU, and is approximated by  $P_I/\tau_{PU}$ . The performance is evaluated in three different scenarios  $\tau_{PU} = 0.3$ ,  $\tau_{PU} = 0.5$  and  $\tau_{PU} = 0.7$ .

Figure 5 illustrates the SU's throughput obtained for the same scenarios presented in Fig. 4. From the results we conclude that while  $C_3$  and  $C_4$  exhibit the lowest level of interference caused to PUs, they guarantee almost full protection to PUs when the sensing duration lasts longer than  $0.05 T_S^{SU}/T_F^{SU}$ .

Regarding the criteria  $C_2$  and  $C_5$ , they need a higher sensing duration to approximate the interference caused to PUs to zero. This means that both  $C_2$  and  $C_5$  underperform  $C_3$  and  $C_4$  because they need sensing durations greater than  $0.1 T_S^{SU}/T_F^{SU}$  to approximate the interference caused to PUs to zero. Compared to its maximum value, the throughput of the SUs achieved with  $C_2$  and  $C_5$  significantly decreases when higher sensing durations are adopted, as can be observed in Fig. 5. Thus,  $C_2$  and  $C_5$  fail to guarantee a good level of protection to PUs and also fail to obtain the maximum throughput in the secondary system.

The criterion  $C_1$  was parameterized to limit the interference to 4%. However the interference level exceeds 4% if the sensing duration is too short, as can be observed in Fig. 4(a). While  $C_1$  achieves a good performance in terms of SUs' throughput, it is noticeable that the throughput achieved by SUs underperforms all the other criteria for sensing durations shorter than  $0.06 T_S^{SU}/T_F^{SU}$  if  $C_1$  is parameterized to limit the interference to very small values (lesser than 1%). This means that if  $C_1$  is parameterized to protect the PUs with interference levels close to  $C_3$  and  $C_4$ , it underperforms the other criteria in terms of SUs' throughput. By this way,  $C_3$  and  $C_4$  can be considered advantageous when we require high levels of protection to PUs and higher throughput to SUs. Therefore, comparing  $C_3$  and  $C_4$ , we can observe that they guarantee a similar level of protection to PUs for the sensing duration that maximizes the SUs throughput. For these sensing durations,  $C_3$  outperforms  $C_4$  in terms of SUs' throughput, and it can be considered the best-positioned criterion in terms of the trade-off between PUs' protection and SUs' throughput.

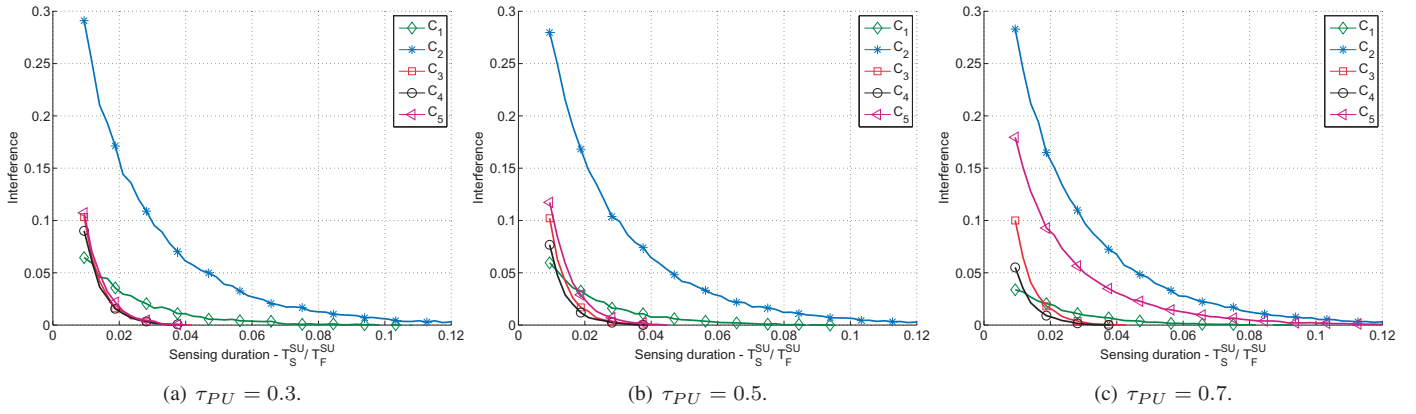


Fig. 4. Interference caused to PUs ( $SNR = 5dB$ ).

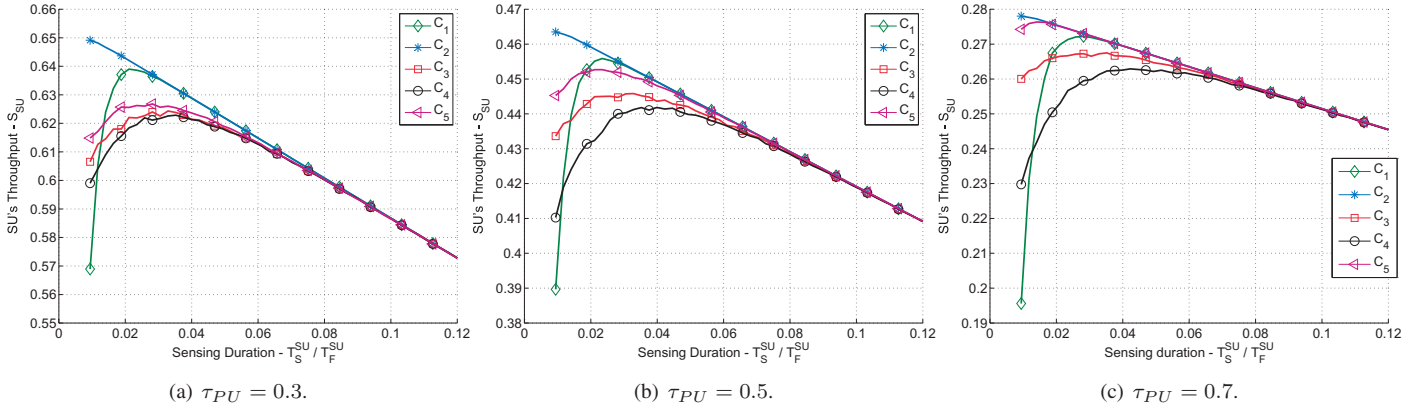


Fig. 5. SUs' Throughput for the scenarios depicted in Fig. 4.

## V. FINAL REMARKS

This work compares different parameterization criteria to determine the decision threshold of a CR using an EBS scheme. While  $C_1$  and  $C_4$  are frequently adopted in the literature, the simulation results show that  $C_3$  can exhibit almost the same behavior in terms of the interference caused to PUs and it outperforms  $C_4$  in terms of SUs' throughput. Moreover, if the level of admissible interference of the PU's system is high (e.g. for CDMA systems),  $C_2$  and  $C_5$  can be a good criteria because they exhibit better performance in terms of SUs' throughput.

The results presented in this paper help to better understand the performance achieved by different parameterizations of the energy threshold in CRs, specifically when CR's operation cycle is divided between sensing and transmission. The results can be used to evaluate the best parameterization strategy according to the maximum level of PUs' admissible interference.

## REFERENCES

- [1] 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.
- [2] A. Zahedi-Ghasabeh, A. Tarighat, and B. Daneshrad, "Spectrum Sensing of OFDM Waveforms Using Embedded Pilots in the Presence of Impairments," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 1208–1221, March 2012.
- [3] A. Bouzegzi, P. Ciblat, and P. Jallon, "Matched Filter Based Algorithm for Blind Recognition of OFDM Systems," in *Proc. IEEE VTC 2008-Fall*, pp. 1–5, September 2008.
- [4] A. Al-Habashna, O. Dobre, R. Venkatesan, and D. Popescu, "Cyclostationarity-Based Detection of LTE OFDM Signals for Cognitive Radio Systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2010*, pp. 1–6, December 2010.
- [5] H. Urkowitz, "Energy Detection of Unknown Deterministic Signals," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, pp. 523–531, April 1967.
- [6] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Optimization of Spectrum Sensing for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks," in *Proc. IEEE CCNC 2007*, pp. 1022–1026, January 2007.
- [7] D. Bhargavi and C. Murthy, "Performance comparison of energy, matched-filter and cyclostationarity-based spectrum sensing," in *Proc. IEEE SPAWC 2010*, pp. 1–5, June 2010.
- [8] Z. Tian and G. Giannakis, "Compressed Sensing for Wideband Cognitive Radios," in *Proc. IEEE ICASSP 2007*, vol. 4, pp. IV-1357–IV-1360, April 2007.
- [9] W.-Y. Lee and I. Akyildiz, "Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 7, pp. 3845–3857, October 2008.
- [10] 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.
- [11] H. Tang, "Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 151–159, November 2005.



# Towards a Realistic Primary Users' Behavior in Single Transceiver Cognitive Networks

Miguel Luís, *Student Member, IEEE*, António Furtado, Rodolfo Oliveira, *Member, IEEE*,  
Rui Dinis, *Member, IEEE* and Luis Bernardo, *Member, IEEE*

**Abstract**—Most of the models used to describe the throughput of Primary (PUs) and Secondary (SUs) users of Cognitive Radio Networks (CRNs) assume that PUs do not change their activity state (OFF/ON) during the SU's operation cycle, which includes the spectrum sensing task. This letter characterizes the impact of the previous approximation by comparing the interference caused to PUs, when they change their activity state at most once during the SU's operation cycle. Considering the last scenario, we derive an analytical model for the PU's throughput and its validation is assessed through simulation results. Generally, assuming that PUs do not change their state leads to an underestimation of the interference caused to PUs. However, under certain conditions, it is shown that by adopting this assumption the interference error is almost negligible when compared to a more realistic PU's behavior.

**Index Terms**—Cognitive Radio, Network Modeling, System Analysis.

## I. INTRODUCTION

In single radio Cognitive Radio Networks (CRNs), non-licensed users (hereafter denoted as Secondary Users - SUs) are equipped with a single transceiver, meaning that SUs only listen or opportunistically transmit when a given portion of spectrum is found vacant. Due to this limitation, SUs adopt an operation cycle where sensing and transmission operations occur in a consecutive manner. SUs start to sense the spectrum during a fixed amount of time (sensing period) and, depending on the output of the sensing, they can transmit in the sensed spectrum during a fixed amount of time (transmission period). SUs repeat the operation cycle periodically to minimize the amount of interference caused to licensed users.

Most of the existing single radio CRNs schemes, such as IEEE 802.22 standard [1], adopt Energy-based sensing (EBS) to characterize the behavior of licensed users (hereafter denoted as Primary Users - PUs). EBS [2], [3] is the simplest spectrum sensing technique and, contrarily to other sensing techniques, *a priori* knowledge of PU's behavior is not required. EBS' performance depends on the number of channel samples collected during the sensing period, and on the energy threshold used to decide about PUs' activity. Several optimal spectrum sensing schemes considering EBS and single-radio nodes have been proposed [3]–[5]. In these works, the authors derive optimal spectrum sensing and transmission periods based on different optimization criteria. However, they consider that PUs only change their behavior in the beginning of the sensing period, which is a quite unrealistic assumption.

The authors are with the CTS, UNINOVA, Dep.º de Eng.ª Electrotécnica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal. M. Luís, R. Oliveira and R. Dinis are also with IT, Instituto de Telecomunicações, Portugal.

In this work we evaluate the validity of the previous assumption by comparing the performance achieved by PUs with the case when PUs can change their behavior at most once during the SU's sensing or transmission period. In other words, we consider the case when PUs can change their behavior during the sensing period, which impacts on the spectrum sensing decision, and the case when PUs can change their behavior outside the sensing period (in the transmission period). Consequently we consider the cases when the EBS decides in one direction (absence or presence of PUs) and the opposite behavior may be observed during the transmission period. The evaluation presented in this work is based on simulations. An analytical model for the interference caused to PUs is also presented, which is a first attempt to model the impact of considering a change on PUs' behavior during the cycle of operation of the SUs.

In the next section we introduce the adopted system. Section III describes the analytical model. Model and simulation results are analyzed in Section IV. Finally, a few concluding remarks are summarized in Section V.

## II. SYSTEM DESCRIPTION

We consider a pair of PUs accessing the channel and a pair of SUs that access the channel in an opportunistic way. SUs are equipped with a single radio transceiver. However, because SUs are unable to distinguish SUs and PUs' transmissions, SUs' operation cycle includes the sensing and transmission periods, which facilitates the synchronization of the sensing task. Sensing and transmission period durations are represented by  $T_S^{SU}$  and  $T_D^{SU}$  respectively, as illustrated in Figure 1.

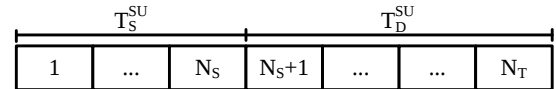


Fig. 1. SU's frame structure.

The SU's frame,  $T_F^{SU}$ , contains  $N_T$  slots, where each slot duration is given by the channel sampling period adopted in the spectrum sensing task. The first  $N_S$  slots define the sensing period duration, and the remaining ones ( $N_S + 1$  to  $N_T$ ) represent the transmission period duration. It is assumed that SUs always have data to transmit and all SUs are synchronized.

Regarding the PUs, we consider that each PU's frame duration  $T_F^{PU}$  i.e., the duration of the active period of a PU, is always  $\delta \geq 1$  times longer than SUs' frame.  $T_F^{PU} = \delta \cdot T_F^{SU}$  and  $T_F^{PU} = \delta \cdot T_F^{SU}$  impose the condition of observing at most once change in the PU's behavior during a SU's frame, where  $T_F^{PU}$  represents the duration of an inactive period of a PU.

### A. Constant PU's behavior

The assumption of constant PU's behavior adopted in several works [3]–[5], indicates the case when PUs maintain their behavior during the SU's frame duration. Under this assumption, PUs will not change its activity state during the SU's frame, *i.e.*, the beginning of PU's transmission always matches with the beginning of SU's sensing period.

To distinguish between occupied and vacant spectrum bands, SUs sample the channel during the sensing period  $T_S^{SU}$ , and for each sample  $k$  two hypotheses can be distinguished

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

where  $s(k)$  denotes the signals transmitted by the PUs, with distribution  $\mathcal{N}(\mu_s, \sigma_s^2)$ .  $w(k)$  is assumed to be a zero-mean additive white Gaussian noise (AWGN), *i.e.*,  $w(k) = \mathcal{N}(0, 1)$ . The condition  $\mathcal{H}_0$  represents the case when PUs are absent, while  $\mathcal{H}_1$  indicates the opposite behavior. During the detection stage, each SU calculates the amount of energy received in the  $N_S$  samples  $Y = \sum_{k=1}^{N_S} |x(k)|^2$ , being then compared with the energy threshold  $\gamma$  to decide whether a PU is present or absent. Since  $Y$  follows a Chi-square distribution [4], [6], and assuming that the number of samples  $N_S$  is large enough, the Central Limit Theorem (CLT) can be used to approximate the Chi-square distribution to a Gaussian distribution [7]:

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

where  $\lambda$  represents the Signal-to-Noise Ratio (SNR) of all interfering PUs. Therefore, for a single SU, the probability of detection  $P_D$  and probability of false alarm  $P_{FA}$  are represented by

$$P_D = Pr(Y > \gamma | \mathcal{H}_1) = \mathcal{Q}\left(\frac{\gamma - (N_S + \lambda)}{\sqrt{2(N_S + 2\lambda)}}\right) \quad (3)$$

$$P_{FA} = Pr(Y > \gamma | \mathcal{H}_0) = \mathcal{Q}\left(\frac{\gamma - N_S}{\sqrt{2N_S}}\right) \quad (4)$$

where  $\mathcal{Q}(\cdot)$  is the complementary distribution function of the standard Gaussian. Equations (3) and (4) show that both  $P_D$  and  $P_{FA}$  only depend on the number of sensing samples ( $N_S$ ) and on energy threshold ( $\gamma$ ).

### B. Non-constant PU's behavior

Here we consider the case when PUs change their activity during the entire SUs' frame, which may occur during  $T_S^{SU}$  or  $T_D^{SU}$ . When the change occurs during the spectrum sensing period  $T_S^{SU}$ , two additional spectrum sensing scenarios must be considered. As illustrated in Figure 2(a), during the spectrum sensing task the PU's behavior may change from active to inactive, where the first  $N_G$  slots denote the presence of PUs, and the remaining ones ( $N_G + 1$  to  $N_S$ ) represent the absence of PUs. On the other hand, Figure 2(b) represents the opposite scenario when PU's behavior may change from inactive to active during the spectrum sensing period. The first and second scenarios are respectively represented by the hypotheses  $\mathcal{H}_{10}$  and  $\mathcal{H}_{01}$ . The output of the energy detector is now characterized by four hypothesis, rather than two. The

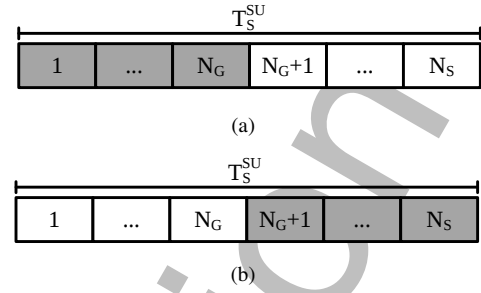


Fig. 2. PU's activity change: (a) from active to inactive; (b) from inactive to active. Gray slots denote PU's activity.

output of the energy detector under the hypothesis  $\mathcal{H}_{01}$  is given by

$$Y_{H_{01}} = \sum_{k=1}^{N_G} |w(k)|^2 + \sum_{k=N_G+1}^{N_S} |w(k) + s(k)|^2. \quad (5)$$

The first summation in (5),  $Y_{H_{01}}^a$ , follows a central Chi-square distribution with  $N_G$  degrees of freedom, while the second summation,  $Y_{H_{01}}^b$ , follows a non-central Chi-square distribution with  $N_S - N_G$  degrees of freedom, and a non centrality parameter  $\lambda$ . If  $2N_G$  and  $N_S - N_G$  are large enough, it is possible to approximate each Chi-square to a Gaussian distribution  $Y_{H_{01}}^a \sim \mathcal{N}(N_G, 2N_G)$  and  $Y_{H_{01}}^b \sim \mathcal{N}(N_S - N_G + \lambda, 2(N_S - N_G + 2\lambda))$  [8]. Assuming that  $Y_{H_{01}}^a$  and  $Y_{H_{01}}^b$  are independent and identically distributed (i.i.d.),  $Y_{H_{01}}$  can be stated as the sum of two Gaussian random variables (r.v.)  $Y_{H_{01}} \sim \mathcal{N}(N_S + \lambda, 2N_S + 4\lambda)$ . Since PUs are only active in  $N_S - N_G$  samples, the SNR  $\lambda$  is given by  $\lambda = (N_S - N_G)\lambda'$ , where  $\lambda'$  represents the SNR collected in each sample when a PU is active. Following the same rationale for the remaining hypothesis, the output of the energy detector considering the four hypothesis is written as:

$$Y \sim \begin{cases} \mathcal{N}(N_S, 2N_S), & \mathcal{H}_{00} \\ \mathcal{N}(N_S + \lambda' N_G, 2(N_S + 2\lambda' N_G)), & \mathcal{H}_{10} \\ \mathcal{N}(N_S + \lambda'(N_S - N_G), 2N_S + 4\lambda'(N_S - N_G)), & \mathcal{H}_{01} \\ \mathcal{N}(N_S + \lambda, 2(N_S + 2\lambda)), & \mathcal{H}_{11}. \end{cases} \quad (6)$$

Under the hypothesis  $\mathcal{H}_{10}$  a PU is not active in the end of the sensing period and the probability of false alarm is given by

$$P_{FA}^{H_{10}} = Pr(Y > \gamma | \mathcal{H}_{10}) = \mathcal{Q}\left(\frac{\gamma - N_S - N_G \lambda'}{\sqrt{4N_G \lambda' + 2N_S}}\right). \quad (7)$$

On the other hand, under the hypothesis  $\mathcal{H}_{01}$  a PU is always active at the end of the sensing period. In this case the probability of detection is given by

$$P_D^{H_{01}} = Pr(Y > \gamma | \mathcal{H}_{01}) = \mathcal{Q}\left(\frac{\gamma - N_S - \lambda'(N_S - N_G)}{\sqrt{2N_S + 4\lambda'(N_S - N_G)}}\right). \quad (8)$$

### C. PU activity model

To model the PU's activity, we consider the periodic channel sampling process described in Section II, which is modeled by the Markov chain illustrated in Figure 3. Considering the stationary behavior of a PU during a SU's frame, we can derive the probabilities of a PU changing its behavior to active and

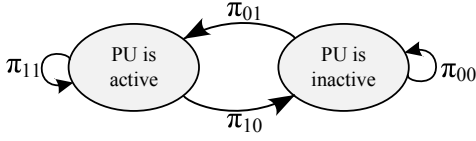


Fig. 3. A two state birth-death process describing the PU activity model.

inactive,  $\pi_{01}$  and  $\pi_{10}$ , respectively, or maintaining its behavior inactive or active,  $\pi_{00}$  or  $\pi_{11}$ , respectively. These probabilities are given by

$$\begin{aligned} \pi_{10} &= \frac{1}{\delta N_T P_\beta}, & \pi_{11} &= 1 - \pi_{10}, \\ \pi_{01} &= \frac{P_\alpha}{\delta N_T (1 - P_\beta)}, & \pi_{00} &= 1 - \pi_{01}, \end{aligned} \quad (9)$$

where  $P_\alpha$  and  $P_\beta = 1 - P_\alpha$  represents the steady-state probabilities of a node staying OFF and ON, respectively.

### III. INTERFERENCE CAUSED TO PUS

During a SU's frame, the Markov chain represented in Figure 3 have up to  $N_T$  realizations. Since the frame length of the SUs is such that at most once PU's behavior change is observed during a SU's frame, the  $N_T$  realizations of the Markov chain do not consider the cases when two or more changes can occur with probability

$$\begin{aligned} P_\chi &= 1 - \pi_{11}^{N_T} - \pi_{00}^{N_T} - \sum_{k=0}^{N_T-1} \pi_{00}^k \cdot \pi_{01} \cdot \pi_{11}^{N_T-k-1} - \\ &\quad - \sum_{k=0}^{N_T-1} \pi_{11}^k \cdot \pi_{10} \cdot \pi_{00}^{N_T-k-1}. \end{aligned} \quad (10)$$

We start describing the different scenarios that contribute to the PU's throughput, which are summarized as follows:

A) a PU is active when the SU's frame begins and it goes inactive until the end of the sensing period. Since the SU is not transmitting during the spectrum sensing period, the PU's transmission will not be interfered by SUs. Then, the expected value of PU's throughput is<sup>1</sup>

$$E[S_A] = \frac{P_\beta}{P_\chi} \sum_{k=1}^{N_S} \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \pi_{11}^k \cdot \pi_{10} \cdot \pi_{00}^{N_T-k-1}; \quad (11)$$

B) a PU is active when the SU's frame begins and it changes its state during the SU's transmission period. In this case the success of the PU's transmission depends on the probability of detection, i.e., if the SU is able to detect the PU during the sensing period:

$$\begin{aligned} E[S_B] &= \frac{P_\beta}{P_\chi} \cdot \pi_{11}^{N_S} \cdot \sum_{k=1}^{N_T-N_S-1} \pi_{11}^k \cdot \pi_{10} \cdot \\ &\quad \cdot \pi_{00}^{N_T-N_S-k-1} \left(N_S + \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot P_D\right); \end{aligned} \quad (12)$$

C) a PU is active during the entire SU's frame. In this case the success of the PU's transmission also depends on the probability of detection and the throughput is

$$E[S_C] = \frac{P_\beta}{P_\chi} \cdot N_T \cdot \pi_{11}^{N_T} \cdot P_D; \quad (13)$$

D) a PU is inactive when the SU's frame begins, and it goes active during the SU's transmission period. Since during

the sensing period SUs do not detect PUs' activity, they start transmitting, interfering with the PU transmission occurring during the transmission period. Consequently, the PU transmission only succeeds under a situation of false alarm:

$$\begin{aligned} E[S_D] &= \frac{P_\alpha}{P_\chi} \cdot \pi_{00}^{N_S} \cdot P_{FA} \cdot \\ &\quad \cdot \sum_{k=1}^{N_T-N_S-1} \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \pi_{00}^{N_T-N_S-k-1} \cdot \pi_{01} \cdot \pi_{11}^k; \end{aligned} \quad (14)$$

E) this case is quite particular and occurs when a PU is inactive when the SU's frame begins, and it goes active during the last slot of the sensing period (slot  $N_S$ ). Considering that the transition slots count for spectrum sensing purposes, PUs will only succeed if SUs consider the spectrum as occupied. This decision is based in a single busy slot. The expected value for the PU's throughput in this case is

$$\begin{aligned} E[S_E] &= \frac{P_\alpha}{P_\chi} \cdot \pi_{00}^{N_S-1} \cdot \pi_{01} \cdot \pi_{11}^{N_T-N_S} \cdot \\ &\quad \cdot \left(N_T - N_S + \frac{1}{2}\right) \cdot P_D^{H_{01}}|_{N_G=N_S-1}; \end{aligned} \quad (15)$$

F) a PU is inactive when the SU's frame begins and it goes active before the end of the spectrum sensing period. In this case the PU's throughput depends on the SU's probability of detection, which is based on the  $N_S - N_G$  slots when the PU is active. The PU's throughput is

$$\begin{aligned} E[S_F] &= \frac{P_\alpha}{P_\chi} \cdot \pi_{11}^{N_T-N_S} \cdot \sum_{k=1}^{N_S-1} \pi_{00}^{N_S-k-1} \cdot \pi_{01} \cdot \\ &\quad \cdot \pi_{11}^k \cdot \left(k + \frac{1}{2} + (N_T - N_S) \cdot P_D^{H_{01}}|_{N_G=N_S-k}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

The expected value for the overall PU's throughput can be written as being the sum of all the partial throughputs over the amount of slots in a SU's frame, i.e.,

$$E[S] = \frac{E[S_A] + E[S_B] + E[S_C] + E[S_D] + E[S_E] + E[S_F]}{N_T}.$$

Because the steady-state probability of a PU staying ON,  $P_\beta$ , represents the maximum achievable PU's throughput, the interference  $I$  caused to PUs can be represented by the following deviation

$$I = 1 - E[S]/P_\beta. \quad (17)$$

### IV. PERFORMANCE EVALUATION

This section characterizes the interference  $I$  caused to PUs under different  $N_S$  and  $\delta$  values.

#### A. Simulation Setup

We have considered a scenario formed by one transmitter-receiver pair of PUs and one transmitter-receiver pair of SUs. The operation mode of PUs and SUs follows the description in Section II. Besides evaluating the impact of different spectrum sensing durations ( $T_S^{SU}/T_F^{SU}$ ) in the PU's throughput, we also analyze the influence of different ratios of PUs and SUs frame durations ( $\delta$ ).

<sup>1</sup>  $\frac{1}{2}$  represents the average throughput of the transition slot.

The parameterization criterion described in [4] was adopted to parameterize the energy detector, which determines the decision threshold  $\gamma$  that equals the access channel probability of the SUs (given by  $\tau_{SU} = (1 - P_\beta)(1 - P_{FA}) + P_\beta(1 - P_D)$ ), to the maximum channel access probability  $1 - P_\beta$ . The remaining simulation parameters are described in Table I.

TABLE I  
PARAMETERS USED IN THE SIMULATIONS.

|            |             |                 |            |
|------------|-------------|-----------------|------------|
| W          | 10 kHz      | Sampling Rate   | 50 $\mu$ s |
| $T_F^{SU}$ | 21.3 ms     | $\lambda$ (SNR) | 5 dB       |
| $\mu_s$    | 3.16 (5 dB) | $\sigma_s^2$    | 1 (0 dB)   |

### B. Validation Results

Figure 4 plots the interference caused to PUs for  $\delta \approx 2.8$ , meaning that the average duration of PUs' frame during the simulations is approx. 2.8 times greater than SUs' frame.  $\delta \approx 7$  and  $\delta \approx 15$  were also considered, and the PU's frame durations were obtained through a truncated exponential distribution. Both simulation and theoretical results (obtained through eq. (17)) are plotted. The figure also includes a curve entitled "Constant PU's behavior", which represents the interference obtained through simulation for  $\delta = 3$ . The results are plotted for  $P_\beta = 0.3$ , but similar results were observed for  $P_\beta = 0.5$  and  $P_\beta = 0.7$ .

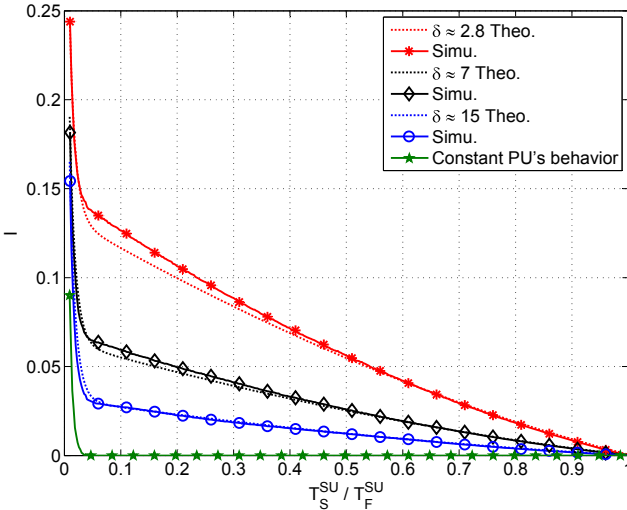


Fig. 4. PU's interference for  $P_\beta = 0.3$ .

As a first remark, the results plotted in Figure 4 indicate that higher values of interference occur when:

- 1) shorter SU frames (smaller  $\delta$  values) are adopted;
- 2) smaller sensing periods ( $T_S^{SU}/T_F^{SU}$ ) are considered.

The first observation is mainly due by the interference caused when PUs start to use the channel without being detected by SUs. Consequently, if SUs have a shorter operation cycle, their impact in terms of PUs' interference will be smaller, because the activity of PUs is detected early. Regarding the second observation, it is easily explained by the fact that a longer sensing period increases the accuracy of the spectrum occupancy decision, which leads to a decrease of the interference caused to PUs.

Comparing the simulation results with the numerical ones it is observed that for small values of  $\delta$ , the model slightly

underestimates the simulations. This is due to the truncated exponential distribution used to sample the duration of the activity of the PUs, which slightly deviates from an exponential distribution as the average ( $\delta$ ) becomes smaller. However, when the PUs frame duration is considerably higher than the SUs frame duration ( $\delta = 7$  or  $\delta = 15$ ), which favors the interference decrease, the model's accuracy is high.

Comparing the interference values for constant ( $\delta = 3$ ) and non-constant PU's behavior ( $\delta \approx 2.8$ ), we observe that when a constant PU's behavior is adopted the interference caused to PUs is negligible for  $T_S^{SU}/T_F^{SU}$  values greater than 5%. However, when PUs change their behavior at most once during the SUs frame duration, the " $\delta \approx 2.8$ " curve shows that PUs suffer approximately 12% of interference for the reference value of  $T_S^{SU}/T_F^{SU} = 10\%$ . This result indicates that the interference models adopted in several works, including but not limited to [3]–[5], underestimate the interference caused to PUs, which can introduce a significant error depending on the system parameters chosen ( $\delta$  and  $T_S^{SU}/T_F^{SU}$ ). Regarding this point, the results highlight that a constant PU's behavior may also be a good approximation, namely when higher values of  $\delta$  are considered. This can be observed for  $\delta \approx 15$ , where the interference caused to PUs is less than 3% when  $T_S^{SU}/T_F^{SU} > 10\%$ .

### V. FINAL REMARKS

In this paper we analyzed the impact of considering that PUs always keep their activity state during the same SU's spectrum sensing task. To evaluate the impact of this approximation, we studied a scenario where a PU changes its activity state at most once during the SU's operation cycle. An analytical model was also derived and its validation was assessed through simulation results. The results presented in this work show that the interference caused to PUs is always underestimated when a constant PUs' behavior is considered, *i.e.*, when a PU does not change its behavior during a SU's frame. However, it is shown that even considering a constant PUs' behavior, the interference caused to PUs can be almost negligible when the frame length of the PUs is too large when compared to the SUs' operation cycle.

### REFERENCES

- [1] IEEE 802.22. Working Group on Wireless Regional Area Networks. <http://ieee802.org/22/>, 2011.
- [2] H. Urkowitz. Energy Detection of Unknown Deterministic Signals. *Proceedings of the IEEE*, 55(4):523–531, April 1967.
- [3] A. Ghasemi and Elvino S. Sousa. Optimization of Spectrum Sensing for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks. In *Proc. IEEE CCNC 2007*, pages 1022–1026, January 2007.
- [4] W.-Y. Lee and I.F. Akyildiz. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(10):3845–3857, October 2008.
- [5] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E.C.Y. Peh, and A.T. Hoang. Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(4):1326–1337, April 2008.
- [6] F.F. Digham, M.-S. Alouini, and M.K. Simon. On the energy detection of unknown signals over fading channels. In *Proc. IEEE ICC 2003*, pages 3575–3579, May 2003.
- [7] H. Tang. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems. In *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pages 151–159, November 2005.
- [8] A. Papoulis and S. Pillai. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 4th edition, 2002.

