



**Luís Miguel do Rosário Irio**

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores

## **Mobilidade em Redes de Rádio Cognitivo**

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

Orientador : Rodolfo Oliveira, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutor Luís Bernardo

Arguente: Doutor Pedro Sebastião

Vogal: Doutor Rodolfo Oliveira



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2013



## **Mobilidade em Redes Rádio Cognitivo**

Copyright © Luís Miguel do Rosário Irio, 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 objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível graças à colaboração e ao contributo, de forma direta ou indireta, de várias pessoas às quais gostaria de exprimir algumas palavras de agradecimento e profundo reconhecimento.

Os meus sinceros agradecimentos ao Professor Rodolfo Oliveira pela notável orientação prestada, pela total disponibilidade demonstrada e pela sua amizade. Sem o seu empenho inexcedível e saudavelmente exigente não teria sido possível realizar esta dissertação. Agradeço ainda a rigorosa e cuidada revisão da escrita desta dissertação.

Agradeço ao meu colega António Furtado, que paralelamente ao seu trabalho de Doutoramento me deu uma preciosa ajuda em toda a dissertação, nomeadamente no Capítulo 5, no qual teve uma grande contribuição.

Por todo apoio prestado e incentivo agradeço aos meus colegas de laboratório e a todos aqueles que frequentaram comigo o curso na FCT-UNL.

Um agradecimento muito especial à minha família, nomeadamente aos meus pais, irmã e avós, que em todos os momentos foram um estímulo e um apoio constante, agradeço a sua enorme compreensão, generosidade e carinho.

Quero agradecer à minha Tia Esmeralda e ao Tio Paulo, que durante o meu percurso académico estiveram sempre a meu lado.

Agradeço à minha namorada, pelo amor incondicional, ouvinte atenta de algumas dúvidas, inquietações, desânimos e sucessos, pelo apoio, pela confiança e pela valorização sempre tão entusiasta do meu trabalho, dando-me, desta forma, coragem para ultrapassar todas as barreiras que surgiram ao longo desta dissertação. Gostaria ainda de dar uma palavra de apreço aos seus pais.

Quero realçar o muito amável apoio da minha Mãe, que se materializou em mil porme-

nores de atenção, com uma imensa solicitude. Por ser uma referência para mim, devo-lhe tudo na vida.

Obrigado.

# Sumário

Os elevados débitos de tráfego justificados pelo aumento exponencial do número de dispositivos sem fios, tem agravado o problema de escassez de espectro eletromagnético. Para além disto, as políticas desatualizadas de gestão de espectro têm conduzindo a que grande parte do espectro licenciado seja severamente subutilizado. As redes de rádio cognitivo surgem como uma solução para otimizar o uso do espectro eletromagnético, permitindo que os utilizadores não licenciados utilizem as frequências licenciadas, aumentando desta forma a sua taxa de utilização.

De modo a minimizarem a interferência causada aos utilizadores licenciados, os rádios cognitivos realizam tarefas de *sensing*. Nesta dissertação admite-se que os utilizadores não licenciados utilizam *sensing* baseado em detetores de energia. Este trabalho começa por descrever os passos seguidos para parametrizar o detetor de energia, de modo a limitar a interferência causada aos utilizadores licenciados.

O principal objetivo desta dissertação é o estudo do efeito da mobilidade dos utilizadores licenciados na tarefa de *sensing*. De modo a obter um padrão de movimento nos utilizadores licenciados, considera-se o modelo de mobilidade *Random Waypoint* validando-se a sua distribuição espacial dos nós. Avalia-se depois o impacto da mobilidade dos utilizadores licenciados através das probabilidades de falso alarme e de deteção, de acordo com a parametrização efetuada para o limiar de decisão.

Conclui-se com esta dissertação que a mobilidade dos utilizadores licenciados melhora a capacidade de *sensing*, ou seja, que a probabilidade de deteção aumenta com o aumento da mobilidade dos nós licenciados. A principal justificação para esta observação é devido ao facto da distribuição espacial dos nós variar com a velocidade dos nós, aumentando a capacidade de deteção de nós licenciados quando a sua mobilidade é mais elevada.

**Palavras Chave:** Redes de Rádio Cognitivo, Deteção baseada em Energia, Mobilidade.





# Abstract

The growing amount of wireless traffic justified by the exponential increase in the number of wireless devices has amplified the problem of scarcity of the electromagnetic spectrum. In addition, outdated policies for spectrum management have led to much of the licensed spectrum is severely underutilized. The cognitive radio networks emerge as a solution to optimize the use of the electromagnetic spectrum, allowing unlicensed users to operate in licensed frequencies, thus increasing its utilization.

In order to minimize the interference caused to licensed users, cognitive radios frequently perform spectrum sensing. This work starts assuming energy-based spectrum sensing, and begins describing the steps taken to parameterize the energy detector in order to limit the interference caused to licensed users.

The main objective of this thesis is to study the effect of mobility of licensed users in the sensing task. The Random Waypoint model was considered to generate the nodes mobility pattern and the spatial distribution of the nodes was validated for the same model. The impact of the mobility of licensed users in the sensing task is then characterized through the probabilities of detection and false alarm.

The main achievement of this work is that the level of mobility of the licensed users may change the sensing outputs, meaning that the probability of detection increases when the average speed of the licensed users also increase. The main reason for this observation is due to a change in the spatial distribution of the nodes, which varies with their average speed, increasing the capacity of detection of the licensed nodes when their mobility is higher.

**Keywords:** Cognitive Radio Systems, Energy-based Sensing, Mobility.



# Acrónimos

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

**AWGN** *Additive White Gaussian Noise*

**MPB** *Multiple PU for Band*

**PDF** *Probability Density Function*

**PrR** *Protection Range*

**PU** *Primary User*

**RWPM** *Random Waypoint mobility Model*

**RWM** *Random Walk mobility Model*

**RVs** *Variáveis Aleatórias*

**SDR** *Software-Defined Radio*

**SPB** *Single PU for Band*

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

**SU** *Secondary User*



# Conteúdo

<b>Agradecimentos</b>	<b>iii</b>
<b>Sumário</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	3
1.3 Objetivos e Contribuições . . . . .	3
1.4 Estrutura da Dissertação . . . . .	4
<b>2 Trabalho Relacionado</b>	<b>7</b>
2.1 Redes de Rádio Cognitivo . . . . .	7
2.2 Modelos de Mobilidade . . . . .	8
2.3 Técnicas de <i>Sensing</i> . . . . .	10
2.4 Mobilidade e <i>Sensing</i> . . . . .	14
<b>3 Mobilidade</b>	<b>17</b>
3.1 Descrição do Cenário e Modelo Considerado . . . . .	17
3.2 Descrição da Distribuição Espacial dos Nós . . . . .	18
3.3 Validação da Distribuição Espacial . . . . .	21
<b>4 Validação de Energia</b>	<b>25</b>
4.1 Comportamento dos Utilizadores Primários . . . . .	25
4.2 Detetor de Energia . . . . .	26
4.3 Caracterização da Energia Recebida pelo SU . . . . .	28
<b>5 Parametrização do Detetor de Energia</b>	<b>33</b>
5.1 Descrição do Cenário . . . . .	33

5.2	Desempenho do Detetor de Energia . . . . .	36
5.3	Parametrização do Limiar de Energia . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Caracterização de Desempenho</b>	<b>39</b>
6.1	Mobilidade dos Utilizadores Primários . . . . .	39
6.2	Desempenho do Limiar de Energia . . . . .	42
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>45</b>
7.1	Considerações Finais . . . . .	45
7.2	Trabalho Futuro . . . . .	46
	<b>Bibliografia</b>	<b>48</b>

# Lista de Figuras

2.1	Movimento <i>Random Waypoint</i> [BHPC04]. . . . .	10
3.1	Distribuição teórica espacial dos nós - resultados teóricos. . . . .	20
3.2	Validação da distribuição espacial dos nós. . . . .	21
3.3	Comparação de valores teóricos e simulados da distribuição espacial dos nós ( $x = 50$ m). . . . .	22
3.4	Comparação de valores teóricos e simulados da distribuição espacial dos nós ( $x = 250$ m). . . . .	22
3.5	Comparação de valores teóricos e simulados da distribuição espacial dos nós ( $x = 450$ m). . . . .	23
4.1	Esquema de blocos do detetor de energia. . . . .	27
4.2	Valores de energia para $\mathcal{H}_0$ e $\mathcal{H}_1$ . . . . .	30
4.3	Valores de energia para diferentes $P_{on}$ . . . . .	31
4.4	Valores de energia para diferentes números de utilizadores. . . . .	31
5.1	Distribuição dos PUs em torno do SU. . . . .	34
6.1	$P_D$ e $P_{FA}$ para diferentes valores de velocidade. . . . .	40
6.2	Distribuição espacial dos nós (velocidade média = 2 m/s). . . . .	41
6.3	Distribuição espacial dos nós (velocidade média = 10 m/s). . . . .	41
6.4	Energia para $\mathcal{H}_1$ e $\mathcal{H}_0$ , para diferentes valores de velocidade. . . . .	42
6.5	Densidades médias para diferentes distribuições (RWPM e <i>Poisson</i> ). . . . .	43
6.6	$P_D$ e $P_{FA}$ em função do limiar encontrado. . . . .	44





# Lista de Tabelas

6.1	Probabilidades de detecção considerando o limiar definido. . . . .	44
-----	--	----



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Introdução

Com o avanço da tecnologia e consequente desenvolvimento de equipamentos que utilizam comunicações sem fios, existe um maior número de dispositivos a utilizar o espectro radioelétrico. A crescente utilização do espectro e a progressiva necessidade de disponibilizar novos serviços de comunicações móveis em qualquer lugar e com maiores débitos de transmissão estão cada vez mais limitados ao espectro radioelétrico disponível.

Atualmente o espectro disponível é muito escasso e a sua gestão em termos de utilização constitui um grande desafio para as agências regulamentadoras, como por exemplo, a FCC (Federal Communications Commission) nos Estados Unidos e a ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações) em Portugal. Esta escassez dificulta a implementação de novos sistemas e serviços de comunicações sem fios, nomeadamente sistemas de banda larga.

Para além do espectro ser um recurso muito escasso, o acesso ao espectro de rádio é ainda muito estático, sendo restringido por um regime de regulamentação de comando e controlo manifestamente desadequado à realidade atual. Como consequência, uma grande parte do espectro rádio é atribuído a serviços rádio licenciados e somente uma pequena fração do espectro de rádio é de livre acesso, onde a operação dos terminais não necessita de ser previamente licenciada.

Desta forma, o espectro de frequências do tipo licenciado só pode ser acedido por dispositivos de determinadas tecnologias e/ou quando possuem uma licença de operação para utilizar aquela faixa do espectro numa dada região geográfica. Estas faixas de espectro,

que na atualidade são a maioria do espectro de frequências, permanecem pouco utilizadas durante determinados instantes de tempo, ou até mesmo sem utilização na maioria das regiões [Com03]. Este problema está na maioria das vezes relacionado com o "acesso ao espectro", e não com a escassez de espectro. Assim, uma das alternativas para a escassez de espectro passa por permitir o acesso dinâmico a outros sistemas em bandas licenciadas subutilizadas, sempre que o titular da licença não utilize o espectro na totalidade [ALVM06].

Uma tecnologia que possibilita a adoção destes modelos diferenciados de acesso ao espectro, são as redes de Rádio Cognitivo. O rádio cognitivo tem o potencial de solucionar o problema do uso ineficiente do espectro radioelétrico, pois é capaz de detetar a presença de utilizadores licenciados na região e determinar as faixas do espectro licenciado que estão livres.

O desenvolvimento da tecnologia de rádio cognitivo foi facilitado com a introdução do conceito *Software-Defined Radio* (SDR). O conceito SDR consiste em aproximar o *software* à camada de *hardware* de forma a que suas características de operação, tais como, frequência central, potência de transmissão, largura de banda e tipo de modulação, sejam ajustadas sem a necessidade de modificações de *hardware* [M<sup>+</sup>00]. Utilizando as funcionalidades dos sistemas SDR, o rádio cognitivo pode configurar suas características de operação para utilizar as faixas livres do espectro, também denominadas oportunidades de acesso ao espectro, sem causar interferência prejudicial ao funcionamento dos utilizadores licenciados presentes naquela região [ALVM06]. Assim, estes dispositivos utilizam dinamicamente e de maneira oportunista as faixas de espectro licenciado que estão livres, melhorando a eficiência na utilização do espectro.

Devido à sua característica oportunista e não prioritária de acesso ao espectro licenciado, os utilizadores cognitivos são usualmente denominados utilizadores secundários. Já os utilizadores licenciados, que possuem prioridade no acesso ao espectro, são denominados utilizadores primários. Ao longo do texto, os termos secundários e primários serão utilizados respetivamente como sinónimo para utilizadores cognitivos e utilizadores licenciados.

## 1.2 Motivação

Os rádios cognitivos têm potencial para solucionar o atual problema de escassez de espectro, que representa uma limitação para a evolução das tecnologias baseadas em transmissão sem fios. Através do acesso oportunista às faixas licenciadas do espectro, os rádios cognitivos podem aumentar a eficiência na utilização deste recurso.

Uma vez que os sistemas sem fios são sistemas móveis, a natureza do movimento (velocidade, direção, etc.) dos utilizadores tem um impacto significativo no desenho das redes móveis atuais. É, portanto, de extrema importância estudar um modelo de mobilidade que represente bem a realidade ou que pelo menos, represente as características mais relevantes da mobilidade dos utilizadores reais. Este facto motiva o estudo da mobilidade segundo o modelo *Random Waypoint*.

De modo a que os rádios cognitivos consigam utilizar o espectro licenciado sem que provoquem interferência aos utilizadores primários, devem conseguir detetar o sinal transmitido pelos utilizadores primários. Para isso são propostas na literatura várias técnicas de *sensing*, em que uma delas é a técnica de *sensing* baseada em deteção de energia. Esta técnica é vantajosa por possuir uma baixa complexidade de implementação e execução, e de não necessitar de informação acerca do sistema de comunicação utilizado pela rede licenciada. Desta forma estuda-se o detetor de energia e realiza-se uma validação da energia que é recebida pelo utilizador secundário.

O desempenho da técnica de *sensing* baseada no detetor de energia está dependente do limiar de energia definido. Este facto motiva o estudo da parametrização do detetor de energia. Finalmente caracteriza-se o desempenho da mobilidade dos utilizadores primários na tarefa de *sensing*.

## 1.3 Objetivos e Contribuições

Esta dissertação tem como objetivo central a avaliação do impacto da mobilidade em redes de rádio cognitivo. Numa primeira fase, pretende-se analisar a mobilidade dos utilizadores primários. Para o efeito é definida uma determinada área de simulação, onde os nós se movem segundo o modelo de mobilidade *Random Waypoint* (RWPM). Este

trabalho caracteriza depois a distribuição espacial dos nós comparando-a com um modelo teórico proposto por outros autores, (Capítulo 3). Após serem gerados os cenários do modelo considerado, foi desenvolvido um programa que fornece a posição de cada um dos nós em cada segundo de simulação.

De seguida, investiga-se o comportamento dos utilizadores primários, de modo a caracterizar as distribuições da energia associada à transmissão, e assim ser possível aplicar a técnica de *sensing* baseada em energia. De forma a aplicar a técnica de *sensing* baseada em energia realiza-se a caracterização da energia recebida dos utilizadores para diversos parâmetros de simulação.

De forma a parametrizar o limiar de decisão e, tendo em conta que o utilizador secundário recebe interferência provocada por todos os utilizadores primários, pretende-se caracterizar a interferência agregada para encontrar as expressões teóricas da probabilidade de falso alarme e de deteção.

Tendo em conta que o objetivo principal é caracterizar o efeito da mobilidade, pretende-se fazer uma comparação das probabilidades de deteção e de falso alarme para vários cenários de mobilidade.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. No Capítulo 2 (“Trabalho Relacionado”) é realizado um levantamento bibliográfico dos modelos de mobilidade adotados em redes de telecomunicações. São apresentados os modelos de mobilidade existentes e o modelo *Random Waypoint* é descrito de uma forma mais detalhada. São ainda apresentados os conceitos de rádio cognitivo, assim como os principais métodos de *sensing*. Na última secção deste capítulo analisam-se alguns trabalhos que já estudaram o efeito da mobilidade na tarefa de *sensing*.

No Capítulo 3 (“Mobilidade”) começa-se por descrever o cenário e o modelo considerado para a mobilidade dos nós. De seguida introduz-se um trabalho de referência que justifica teoricamente a distribuição espacial dos nós. O Capítulo 4 (“Validação de Energia”) está dividido em três secções. Na primeira secção analisa-se o comportamento dos utilizadores primários na transmissão, avaliando as distribuições do sinal à saída do

detetor de energia. Na secção seguinte descreve-se a técnica de *sensing* baseada no detetor de energia. Na secção final caracteriza-se a energia recebida pelos utilizadores secundários para diferentes níveis de atividade dos utilizadores primários.

No Capítulo 5 ("Parametrização do detetor de Energia"), na primeira secção, é descrito o cenário considerado para parametrizar o detetor de energia e são deduzidas as expressões para encontrar uma distribuição que represente a interferência agregada. Na última secção são deduzidas as probabilidades de falso alarme e de deteção, encontrando desta forma a expressão para o valor do limiar de decisão.

No Capítulo 6 ("Caracterização de Desempenho") é avaliado o desempenho da mobilidade dos utilizadores primários na tarefa de *sensing*. São avaliadas as probabilidades de deteção e de falso alarme para diferentes cenários de mobilidade e é avaliado o desempenho do limiar de decisão encontrado.

Finalmente no Capítulo 7 ("Conclusões") é realizada uma análise global do trabalho realizado. São apresentadas as principais contribuições do trabalho, assim como as questões em aberto e conseqüente trabalho futuro.





## Capítulo 2

# Trabalho Relacionado

### 2.1 Redes de Rádio Cognitivo

Com o decorrer do tempo, as bandas de frequência associadas a aplicações específicas foram ocupando muito do espectro de rádio utilizável, tornando este recurso cada vez mais escasso. No entanto, o crescimento de aplicações e dispositivos que utilizam o espectro de forma mais intensiva, não foi acompanhado por um aumento de eficiência na utilização do espectro. Desta forma, o rádio cognitivo poderá ser uma solução efetiva para mudar o modo como o espectro é utilizado, aumentando a eficiência da sua utilização.

O funcionamento básico das redes cognitivas reside na reutilização de uma vasta parte do espectro que está disponível quando ambas as dimensões de espaço e tempo são consideradas, ou seja, a rede cognitiva procura bandas no espectro de modo a dar aos seus utilizadores a oportunidade de acederem ao meio sem fios.

Numa rede de rádios cognitivo, os dispositivos que são capazes de analisar o ambiente onde "vivem", raciocinar acerca deste ambiente, tomar decisões e aprender com os resultados dessas decisões, são geralmente intitulados de "rádios cognitivos". São portanto estes dispositivos que caracterizam o espectro e que são capazes de definir o seu estado de ocupação através de operações de observação aqui denominadas de *sensing*.

Na literatura foram definidos diferentes modelos de funcionamento de redes rádio cognitivo. Em [Gol09] são considerados três modelos diferentes:

- **Underlay (Coexistência partilhada temporalmente):** Neste modelo os utilizadores secundários (não licenciados) têm permissão para transmitir simultaneamente

com os utilizadores primários, desde que a interferência causada pelos utilizadores secundários não exceda um limiar aceitável.

- **Overlay (Cooperação):** Também neste modelo os utilizadores cognitivos têm permissão para transmitir simultaneamente com os utilizadores licenciados, mas aqui os utilizadores cognitivos são permanentemente informados, através da receção de mensagens com a informação de qual deve ser a potência utilizada na transmissão. Estas mensagens são enviadas pelos utilizadores primários e têm como objetivo evitar ou minimizar a interferência.
- **Interweave (Coexistência com exclusividade temporal):** Este paradigma é baseado na ideia de uma comunicação oportunista, onde os utilizadores cognitivos são capazes de detetar espaços livres no espetro e transmitem apenas nesses espaços.

## 2.2 Modelos de Mobilidade

Um modelo de mobilidade tem como objetivo recrear o movimento real dos nós. Nestes modelos de mobilidade a alteração da velocidade e direção dos nós devem seguir padrões que se aproximem de um processo de mobilidade real. Ou seja, os nós não devem deslocar-se em linhas retas, com velocidades constantes durante toda a simulação, porque os nós não se deslocam de uma forma tão restrita na maior parte dos cenários reais.

De uma forma geral, existem duas famílias de modelos de mobilidade usados na simulação de redes: modelos baseados em *traces* e modelos sintéticos.

Os *traces* são padrões de mobilidade que podem ser observados em sistemas reais, fornecem informação precisa, especialmente quando envolvem um longo número de nós, e são apropriados para períodos de observação longos.

Os modelos sintéticos tentam representar realisticamente o comportamento dos nós sem utilizar *traces*. Normalmente este tipo de modelos baseiam-se em determinadas sequências de comportamentos (velocidades, destinos, tempos de pausa, etc.) amostrados a partir de distribuições de probabilidade previamente definidas.

O trabalho apresentado em [CBD02] identifica seis modelos de mobilidade:

- **Random Walk:** Modelo de mobilidade simples, baseado na escolha de direções e

velocidades aleatórias, numa área de simulação finita.

- **Random Waypoint:** Este modelo de mobilidade inclui tempos de pausa entre cada escolha de posição de destino e velocidade.
- **Boundless Simulation area:** Este modelo converte uma área de simulação retangular 2D numa área de simulação em forma toroidal, onde a posição do ponto de destino não é limitado pela área de simulação.
- **Gauss-Markov:** O modelo utiliza um parâmetro que dá a hipótese de variar o grau de aleatoriedade da mobilidade padrão.
- **Probabilistic version of the Random Walk:** Este modelo baseia-se num conjunto de regras descritas através da combinação de várias probabilidades que determinam a próxima posição do nó.
- **City Section:** Neste modelo a área de simulação representa ruas de uma dada região de uma cidade, estando a mobilidade dos nós restringida às ruas definidas.

O modelo de mobilidade mais popular e frequentemente utilizado em diversos estudos é o modelo *Random Waypoint* (RWPM). Este modelo é implementado em diversas ferramentas de simulação, tais como o ns-2 e GloMoSim, e é utilizado para analisar o desempenho de vários protocolos de rede [BHPC04]. Este trabalho também adota o modelo de mobilidade RWPM.

O modelo RWPM descreve o movimento dos nós da rede, dentro de uma determinada área de simulação, da seguinte forma (ver Figura 2.1): cada nó escolhe aleatoriamente um ponto de destino (*Waypoint*) e uma velocidade constante, uniformemente distribuída no intervalo  $[V_{min}, V_{max}]$ . Após isso, move-se para o seu destino à velocidade estipulada. Uma vez chegado ao local de destino, um nó cumpre um determinado tempo de pausa, também ele uniformemente distribuído. Terminado o tempo de espera volta a procurar um novo destino para o qual se move com uma nova velocidade [BHPC04].

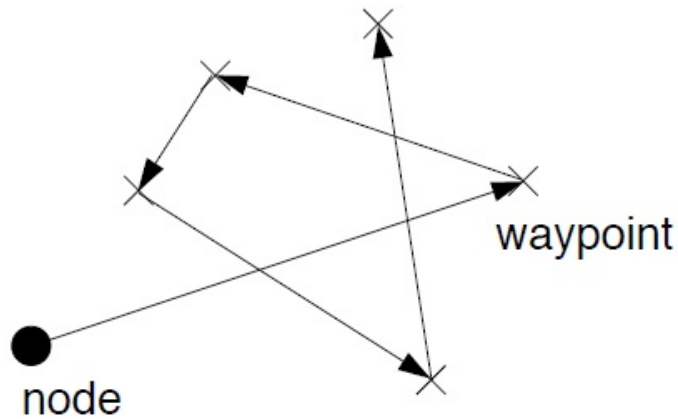


Figura 2.1: Movimento *Random Waypoint* [BHPC04].

### 2.3 Técnicas de *Sensing*

A detecção do estado de ocupação do espectro é um dos pontos mais importantes nas redes de rádio cognitivo. A oportunidade do espectro é definida pela existência de uma banda de frequências nas quais não existe nenhum utilizador primário, num determinado instante temporal e numa determinada área geográfica.

Apresentam-se várias técnicas de *sensing* para rádios cognitivos. Estas técnicas pretendem detetar se existem ou não utilizadores licenciados a utilizar o espectro [YA09].

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

O *sensing* baseado na detecção de energia é das técnicas de *sensing* mais comuns, uma vez que a complexidade computacional e de implementação são muito baixas.

Assumindo que o sinal recebido se apresenta na forma:

$$x(n) = s(n) + w(n), \quad (2.1)$$

onde  $s(n)$  é a amplitude do sinal do utilizador primário a ser detetado,  $w(n)$  é a amplitude do ruído aditivo branco gaussiano (*Additive White Gaussian Noise* - AWGN) e  $n$  é o índice de uma amostra.

Quando  $s(n) = 0$ , significa que não existe transmissão do utilizador primário e define-se como hipótese  $\mathcal{H}_0$ . Por outro lado, a hipótese  $\mathcal{H}_1$  corresponde ao cenário em que o

utilizador primário está a utilizar a banda.

Assim, o sinal recebido por um nó que pretende caracterizar a ocupação do espectro resume-se a duas hipóteses:

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_0 : x(n) &= w(n), \\ \mathcal{H}_1 : x(n) &= s(n) + w(n),\end{aligned}\tag{2.2}$$

A energia do sinal recebido no detetor de energia é dada pela seguinte expressão:

$$Y = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2.\tag{2.3}$$

Tendo em conta a energia do sinal medida pelo rádio cognitivo,  $Y$ , esta é comparada com um determinado limiar fixo  $\lambda_E$ .

O desempenho da deteção do algoritmo pode ser resumido através de duas probabilidades: probabilidade de deteção,  $P_D$ , e probabilidade de falso alarme,  $P_{FA}$ :

$$P_D = P_r(Y > \lambda_E | \mathcal{H}_1),\tag{2.4}$$

$$P_{FA} = P_r(Y > \lambda_E | \mathcal{H}_0).\tag{2.5}$$

A probabilidade  $P_D$  corresponde à situação em que a energia do sinal recebido ( $Y$ ) é superior ao limiar  $\lambda_E$ , quando o sinal recebido  $x(n)$  é constituído pela soma da energia do ruído AWGN com a do sinal enviado pelo emissor primário. A probabilidade  $P_{FA}$  ocorre quando a energia do sinal recebido ( $Y$ ) é maior que o limiar  $\lambda_E$  e, quando o sinal recebido  $x(n)$  é apenas constituído pelo ruído AWGN [YA09].

A escolha do valor de  $\lambda_E$  é realizada de modo a obter um bom compromisso entre as probabilidades  $P_D$  e  $P_{FA}$ . Para isso, é necessário conhecer a potência do ruído e a potência do sinal enviado pelo emissor primário. [LFO<sup>+</sup>12] sugere vários métodos para parametrizar  $\lambda_E$  e [LFO<sup>+</sup>13] estuda o impacto de  $\lambda_E$  nos utilizadores primários.

A potência do ruído pode ser determinada, mas a potência do sinal é difícil de estimar, devido aos efeitos a que o sinal está sujeito na transmissão (perdas de propagação, desvanecimento, etc.). Assim o parâmetro  $\lambda_E$  é escolhido de forma a cumprir uma determinada

probabilidade de falso alarme, ou uma determinada probabilidade de detecção [LJSK05]. O ruído aditivo branco é modelado por uma variável aleatória com distribuição Gaussiana, com média nula e variância  $\sigma_w^2$  ( $w(n) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_w^2)$ ). Por sua vez o sinal do utilizador primário pode ser modelado por uma variável aleatória com distribuição Gaussiana, com média  $\mu_s$  e variância  $\sigma_s^2$ .

Deve-se ter em conta que a performance do detetor de energia piora com a diminuição da relação sinal-ruído. Quanto menor forem os valores de SNR (Signal-to-Noise Ratio), menor será o desempenho em termos de probabilidade de detecção, ou seja, é cada vez mais difícil de distinguir o sinal do ruído.

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

A técnica de *sensing* baseada na forma de onda é apenas aplicável em sistemas onde é possível conhecer os vários padrões de sinal. Na maior parte das vezes estes padrões são utilizados para sincronização, como é o caso dos sistemas *wireless*. Pode dar-se como exemplo preâmbulos, *midambles*, padrões de regulação de transmissão, etc. [YA09].

Tomando o sinal recebido,  $x(n)$ , a métrica de *sensing* baseada na forma de onda é determinada por [Tan05]

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

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

$$M = \mathcal{Re} \left[ \sum_{n=1}^N w(n)s^*(n) \right]. \quad (2.7)$$

Caso o sinal recebido contenha algum sinal de um utilizador primário, então pela expressão (2.7) vem

$$M = \sum_{n=1}^N |s(n)|^2 + \mathcal{Re} \left[ \sum_{n=1}^N w(n)s^*(n) \right], \quad (2.8)$$

de onde se sabe que  $M$  será tanto maior quanto mais correlacionado  $x(n)$  estiver com

o padrão  $s(n)$ . Depois da comparação de  $M$  com um determinado limiar  $\lambda_W$ , pode-se concluir se existe ou não sinal de utilizadores primários no sinal recebido.

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

A técnica de *sensing* baseada na ciclo-estacionariedade apoia-se no facto de muitos dos sinais utilizados nas comunicações sem fios serem ciclo-estacionários (ex. radar), contrariamente ao que ocorre com o ruído que é estacionário. Um determinado sinal é ciclo-estacionário quando a média e a função auto-correlação são periódicas com período  $T_0$ , ou seja:

$$\begin{aligned} m_x(t) &= m_x(t + kT_0), \\ R_x(t + t, t) &= R_x(t + t + kT_0, t + kT_0). \end{aligned} \tag{2.9}$$

É assim possível diferenciar-se o ruído dos sinais dos utilizadores primários, devido ao facto do ruído não ser ciclo-estacionário. O ruído terá correlação aproximadamente nula quando modulado com sinais ciclo-estacionários [CB05]. Com esta técnica existe ainda a possibilidade de distinguir sinais transmitidos por múltiplos utilizadores primários [LKHP07].

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

O principal objetivo desta técnica de *sensing* é identificar alguma das tecnologias que o rádio cognitivo conhece, de modo a que este possa comunicar a partir desta. Tal identificação permite a um rádio cognitivo com elevada dimensão de conhecimento fornecer uma grande precisão [YA06].

Para esta técnica, citada em [YA09], há dois cenários principais. Num primeiro cenário, o rádio cognitivo procura dentro da 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 determinado modo de transmissão.

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

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

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(n-k)x(k), \quad (2.10)$$

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  $h(k)$  [SB11].

## **2.4 Mobilidade e *Sensing***

Através do trabalho realizado em [CAP11] é possível compreender quais são os efeitos da mobilidade dos utilizadores primários na tarefa de *sensing*. Com esse objetivo analisaram-se duas métricas de desempenho:

- **Capacidade de deteção**, que mede o impacto da mobilidade do utilizador primário na probabilidade de deteção.
- **Capacidade de *sensing***, representada pela máxima capacidade de transmissão de um utilizador secundário na presença de mobilidade dos utilizadores primários. Esta capacidade de *sensing* representa a probabilidade de transmissão de um utilizador secundário, perante a mobilidade de utilizadores primários.

Esta análise é realizada para dois modelos de mobilidade, o modelo *Random Walk* (RWM) e *Random Waypoint* (RWPM). Além destes dois modelos, consideram-se dois modelos de ocupação do espectro dos utilizadores primários. O primeiro modelo denomina-se *Single PU for Band* (SPB), onde cada um dos utilizadores primários utiliza uma banda de frequência diferente. O segundo modelo é designado *Multiple PU for Band* (MPB), onde diferentes PUs em mobilidade podem utilizar a mesma banda.



Pela definição de [CAP11], um utilizador secundário (CR) está dentro do alcance de proteção (PrR) do utilizador primário (PU) se a distância Euclidiana  $S_{PU}^{CR}$  entre eles não for maior que a distância  $R$ , ou seja,  $S_{PU}^{CR} = |X_{CR} - X_{PU}| \leq R$ . Através desta definição, os autores apresentam fórmulas fechadas para a probabilidade de um utilizador estar dentro do alcance de proteção do PU ( $P(I)$ ) para os diversos cenários. Considerando esta probabilidade, foi ainda possível determinar a capacidade de transmissão esperada por um CR ( $C_i^{mob}$ ), na banda do espectro  $i$ , e considerando PUs móveis.

Para validação dos resultados teóricos considerou-se uma região bidimensional  $A$  ( $a \times a$ ) e, para facilitar a análise dos resultados, utilizou-se a região PrR normalizada ( $\frac{R}{a}$ ). Tendo em conta estas suposições, [CAP11] conclui que a capacidade de deteção aumenta com o aumento de  $\frac{R}{a}$ , uma vez que a probabilidade de um CR estar dentro do PrR do PU também aumenta. Além disto, conclui-se que a mobilidade do PU introduz um ganho significativo na capacidade transmissão de um CR, sendo que a capacidade de transmissão no cenário móvel ( $C_i^{mob}$ ) é no pior dos casos 44% maior que a capacidade do sistema quando os nós estão estáticos (não móveis).

Através de [AM10] também se compreende como a mobilidade melhora a capacidade de *sensing* mas, neste caso, assumindo mobilidade dos utilizadores secundários. Explorando a diversidade espacial que advém da mobilidade, o utilizador secundário recolhe várias amostras em diferentes locais, podendo desta forma alcançar um resultado idêntico aos sistemas de *sensing* que utilizam informação de múltiplos sensores para basear a sua decisão (*sensing* cooperativo).

Para que seja possível realizar uma deteção com mobilidade do CR num determinado meio ambiente e a uma certa velocidade, o CR deve saber qual o número mínimo de amostras que deve recolher. Para determinar esses valores, [AM10] considera um cenário em que um CR se move com uma determinada velocidade  $v(m/s)$ , realiza *sensing* num tempo  $T$  e, recolhe  $S$  amostras após um determinado período  $\Delta t$ . São considerados a distância, o ganho de canal e ainda o desvanecimento lento, para avaliar a potência recolhida por um CR. Assume-se também um modelo de correlação exponencial entre dois pontos, que depende da velocidade.

Os resultados apresentados em [AM10] concluem que a probabilidade de deteção aumenta com o aumento da velocidade do CR e com aumento do número de amostras recolhidas. É também mostrado que em ambientes urbanos um utilizador secundário consegue detetar com melhor eficácia o sinal do utilizador primário, face aos ambientes suburbanos. Com isto, conclui-se novamente que a mobilidade incrementa a capacidade de *sensing*.

## Capítulo 3

# Mobilidade

A análise do desempenho dos utilizadores relativamente à mobilidade tem uma importância fundamental no desenho das redes móveis atuais. Uma vez que os padrões de movimento reais são mais difíceis de obter, a abordagem mais vulgar é utilizar modelos de mobilidade sintéticos, que se assemelham em alguns cenários aos comportamentos reais dos utilizadores.

Neste capítulo analisa-se a distribuição espacial dos nós gerada pelo modelo *Random Waypoint*, o qual é amplamente usado na simulação de redes móveis. Os primeiros passos nesta direção foram dados por [BK01], [Bet01]. Nestes dois artigos observa-se que os nós tendem a concentrar-se no centro da área de simulação, originando o chamado efeito de coroa. Isto indica que a distribuição espacial dos nós não é uniforme em toda a área simulada. Um passo adicional foi dado em [BW<sup>+</sup>02], onde é apresentada uma fórmula fechada para a distribuição espacial a uma dimensão, ou seja, quando os nós se movem ao longo de uma linha segundo o modelo de mobilidade *Random Waypoint* (RWPM), e quando o tempo de pausa é nulo. O trabalho descrito em [BHPC04] obtém resultados explícitos para a distribuição dos nós em regiões circulares e retangulares, sendo a base de partida para este capítulo.

### 3.1 Descrição do Cenário e Modelo Considerado

Considera-se um espaço  $A$  a duas dimensões, de área retangular ( $a \times b$ ). O artigo [BHPC04] apresenta o processo estocástico de tempo discreto para o movimento dos nós

no modelo RWPM, nesse mesmo espaço. Uma vez que cada nó se move independentemente de todos os outros nós, basta estudar o movimento de apenas um dos nós.

Nesse processo estocástico considera-se que um nó escolhe aleatoriamente uma velocidade  $V_i$  para se mover desde o ponto  $P_{i-1}$  até ao ponto  $P_i$  e que tem um tempo de pausa  $T_{p,i}$  no ponto  $P_i$ , onde  $i$  simboliza o período de movimento em tempo discreto. Assim, o movimento de um nó é dado por:

$$\{(P_i, V_i, T_{p,i})\}_{i \in \mathbb{N}} = (P_1, V_1, T_{p,1}), (P_2, V_2, T_{p,2}), (P_i, V_i, T_{p,i}), \dots, \quad (3.1)$$

onde é necessário considerar o ponto inicial  $P_0$ . Desta forma, o movimento de um nó é dado pela sequência de pontos  $P_0, P_1, P_2, \dots, P_i$ . A distância entre dois desses pontos consecutivos é dada por:

$$L_i = |P_i - P_{i-1}|. \quad (3.2)$$

Assim sendo, o vetor de todas as distâncias percorridas por um nó é dado por

$$\{(L_i)\}_{i \in \mathbb{N}} = L_1, L_2, L_3, \dots \quad (3.3)$$

Considera-se o modelo *Random Waypoint* sem tempos de pausa, ou seja, os nós estão continuamente em movimento. A área de simulação é um quadrado com  $1000 \times 1000m^2$ .

## 3.2 Descrição da Distribuição Espacial dos Nós

Pretende-se descrever nesta secção um método formal para exprimir a distribuição espacial dos nós dentro da área considerada na simulação. Começa-se por assumir o modelo de mobilidade *Random Waypoint* em apenas uma dimensão, como indica o artigo [BW<sup>+</sup>02].

Considerando o instante inicial  $t = 0$  em que um nó está posicionado em  $x_s$  dentro de uma linha com limites  $[-x_m, x_m]$ , nesse mesmo instante o nó escolhe aleatoriamente um ponto de destino  $x_d$  também dentro da mesma linha e, uma determinada velocidade  $v$ , constante, para se mover até ao ponto de destino. O movimento que leva o nó a

mover-se desde a posição inicial  $x_s$  até ao ponto de destino  $x_d$  é representado por  $i$ , e o comprimento desse movimento é dado por  $\Delta x_i = |x_s(i) - x_d(i)|$ . Sabendo que a velocidade do nó permanece constante durante o movimento  $i$ , e que não existe tempo de pausa depois de o nó atingir o ponto de destino, o tempo que o nó leva para se mover do ponto inicial até ao ponto de destino é dado por  $\Delta t(i) = \frac{\Delta x_i}{v}$  [BW<sup>+</sup>02].

O artigo [BW<sup>+</sup>02] sugere ainda que a cada instante  $t$  do movimento seja colecionada a posição corrente do nó  $X(t)$  e que esta seja adicionada a um histograma  $h(x; t)$ , que mostra o número de vezes que a posição  $x$  foi visitada pelo nó. Normalizando o histograma, de modo a que a soma de todos os seus valores seja 1, obtém-se a seguinte expressão:

$$\bar{h}(x; t) = \frac{h(x; t)}{\int_{-\infty}^{\infty} h(x; t) dx}. \quad (3.4)$$

Como o histograma apresenta o número de vezes que um nó visitou a posição  $x$ , então, quando estamos perante uma simulação em que o tempo tende para infinito ( $t \rightarrow \infty$ ), pode-se dizer que os valores do histograma normalizado ( $\bar{h}(x; t)$ ) são idênticos aos valores da função densidade de probabilidade (PDF) para as posições  $x$ , como indica a expressão (3.5):

$$f_X(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} \bar{h}(x; t). \quad (3.5)$$

Devido ao facto dos pontos iniciais e de destino de cada processo de movimento ( $x_s(i), x_d(i)$ ) não serem conhecidos à partida, deve-se ter em conta as distribuições dos pontos de partida ( $f_{X_s}(x_s)$ ) e dos pontos de destino ( $f_{X_d}(x_d)$ ). Através dos valores do histograma e das funções densidade de probabilidade  $f_{X_s}(x_s)$  e  $f_{X_d}(x_d)$ , [BW<sup>+</sup>02] propõe a expressão (3.6) para a função densidade de probabilidade  $f_X(x)$ , resultante de uma aproximação numérica para um integral indefinido, através dos quais é possível obter a probabilidade de um nó ser encontrado na posição  $x$ :

$$f_X(x) = -\frac{3}{4x_m^3}x^2 + \frac{3}{4x_m}, -x_m \leq x \leq x_m. \quad (3.6)$$

O artigo [BW<sup>+</sup>02] sugere ainda uma expressão para a função de densidade de probabilidades quando os nós se movem numa área quadrada. O movimento a duas dimensões

pode ser tratado como dois movimentos independentes a uma dimensão (dimensão  $x$  e  $y$ ), sendo representada por:

$$f_{XY}(x, y) = f(x)f(y) = \frac{9}{16x_m^3 y_m^3} (x^2 - x_m^2)(y^2 - y_m^2) \quad (3.7)$$

Quando na equação (3.7)  $x_m$  e  $y_m$  tomam ambos o valor  $a$ , cenário que ocorre quando a área é quadrangular, a equação (3.7), depois de algumas manipulações algébricas, pode ser escrita na seguinte forma [BHPC04]:

$$f_{XY}(x, y) = f(x)f(y) = \frac{36}{a^6} (x^2 - \frac{a^2}{4})(y^2 - \frac{a^2}{4}), \quad (3.8)$$

onde  $-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}$  e  $-\frac{a}{2} \leq y \leq \frac{a}{2}$ .

A qualidade da aproximação numérica que foi feita para encontrar a expressão (3.6) é avaliada em detalhe em [RS02], concluindo os autores que a aproximação apresenta um erro baixo quando a velocidade dos nós é baixa.

Através destas expressões, determinou-se a distribuição espacial teórica dos nós. Os resultados são apresentados na Figura 3.1.

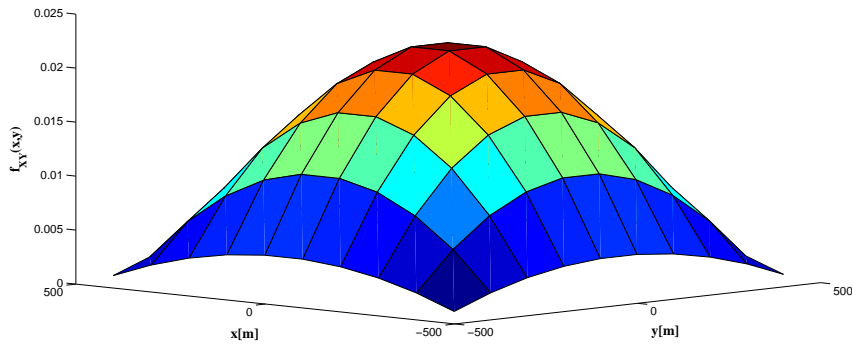


Figura 3.1: Distribuição teórica espacial dos nós - resultados teóricos.

Através da Figura 3.1, observa-se que  $f_{XY}(x, y)$  tem um máximo no centro da área, enquanto que a probabilidade de encontrar um nó perto da fronteira aproxima-se de zero. Outra observação importante é o facto da distribuição ser independente da velocidade dos nós [BHPC04].

### 3.3 Validação da Distribuição Espacial

A validação da distribuição espacial dos nós foi realizada utilizando 1000 cenários de mobilidade idênticos ao que foi descrito na Secção 3.1. Os padrões de mobilidade dos nós foram gerados utilizando o programa *setdest* do simulador ns-2 e foram configurados com o tempo de pausa nulo, com as velocidades mínimas e máximas iguais a  $[0.5, 5.3](m/s)$ , de modo a obter uma velocidade média de  $2m/s$  e com 100 nós em mobilidade. O algoritmo que avalia a distribuição dos nós foi realizado em MATLAB. Este algoritmo tem a capacidade de distribuir 100 nós secundários de forma estática, com uma distância de separação entre eles de 100 metros. De seguida o algoritmo valida a quantidade de nós primários em mobilidade que estão dentro de uma área quadrada ( $100 \times 100m^2$ ) em torno de cada nó secundário, em cada segundo de simulação, durante 100 segundos e para os 1000 cenários de mobilidade. Por fim é realizada a média aritmética para os 100 segundos de simulação, e para os 1000 cenários em causa. Os resultados da validação são apresentados na Figura 3.2.

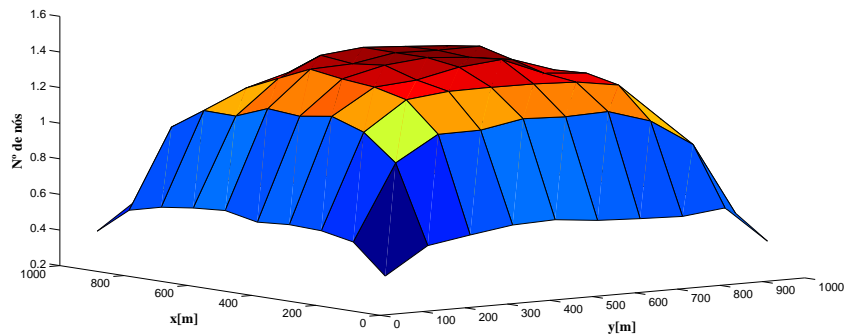


Figura 3.2: Validação da distribuição espacial dos nós.

Através da Figura 3.2 percebe-se que existe um excesso de nós junto das fronteiras, em comparação com os resultados apresentados para a distribuição teórica. Esta figura permite validar o que já se tinha observado através da distribuição teórica, isto é, que existe uma maior probabilidade de encontrar um nó no centro da área de simulação.

De modo a perceber a qualidade da validação realizaram-se três cortes axiais no eixo do  $x$  ( $x = 50m, x = 250m, x = 450m$ ). Não se avaliou a qualidade da validação para valores de  $x$  superiores, devido à distribuição espacial dos nós ser simétrica em relação a

um eixo imaginário localizado em  $x = 500$ .

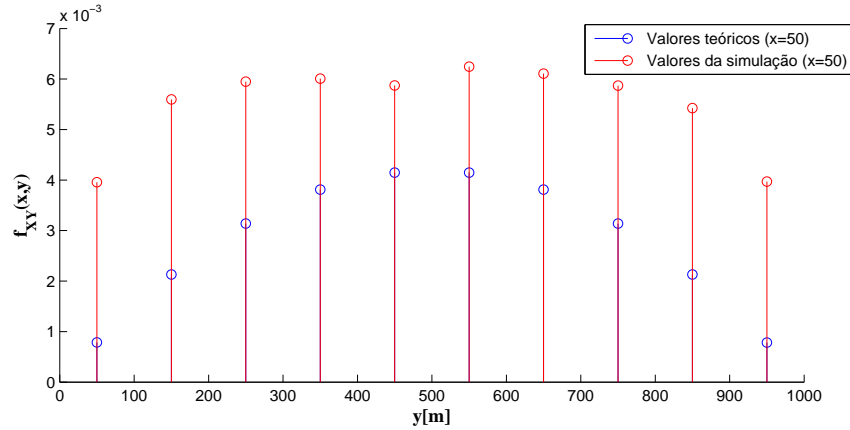


Figura 3.3: Comparação de valores teóricos e simulados da distribuição espacial dos nós ( $x = 50$  m).

A Figura 3.3, em que o corte axial foi realizado para  $x = 50$ , mostra que existe sobrelevação da distribuição simulada através dos cenários retirados do *setdest*, em relação à distribuição teórica. Há que ter em conta que os valores vêm multiplicados por um fator de  $10^{-3}$ , que reflete as grandes diferenças entre as duas distribuições na figura em análise.

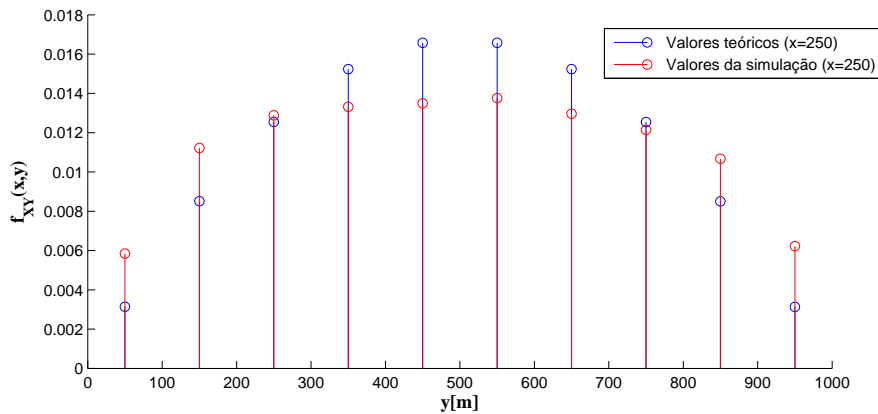


Figura 3.4: Comparação de valores teóricos e simulados da distribuição espacial dos nós ( $x = 250$  m).

A Figura 3.4 é a que apresenta melhores resultados na qualidade da validação. Ainda assim a curvatura dos resultados para a distribuição teórica dos nós é superior no centro da área simulada e inferior na periferia.



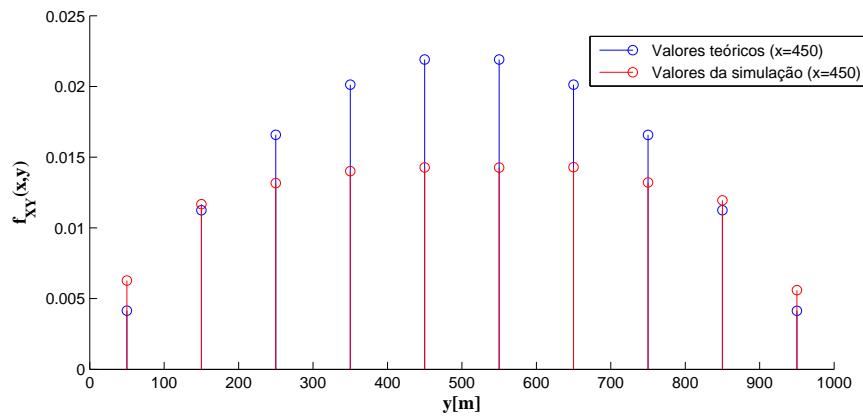


Figura 3.5: Comparação de valores teóricos e simulados da distribuição espacial dos nós ( $x = 450$  m).

Na Figura 3.5 pode-se concluir que a probabilidade de se encontrar nós no centro da área de simulação é superior para a distribuição teórica, uma vez que o corte axial é realizado muito próximo do centro da área de simulação.

Os resultados da validação demonstram que a qualidade da distribuição alcançada com o modelo teórico descrito em [BW<sup>+</sup>02] é baixa. A fraca qualidade dos resultados teóricos resulta em parte significativa da aproximação numérica necessária para resolver o integral indefinido que dá origem à equação (3.6).



## Capítulo 4

# Validação de Energia

O sinal transmitido pelos utilizadores licenciados pode ser detetado pelas várias técnicas de *sensing* descritas no Capítulo 2. Neste capítulo apenas é estudada a técnica de *sensing* baseada em energia. Nesta técnica, os nós secundários observam a atividade do canal através de um conjunto de amostras, recolhidas durante a fase de *sensing*.

O capítulo está dividido em três secções. A primeira secção apresenta o comportamento dos utilizadores primários. Na segunda secção descreve-se a estrutura do detetor de energia. A terceira secção apresenta uma caracterização da energia que o utilizador secundário recebe.

### 4.1 Comportamento dos Utilizadores Primários

Nesta secção analisa-se o caso em que múltiplos utilizadores primários podem transmitir em simultâneo no mesmo instante temporal. Estes utilizadores primários deslocam-se segundo o modelo RWPM, tendo dessa forma uma distribuição espacial como a que foi descrita no Capítulo 3 e, podem ser encontrados a diferentes distâncias do utilizador secundário que realiza *sensing*.

Tendo em conta que existem vários nós primários a transmitir em simultâneo no mesmo instante temporal, e que cada um deles está a uma distância do utilizador secundário, existem implicações em termos de desvanecimento da potência recebida. Desta forma o sinal recebido pelo nó secundário é dado pelo somatório de  $k$  sinais individuais, correspondendo aos  $k$  nós primários. Cada sinal individual, transmitido por cada um dos

utilizadores primários é dividido pelo quadrado da distância a que se encontra do nó secundário (considerou-se perdas de propagação com expoente 2, que representa um cenário com excelentes condições de propagação em termos de atenuação).

Desta forma, o sinal  $s(k)$  a ser detetado por o utilizador secundário, é representado pela soma de todos os sinais presentes no canal, correspondendo cada sinal  $(s_1, s_2, \dots, s_k)$  a um nó primário ativo, ou seja:

$$s(k) = \frac{s_1}{d_1^2} + \frac{s_2}{d_2^2} + \dots + \frac{s_k}{d_k^2}, \quad (4.1)$$

em que  $d_1, d_2, \dots, d_k$  representam as distâncias a que se encontra cada um dos  $k$  nós primários ao nó secundário que efetua o *sensing*.

Como já foi considerado, o sinal transmitido por um determinado nó primário tem distribuição Normal Gaussiana com valor médio  $\mu_k$  e variância  $\sigma_k^2$ , ou seja:

$$s_k \sim \mathcal{N}(\mu_k, \sigma_k^2) \quad (4.2)$$

Considerando as propriedades da distribuição Normal e considerando  $d_1, d_2, \dots, d_k$  constantes, obtém-se a média e a variância da distribuição Normal do sinal recebido pelo utilizador secundário:

$$s \sim \mathcal{N}(d_1^{-2}\mu_1 + d_2^{-2}\mu_2 + \dots + d_n^{-2}\mu_n, d_1^{-4}\sigma_1^2 + d_2^{-4}\sigma_2^2 + \dots + d_k^{-4}\sigma_k^2). \quad (4.3)$$

O sinal recebido pelo nó secundário apresenta uma distribuição Normal com média  $\sum_{k=1}^N d_k^{-2}\mu_k$  e variância  $\sum_{k=1}^N d_k^{-4}\sigma_k^2$ , em que  $N$  corresponde ao número de nós primários ativos.

## 4.2 Detetor de Energia

Como já foi referido no Capítulo 2, a técnica de *sensing* baseada em energia é a que possui a menor complexidade de implementação e execução [CMB04]. Esta técnica não necessita de conhecimento *à priori* do sinal dos utilizadores licenciados, sendo assim a escolhida para ser estudada nesta dissertação. O procedimento da referida técnica consiste em comparar a energia do sinal com um limiar, que geralmente é função do nível de

qualidade de *sensing* pretendido (quantificado pela probabilidade de deteção e de falso alarme).

A energia  $Y$  recebida no detetor de energia de um utilizador secundário é comparada com um determinado limiar  $\gamma$ , e a decisão entre as hipóteses  $\mathcal{H}_0$  ou  $\mathcal{H}_1$  é tomada. Caso a energia do sinal seja maior que o limiar, o detetor de energia decide-se pela hipótese  $\mathcal{H}_1$ , isto é, o sinal transmitido por um utilizador primário ( $s(n)$ ) está presente no sinal recebido pelo utilizador secundário. Caso contrário, a hipótese escolhida é a  $\mathcal{H}_0$ , e assume-se que só existe ruído gaussiano no canal ( $w(n)$ ):

$$\mathcal{H}_1 : Y = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 > \gamma, \quad (4.4)$$

$$\mathcal{H}_0 : Y = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 < \gamma.$$

A técnica de *sensing* baseada em energia é fundamentada no detetor de energia descrito em [Urk67]. Pode observar-se na Figura 4.1 um diagrama de blocos que indica a estrutura do detetor de energia.

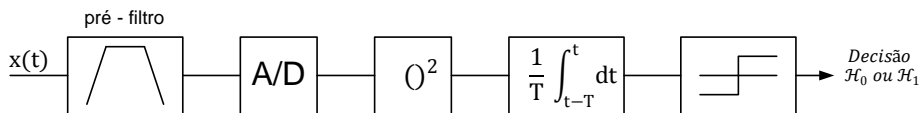


Figura 4.1: Esquema de blocos do detetor de energia.

Como se pode ver, o primeiro bloco é um filtro passa-banda, que permite seleccionar a largura de banda do canal de rádio. De seguida o sinal passa por um conversor A/D (ADC) de modo a quantificar o sinal. Cumprindo o teorema da amostragem, para uma dada banda de *sensing*  $WHz$  e um período de *sensing*  $T_s$ , o número de amostras  $S$  corresponde ao produto  $2WT_s$ . As amostras do sinal são quadradas e somadas para se ter os valores de energia medidos nas  $S$  amostras. À saída do bloco integrador o valor médio da energia das  $S$  amostras é comparado com um limiar de energia predefinido e este último bloco permite decidir se o canal está livre ou ocupado.

### 4.3 Caracterização da Energia Recebida pelo SU

A quantidade de energia recebida pelo utilizador secundário que realiza *sensing* depende de diversos fatores. Se estamos na presença da hipótese  $\mathcal{H}_0$  os valores de energia à saída do bloco integrador da Figura 4.1 devem ser teoricamente mais baixos, do que quando o canal está ocupado, hipótese  $\mathcal{H}_1$ . Para além deste facto pretende-se analisar nesta secção quais são os outros fatores que influenciam os valores de energia recebidos dos utilizadores primários.

Após o sinal  $x(n)$  ser quadrado e integrado, obtém-se a soma do quadrado das  $S$  Variáveis Aleatórias (RVs) com distribuição Normal. Sabendo que a soma do quadrado de  $S$  Variáveis Normais pode ser simulada através de uma distribuição Qui-quadrado que pode ser centrada ou não, dependendo do parâmetro de centralidade  $\lambda$ , definido por:

$$\lambda = \sum_{i=1}^S \left( \frac{\mu_i}{\sigma_i} \right)^2. \quad (4.5)$$

Quando o parâmetro  $\lambda$  é nulo a distribuição Qui-quadrada é centrada, caso contrário o parâmetro de centralidade terá de ser calculado. Considerando-se apenas ruído no meio, a distribuição que representa a soma do quadrado das amostras diz-se centrada, uma vez que o ruído AWGN tem média  $\mu_n = 0$  e variância  $\sigma_n^2$ .

Tomando a variável aleatória  $Y$  que expressa a energia acumulada pelo detetor de energia, através do teorema do limite central [Tan05], sabe-se que para um dado valor de amostras  $S$  relativamente elevado a soma dessas variáveis aleatórias independentes com a mesma distribuição de probabilidade pode ser aproximada por uma distribuição Normal  $Y \sim \mathcal{N}(S, 2S)$ . Assim, quando estamos perante um cenário em que não existem nós licenciados a transmitir, a energia medida pelos utilizadores secundários pode ser aproximada por uma distribuição Normal com média  $\mu_Y = S$  e com uma variância  $\sigma_Y^2 = 2S$ .

No caso em que o canal está ocupado, ou seja, que existe sinal de utilizadores licenciados somado ao ruído, 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  $1 + \sigma_s^2$ . Neste caso, à saída do bloco integrador obtém-se a variável  $Y$  com distribuição Qui-quadrado não centrada com  $S$  graus de liberdade. O

parâmetro de não centralidade é dado por  $\lambda = \frac{\mu_s}{1+\sigma_s^2}$ , e através deste parâmetro a variável  $Y$  pode ser aproximada por uma distribuição Normal com média  $\mu_Y = S + \lambda$  e variância  $\sigma_Y^2 = 2(S + 2\lambda)$ .

Com o que foi exposto anteriormente, a variável  $Y$  pode ser aproximada por duas distribuições normais para as hipóteses  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ . Desta forma, procedeu-se à caracterização da energia recebida pelo utilizador secundário para as duas hipóteses possíveis recorrendo à implementação de um algoritmo em linguagem MATLAB.

O algoritmo em causa aproveita as posições de cada nó primário em cada segundo de simulação geradas no Capítulo 3, dentro de uma área de simulação ( $1000 \times 1000m^2$ ). Os nós primários encontram-se assim em mobilidade segundo o modelo RWPM. O nó secundário durante os 100 segundos de simulação encontra-se estático, no centro da área de simulação e a cada segundo constrói um vetor de distâncias idêntico ao representado por (4.6).

$$\begin{bmatrix} PU_1 \rightarrow SU \\ PU_2 \rightarrow SU \\ PU_3 \rightarrow SU \\ \dots \\ PU_k \rightarrow SU \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A  $k$ -ésima linha do vetor de distâncias ( $PU_k \rightarrow SU$ ) representa a distância entre o  $k$ -ésimo utilizador primário e o utilizador secundário colocado no centro da área de simulação no instante considerado.

Cada nó primário tem uma determinada probabilidade  $P_{on}$  para estar ativo, ou seja, a transmitir e por isso é gerado um vetor a cada segundo, com a indicação da atividade dos utilizadores primários. O valor binário 1 na linha  $k$  do vetor indica que o nó se encontra em transmissão, enquanto que o valor 0 indica que o nó está inativo.

Para os nós primários que se encontram ativos e em transmissão, é gerado um vetor com  $S$  posições de sinal adicionado de ruído, por sua vez, para os restantes nós primários é gerado um vetor com  $S$  posições de ruído.

Como já foi referido, existem perdas de propagação no canal e por isso também foram

consideradas no algoritmo. O sinal de cada nó primário ativo é dividido pelo quadrado da distância a que se encontra do nó secundário.

Depois de gerar o sinal e o ruído, são somados os sinais de todos os utilizadores primários presentes no canal e esse valor é quadrado. Isto é efetuado a cada período de *sensing*. Finalmente são obtidos os valores de energia para cada período de *sensing*.

De forma a caracterizar os valores de energia para as hipóteses  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ , efetuou-se separadamente um teste para verificar se existia ou não nós primários ativos dentro de um raio  $R_s$  em torno do nó secundário. Caso existam nós primários ativos dentro do raio  $R_s$  durante um determinado período de *sensing*, esse valor de energia é reservado para um vetor onde só constam valores de energia da hipótese  $\mathcal{H}_1$ . Na condição de não existirem nós primários dentro do raio  $R_s$ , o valor de energia é reservado para um vetor onde só constam valores de energia da hipótese  $\mathcal{H}_0$ .

Assim sendo, na Figura 4.2 pode observar-se a função de distribuição cumulativa dos valores de energia para as hipóteses  $\mathcal{H}_1$  e  $\mathcal{H}_0$ . Constata-se que os valores de energia são superiores para a hipótese  $\mathcal{H}_1$ , como já era de esperar.

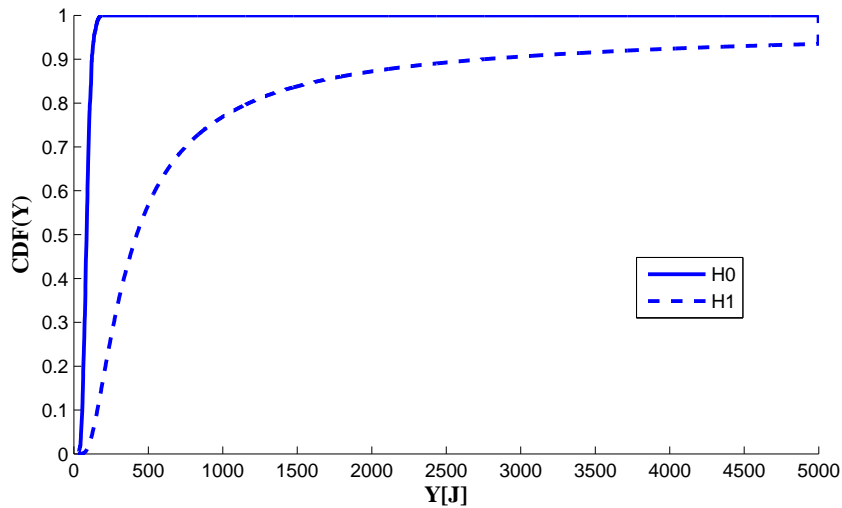


Figura 4.2: Valores de energia para  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ .

Na Figura 4.3 avaliam-se os valores de energia para diferentes  $P_{on}$ . Verifica-se que quanto maior for a probabilidade de um dos utilizadores primários estar ativo, maior serão os valores de energia para ambas as hipóteses, devido ao facto de existirem mais utilizadores primários a transmitir. Valida-se também que com o aumento de  $P_{on}$ , existe



uma maior separação entre as curvas da função de distribuição dos valores de energia para  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ . Isto deve-se à existência de um maior número de nós a transmitir dentro do raio  $R_s$ .

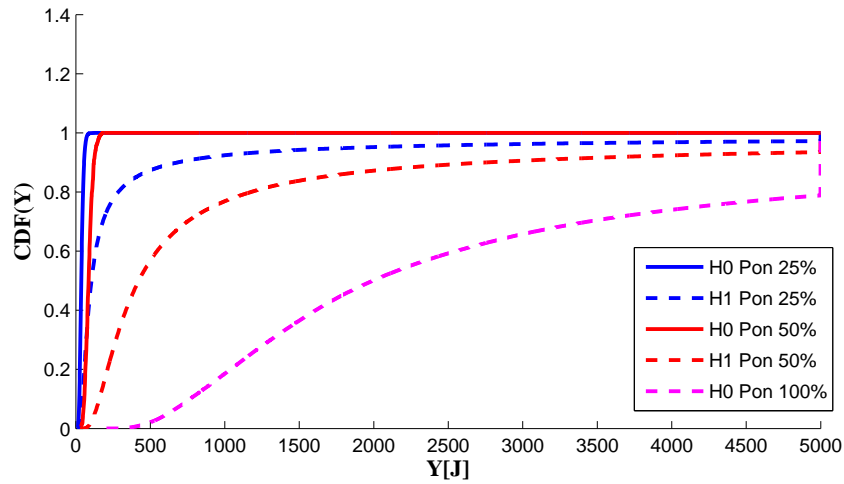


Figura 4.3: Valores de energia para diferentes  $P_{on}$ .

A Figura 4.4 mostra que o aumento do número de utilizadores licenciados faz aumentar os valores de energia que chegam ao utilizador secundário e, pelo mesmo motivo da Figura 4.3, também existe uma maior separação entre as curvas da função de distribuição dos valores de energia para  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ , para o caso em que existem mais utilizadores licenciados.

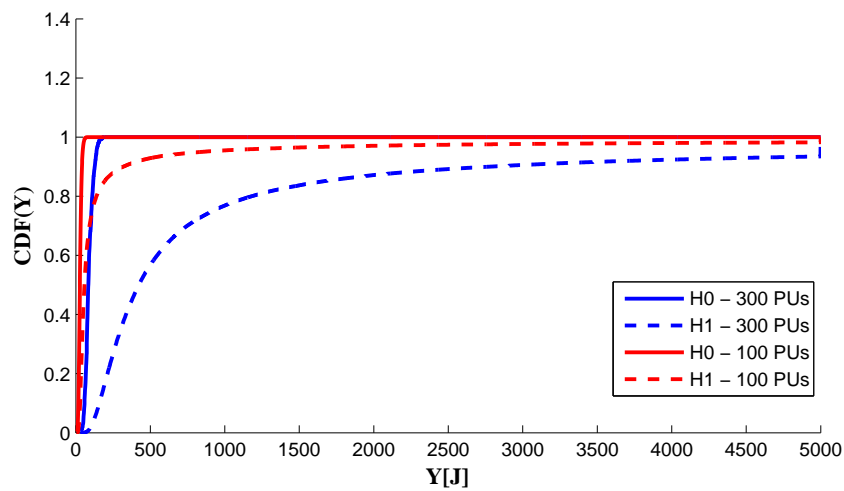


Figura 4.4: Valores de energia para diferentes números de utilizadores.

Finalizando este capítulo em que foram apresentados os resultados das funções de distribuição dos valores de energia para vários cenários de operação, apresenta-se no próximo

capítulo a parametrização do detetor de energia considerando mobilidade de nós, tendo como consequência o facto de as distâncias  $d_1, d_2, \dots, d_k$  deixarem de ser constantes e passarem a ser variáveis no tempo.

## Capítulo 5

# Parametrização do Detetor de Energia

A forma como o detetor de energia decide sobre o estado (livre ou ocupado) de um determinado canal, depende da parametrização do limiar de decisão. Este limiar de decisão pode ser parametrizado de modo a ser obtido um bom compromisso entre as probabilidades de deteção e de falso alarme.

### 5.1 Descrição do Cenário

A rede cognitiva considerada neste cenário é constituída por um único utilizador secundário e múltiplos utilizadores primários (Figura 5.1). O utilizador secundário consegue detetar a presença de utilizadores primários através da técnica de *sensing* baseada em energia, medindo a interferência causada pelos utilizadores primários. Se a interferência agregada, dada pela soma de todas as interferências de cada um dos utilizadores primários for "tolerável", corresponde ao caso em que só existem nós primários fora do alcance de *sensing*, ou seja, a distância entre os utilizadores e o utilizador secundário é superior ao raio  $R_{out}$ . Caso a interferência agregada seja "não tolerável", significa que existem nós primários a transmitir dentro do alcance de *sensing* do nó secundário, ou seja, dentro do raio  $R_{out}$ .

Considera-se que os utilizadores primários estão distribuídos, dentro de uma certa área que circunda o utilizador secundário. O número de nós primários (variável  $X$ ) está

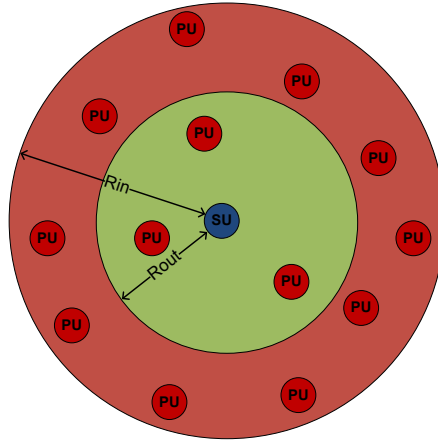


Figura 5.1: Distribuição dos PUs em torno do SU.

distribuído de acordo com um processo de *Poisson* a duas dimensões, com distribuição,

$$P(X = i) = \frac{(\beta A_I)^i}{i!} e^{-\beta A_I}, i = 0, 1, \dots, N, \quad (5.1)$$

onde  $\beta$  é a densidade de nós primários, e  $A_I = \pi(R_{in}^2 - R_{out}^2)$  é a área da coroa circular onde se localizam os utilizadores primários que causam interferência ao utilizador secundário.

Desta forma, a interferência provocada por todos os utilizadores primários localizados dentro da área  $A_I$  é dada por:

$$I = \sum_{i=1}^N I_i, \quad (5.2)$$

onde  $I_i$  é a interferência causada pelo  $i$ -ésimo PU e  $N$  é o número total de PUs. Assim, a interferência individual de cada um dos nós é dada por:

$$I_i = P_{PU} r_i^{-\alpha}, \quad (5.3)$$

onde  $P_{PU}$  é a potência de transmissão de um utilizador primário,  $r_i$  representa a distância do  $i$ -ésimo PU ao SU e o parâmetro  $\alpha$  simboliza as perdas de propagação.

De forma a caracterizar a distribuição da interferência causada pelo  $i$ -ésimo utilizador primário, calcula-se a função geradora de momentos (FGM) de acordo com a sua definição:

$$M_I^i = E_{r_i}[e^{sI_i}] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{sI_i} f_R(r_i) dr_i, \quad (5.4)$$

onde  $f_R(r_i)$  é a PDF de  $r_i$  e pode ser escrita da seguinte forma:

$$f_R(r_i) = \begin{cases} \frac{2\pi r_i}{A_I} & R_{out} < r_i < R_{in} \\ 0, & \text{para outros casos} \end{cases} \quad (5.5)$$

Depois de algumas manipulações algébricas efetuadas à equação (5.4), a função geradora de momentos (FGM) é dada por:

$$M_I^i(s) = \frac{2P_{PU}^{2/\alpha} (\Gamma(-2/\alpha, P_{PU}R_{in}^{-\alpha}s) - \Gamma(-2/\alpha, P_{PU}R_{out}^{-\alpha}s))}{(R_{in}^2 - R_{out}^2)s}, \quad (5.6)$$

onde  $\Gamma$  representa a função Gamma.

Como as variáveis  $I_1, I_2, \dots, I_i$  são independentes, então a função geradora de momentos conjunta de todas as  $N$  interferências individuais é dada por  $M_{I/N}(s) = (M_I^i(s))^N$ . Dado que a interferência agregada é dada pela soma de  $N$  variáveis aleatórias independentes  $I_i$  com distribuição de *Poisson*, verifica-se que a interferência agregada  $I$  está distribuída de acordo com uma distribuição de *Poisson* composta, sendo a sua função geradora de momentos dada por,

$$M_I(s) = e^{\beta A_I (M_I^i(s) - 1)}. \quad (5.7)$$

Através das derivadas de primeira e segunda ordem da função geradora de momentos da interferência agregada, são obtidos o valor esperado ( $E[I]$ ) e a variância ( $Var[I]$ ) da seguinte forma:

$$E[I] = \beta A_I M_{I_i}'(0) = 2\pi\beta P_{PU} \left( \frac{R_{in}^{2-\alpha} - R_{out}^{2-\alpha}}{2 - \alpha} \right), \quad (5.8)$$

$$Var[I] = \beta A_I M_{I_i}''(0) = \pi\beta P_{PU} \left( \frac{R_{in}^{2-2\alpha} - R_{out}^{2-2\alpha}}{1 - \alpha} \right). \quad (5.9)$$

De seguida, o primeiro e segundo momento da FGM para a interferência agregada são comparados com os respetivos momentos da distribuição *Gamma*, obtendo-se assim uma aproximação à distribuição *Gamma*. O parâmetro de forma e o parâmetro de escala da função *Gamma* devem ser encontrados por  $\frac{E[I]^2}{Var[I]}$  e  $\frac{Var[I]}{E[I]}$  respetivamente.

Uma vez que a distribuição *Gamma*, com parâmetro de forma  $k$  e parâmetro de escala  $\theta$ , é a soma de  $k$  distribuições exponenciais ( $1/\theta$ ), através do Teorema do Limite Central, quando  $k$  é relativamente elevado, a distribuição *Gamma* pode ser aproximada por uma distribuição Normal. Deste modo a interferência agregada é aproximada por uma distribuição Normal  $\mathcal{N} \sim (k\theta, k\theta^2)$ .

Note-se que para o caso de a interferência agregada ser "não tolerável", temos de considerar um certo  $R_{out}$ , que corresponde à distância entre o SU e o PU mais próximo.

## 5.2 Desempenho do Detetor de Energia

Para decidir se o canal está livre ou ocupado, os utilizadores secundários recolhem  $N_S$  amostras do canal durante um período de *sensing*  $T_S$ . Para cada amostra  $n$  recebida, é tomada uma decisão em relação ao seguinte teste de hipóteses:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_0 : x(n) &= w(n) + s_{out}(n) & n = 1, 2, \dots, N_S \\ \mathcal{H}_1 : x(n) &= w(n) + s_{out}(n) + s_{in}(n) & n = 1, 2, \dots, N_S \end{aligned} \quad (5.10)$$

A hipótese  $\mathcal{H}_0$ , refere-se ao caso em que o canal se encontra livre, ou seja, que não existem nós primários a transmitir dentro da área de deteção. A segunda hipótese,  $\mathcal{H}_1$ , corresponde ao canal ocupado, ou seja, que existe pelo menos um nó primário ativo dentro da área de deteção.

As variáveis  $s_{out}(n)$  e  $s_{in}(n)$  representam respetivamente a interferência agregada "tolerável" e a interferência "não tolerável" causada pelos nós primários.

A interferência agregada pode ser caracterizada por uma distribuição Normal, com média  $\mu$  e variância  $\sigma$ , encontrados na Secção 5.1. Considera-se que o ruído  $w(n)$  é aditivo branco gaussiano (AWGN) e pode ser modelado por uma variável aleatória com distribuição Gaussiana, com média nula e variância unitária ( $w(n) \sim \mathcal{N}(0, 1)$ ).

A técnica de *sensing* baseada em energia é fundamentada no detetor de energia, descrito e estudado em [Urk67]. Durante a fase de *sensing*, a energia do sinal recebida pelo SU é dada pela seguinte expressão:

$$Y_S = \sum_{n=1}^{N_S} |x(n)|^2. \quad (5.11)$$

Nesta técnica, a energia do sinal  $Y_S$  medida pelo SU é comparada com um limiar  $\gamma$ , decidindo se existe ou não um PU na área de detecção.

A variável  $Y_S$  apresenta distribuição Qui-quadrado não centrada com  $2S$  graus de liberdade, e parâmetro de não centralidade  $\lambda$ , dado por

$$\begin{aligned}\lambda_{out} &= N_S \left( \frac{\mu_{s_{out}}}{\sqrt{1+\sigma_{s_{out}}^2}} \right)^2, & \mathcal{H}_0 \\ \lambda_{in} &= N_S \left( \frac{\mu_{s_{out}}+\mu_{s_{in}}}{\sqrt{1+\sigma_{s_{out}}^2+\sigma_{s_{in}}^2}} \right)^2, & \mathcal{H}_1\end{aligned}\quad (5.12)$$

onde  $\mu_{s_{out}}$  e  $\sigma_{s_{out}}$  correspondem respectivamente à média e variância da interferência agregada "tolerável". Por sua vez, os parâmetros  $\mu_{s_{in}}$  e  $\sigma_{s_{in}}$  correspondem respectivamente à média e variância da interferência agregada "não tolerável".

Recorrendo ao Teorema do limite central, se o número de amostras  $N_S$  for relativamente elevado, a distribuição Qui-quadrado pode ser aproximada por uma distribuição Normal [Tan05]:

$$Y_S \sim \begin{cases} \mathcal{N}(N_S + \lambda_{out}, 2(N_S + 2\lambda_{out})), & \mathcal{H}_0 \\ \mathcal{N}(N_S + \lambda_{in}, 2(N_S + 2\lambda_{in})), & \mathcal{H}_1 \end{cases} \quad (5.13)$$

Assim, a probabilidade de detecção ( $P_D$ ) e a probabilidade de falso alarme ( $P_{FA}$ ) para o SU, são representadas por

$$\begin{aligned}P_{FA} &= \mathcal{Q} \left( \frac{\gamma - (N_S + \lambda_{out})(\sigma_{s_{out}}^2 + 1)}{\sqrt{(2N_S + 4\lambda_{out})(\sigma_{s_{out}}^2 + 1)^2}} \right) \\ P_D &= \mathcal{Q} \left( \frac{\gamma - (N_S + \lambda_{in})(\sigma_{s_{out}}^2 + \sigma_{s_{in}}^2 + 1)}{\sqrt{(2N_S + 4\lambda_{in})(\sigma_{s_{out}}^2 + \sigma_{s_{in}}^2 + 1)^2}} \right)\end{aligned}\quad (5.14)$$

onde  $\mathcal{Q}(\cdot)$  representa a função de distribuição Normal reduzida. Observando a equação (5.14) pode-se concluir que  $P_{FA}$  e  $P_D$  só dependem do número de amostras ( $N_S$ ) e do limiar de energia ( $\gamma$ ).

### 5.3 Parametrização do Limiar de Energia

Uma vez deduzidas as probabilidades que descrevem o desempenho do *sensing* baseado em energia, nesta secção introduz-se a parametrização do limiar de energia para uma dada probabilidade de detecção ( $P_D$ ).

Recorrendo a (5.14), o limiar de decisão  $\gamma$  é dado por

$$\gamma = \left( Q^{-1}(P_D) \sqrt{(2N_S + 4\lambda_{in})} + (N_S + \lambda_{in}) \right) (\sigma_{sout}^2 + \sigma_{sin}^2 + 1). \quad (5.15)$$

Este critério de parametrização garante uma determinada proteção aos utilizadores primários, uma vez que tem em conta a probabilidade de deteção. Por outro lado, a parametrização do limiar de decisão não tem em consideração a probabilidade de falso alarme, que poderá diminuir o desempenho dos utilizadores secundários.

Este método de determinação do limiar será utilizado no Capítulo 6 para avaliar as probabilidades de falso alarme e de deteção.



## Capítulo 6

# Caracterização de Desempenho

### 6.1 Mobilidade dos Utilizadores Primários

Nesta secção pretende-se avaliar o desempenho da mobilidade dos utilizadores primários na tarefa de *sensing*.

Para visualizar a influência da mobilidade dos utilizadores primários na capacidade de deteção, geraram-se três cenários de mobilidade, com velocidades médias distintas ( $2m/s$ ,  $5m/s$  e  $10m/s$ ). O modelo adotado foi uma vez mais o RWPM. No início da simulação 300 utilizadores primários estão dispostos aleatoriamente, de acordo com uma distribuição uniforme numa região A ( $1000 \times 1000m^2$ ). Após o instante inicial os utilizadores primários movem-se de acordo com o modelo de mobilidade RWPM e têm uma determinada probabilidade  $P_{on}$  (50%) para estarem ativos.

Depois de gerados os cenários de mobilidade para os 300 utilizadores primários, aproveita-se parte do algoritmo do detetor de energia enunciado na Secção 4.3, para obter o valor de energia recebido pelo utilizador secundário, localizado no centro da área de simulação, em cada fase de *sensing*. Em MATLAB implementou-se outro algoritmo, que após ser conhecido o valor de energia da fase de *sensing*, o SU decide se existe utilizador primário num raio de alcance de 100 metros, para vários valores de limiar ( $\gamma$ ). Para cada valor de  $\gamma$  é calculada a probabilidade de falso alarme ( $P_{FA}$ ) e a probabilidade de deteção ( $P_D$ ) e os seus valores são apresentados na Figura 6.1.

Através da Figura 6.1 compreende-se como a mobilidade dos utilizadores primários influencia a capacidade de *sensing*. Pode constatar-se que à medida que a mobilidade

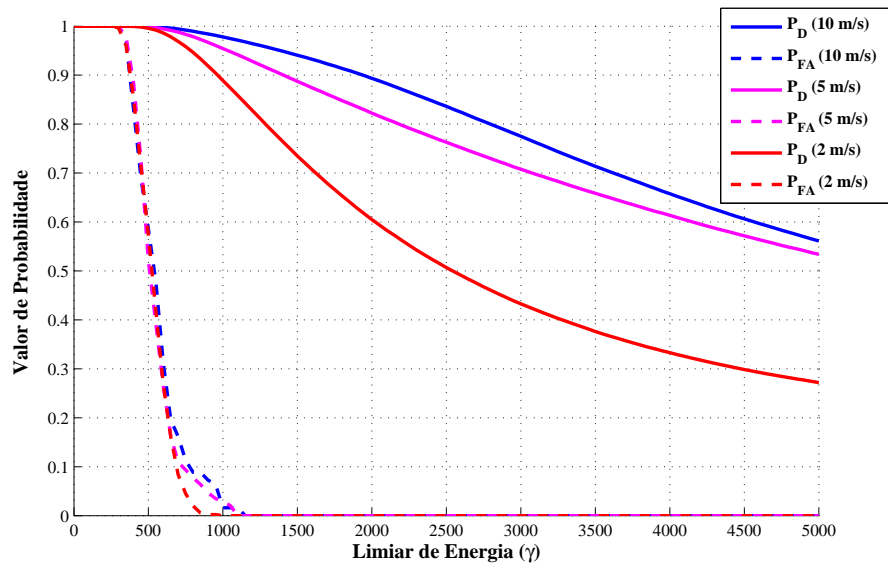


Figura 6.1:  $P_D$  e  $P_{FA}$  para diferentes valores de velocidade.

aumenta, traduzido por um aumento da velocidade dos utilizadores, os valores da probabilidade de deteção ( $P_D$ ) são superiores. Seja qual for o limiar de decisão utilizado no detetor de energia, o utilizador secundário tem sempre uma maior probabilidade de detetar com sucesso a presença de utilizadores primários no seu raio de alcance de *sensing*. Por sua vez, a probabilidade de falso alarme não sofre alterações significativas com o aumento da mobilidade. Deve-se ter em conta que não se pode obter uma probabilidade de deteção igual a 100% ao mesmo tempo que se obtém uma probabilidade de falso alarme igual a zero, uma vez que existe sempre interferência agregada causada pelos utilizadores primários ao utilizador secundário.

De modo a obter uma justificação para o aumento da probabilidade de deteção, quando a velocidade dos nós aumenta, analisou-se novamente a distribuição espacial dos nós para o modelo de mobilidade RWPM. Nas Figuras 6.2 e 6.3 mostram-se as distribuições espaciais dos nós quando os nós se movem com velocidade média de 2 m/s e 10 m/s, no modelo de mobilidade RWPM.

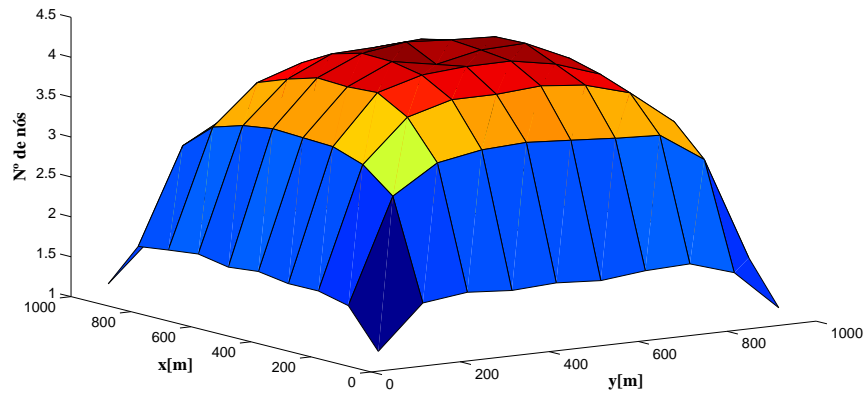


Figura 6.2: Distribuição espacial dos nós (velocidade média = 2 m/s).

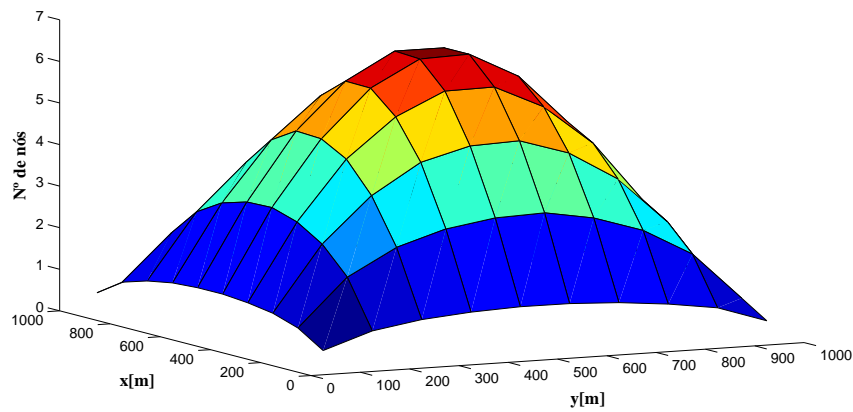


Figura 6.3: Distribuição espacial dos nós (velocidade média = 10 m/s).

Ao comparar a Figura 6.2 com a Figura 6.3, conclui-se que a distribuição espacial dos nós para o modelo de mobilidade RWPM varia com a velocidade dos nós, ao contrário do que é assumido em [BHPC04]. Existem mais nós primários a atravessar o centro da área de simulação, local onde se encontra o utilizador secundário, para o cenário com velocidade média igual a 10  $m/s$  do que para o cenário com velocidade média igual a 2  $m/s$ . Desta forma, está explicado o aumento da probabilidade de deteção com o aumento da velocidade dos nós. Quando existe uma maior densidade de nós primários dentro do alcance de *sensing* do nó secundário, ao ocorrer a hipótese  $\mathcal{H}_1$ , os valores de energia que chegam ao nó secundário são mais elevados e mais fácil se torna a decisão para o detetor

de energia, como mostra a Figura 6.4. Assim, a probabilidade do nó secundário decidir pela hipótese  $\mathcal{H}_1$  é maior, quando existem mais nós primários no seu raio de alcance de *sensing*.

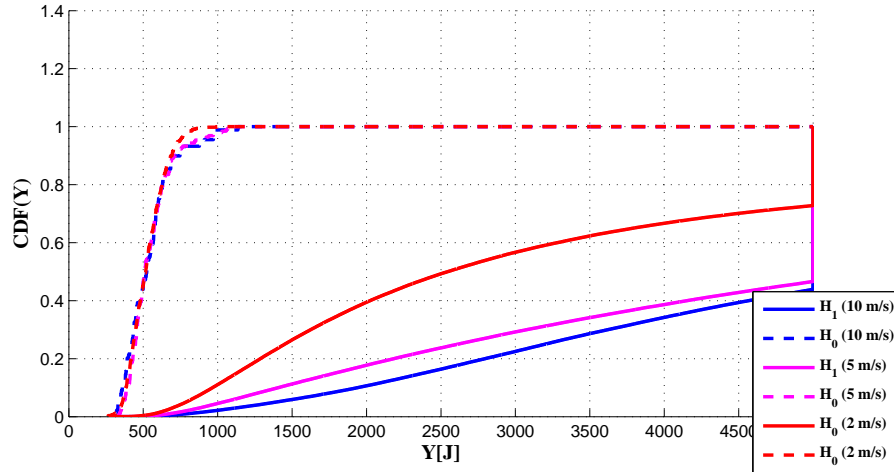


Figura 6.4: Energia para  $\mathcal{H}_1$  e  $\mathcal{H}_0$ , para diferentes valores de velocidade.

## 6.2 Desempenho do Limiar de Energia

Tendo em conta que o estudo para a parametrização do limiar de energia realizado no Capítulo 5 foi efetuado para uma distribuição de nós primários de acordo com um processo de *Poisson*, e devido a não existir uma caracterização formal da distribuição da interferência agregada quando os nós primários se movem segundo o modelo RWPM, é estudado aqui o impacto de parametrizar o limiar de decisão assumindo uma distribuição dos nós do tipo *Poisson* (como considerado no Capítulo 5), mas utilizando depois o limiar no cenário de mobilidade *Random Waypoint*. Este estudo tem como finalidade aferir o erro cometido em tal aproximação.

Adotou-se uma distribuição de nós primários segundo o processo de *Poisson*, com a densidade igual à média da distribuição uniforme dos nós, uma vez que esta densidade é inferior à densidade mínima de nós dentro do raio de *sensing* do SU para a densidade espacial obtida com o modelo RWPM. Este facto pode ser observado na Figura 6.5, onde foi feito um corte axial para  $x = 450$  das figuras 6.2 e 6.3, de modo a perceber-se quais eram as diferenças de densidades de nós no centro da área de simulação. A curva a

verde representa a densidade média de uma distribuição uniforme, a qual é utilizada para parametrizar a densidade do processo de *Poisson*. Ao garantir que a densidade de nós é inferior para a distribuição dos nós segundo o processo de *Poisson* no centro da área de simulação, garante-se que se subestima o número de nós face ao número de nós do modelo RWPM, embora se negligencie as diferentes distribuições espaciais dos nós.

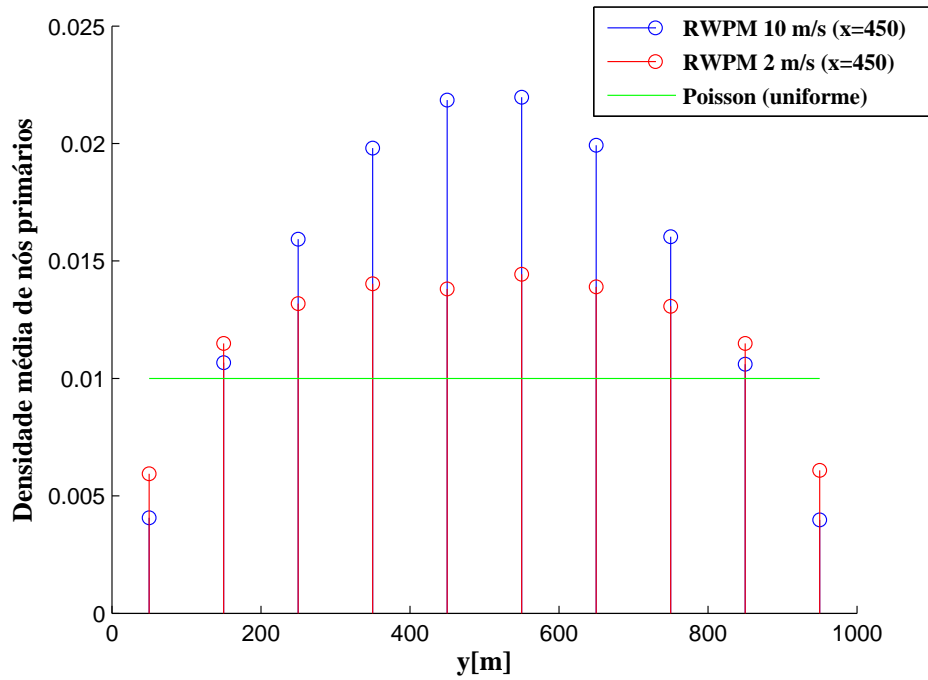


Figura 6.5: Densidades médias para diferentes distribuições (RWPM e *Poisson*).

Para obter o limiar de decisão do detetor de energia utilizou-se a equação (5.15) e assumiu-se uma probabilidade de deteção ( $P_D$ ) igual a 99%, sendo o limiar obtido igual a 1527[J].

Considerando o limiar de decisão definido, e tendo em conta a probabilidade de deteção que se pretende alcançar para um cenário em que os nós estão distribuídos segundo um processo de *Poisson*, avaliou-se a parametrização do limiar de decisão para o modelo em que os nós estão distribuídos segundo o modelo RWPM. Esta avaliação é apresentada na Figura 6.6.

A parametrização do limiar de decisão apresenta um erro significativo, como se pode analisar na Tabela 6.1. Os valores da probabilidade de deteção para os cenários do RWPM são sempre mais baixos do que o valor que foi considerado para a distribuição de *Poisson* (0.99). Desta forma conclui-se que o limiar de decisão não conduz à probabilidade de deteção pretendida, e constata-se a grande variação de valores de  $P_D$  consoante os valores de mobilidade simuladas.

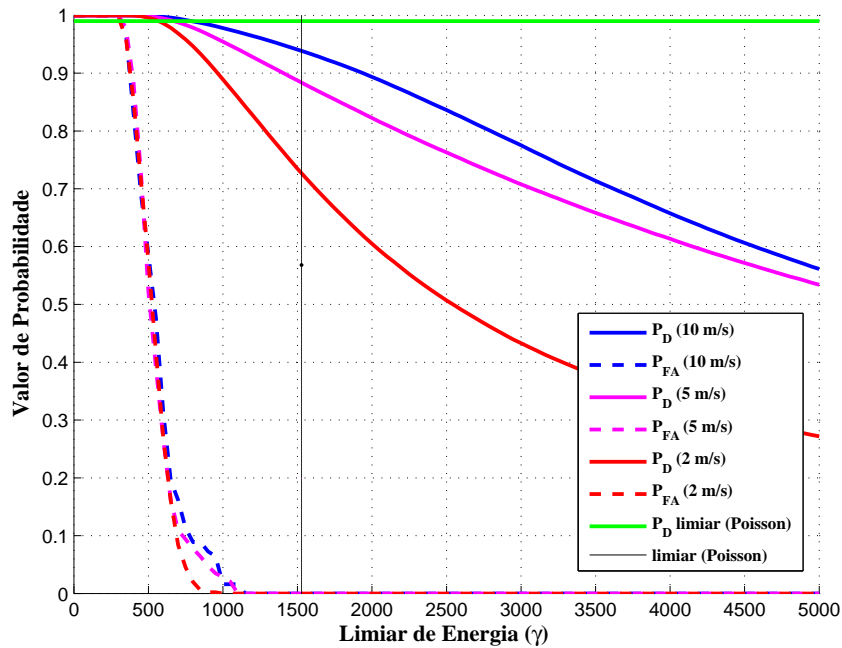


Figura 6.6:  $P_D$  e  $P_{FA}$  em função do limiar encontrado.

Velocidade ( $m/s$ )	2	5	10
$P_D$ (RWPM)	0.72	0.88	0.93

Tabela 6.1: Probabilidades de deteção considerando o limiar definido.

# Capítulo 7

## 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.

### 7.1 Considerações Finais

Nesta dissertação foi abordado um domínio recente em termos de investigação científica, as redes de rádio cognitivo. O estudo aqui apresentado versou a análise da mobilidade em redes de rádio cognitivo.

Numa primeira abordagem estudou-se a mobilidade dos utilizadores primários, quando estes se movem segundo o modelo *Random Waypoint*. Para isso analisou-se a distribuição espacial dos nós, verificando que os nós tendem a concentrar-se no centro da área simulada, ou seja, a densidade de nós para o modelo RWPM é superior no centro da área de simulação, enquanto que a probabilidade de encontrar um nó perto da fronteira aproxima-se de zero. A distribuição espacial dos nós para o modelo de mobilidade RWPM dentro de uma determinada região é expressa através de um método formal apresentado em [BHPC04] e [BW<sup>+</sup>02]. Procedeu-se assim à validação dos resultados teóricos desse método, concluindo que a qualidade da distribuição alcançada com o modelo teórico é baixa. A fraca qualidade dos resultados teóricos resulta em grande parte da aproximação numérica que é efetuada em [BW<sup>+</sup>02]. Ao contrário do que também é dito em [BHPC04], constata-se que a distribuição espacial dos nós varia com a velocidade.

Foi realizado o estudo da técnica de *sensing* baseada no detetor de energia realizada por um utilizador secundário. De modo a caracterizar a energia recebida pelo utilizador secundário, conclui-se que a quantidade de energia que chega ao detetor depende de vários fatores, como é o caso do número de utilizadores primários e a probabilidade de estes nós estarem ativos.

Para a parametrização do detetor de energia necessita-se de ter em conta a interferência agregada que os utilizadores primários causam ao utilizador secundário, tendo-se formalizado o problema para uma distribuição espacial dos nós primários segundo um processo de *Poisson*.

De modo a avaliar os efeitos da mobilidade dos utilizadores primários, teve-se como base de partida o artigo [CAP11]. Explorando a diversidade espacial que advém da mobilidade, como consequência de um aumento da velocidade explicado em [AM10], mas neste caso mobilidade de utilizadores secundários, avaliou-se a influência da mobilidade na capacidade de *sensing*. Ao variar a velocidade dos utilizadores primários, observa-se que a capacidade de *sensing* aumenta com o aumento da velocidade. Os valores da probabilidade de deteção são deste modo superiores quando os nós primários se movem com uma maior velocidade. Este resultado não é avaliado em [CAP11], mas este artigo também conclui que a capacidade de *sensing* melhora com um aumento da mobilidade, não avaliando a probabilidade de deteção para diferentes velocidades.

Como esta dissertação tem por base uma tecnologia recente, com uma grande possibilidade de inovação, a motivação esteve sempre presente durante a elaboração desta dissertação. Apenas alguns aspetos desta grande área de investigação foram estudados, ficando em aberto alguns assuntos que podem ser estudados num futuro próximo, encontrando-se os mesmos referidos na secção seguinte.

## 7.2 Trabalho Futuro

Durante todo o desenvolvimento do trabalho considerou-se apenas o estudo do modelo de mobilidade RWPM, seria interessante num trabalho futuro recorrer a outros modelos de mobilidade.

Considerou-se também 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 efeitos da mobilidade neste tipo de *sensing*.

Finalmente, tendo em conta que a parametrização do limiar de energia efetuada para uma distribuição de nós segundo um processo de *Poisson* introduz um erro significativo na probabilidade de deteção quando é utilizado num cenário em que os nós estão distribuídos segundo o modelo RWPM, seria interessante caracterizar a interferência agregada causada pelos utilizadores primários, quando estes se movem segundo o referido modelo. Deste forma seria possível parametrizar com uma boa precisão o limiar de decisão utilizado na tarefa de *sensing*.



# Bibliografia

- [ALVM06] Ian F Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C Vuran, and Shantidev Mohanty. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, 50(13):2127–2159, 2006.
- [AM10] Kamran Arshad and Klaus Moessner. Mobility driven energy detection based spectrum sensing framework of a cognitive radio. In *Cognitive Wireless Systems (UKIWCWS), 2010 Second UK-India-IDRC International Workshop on*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [Bet01] Christian Bettstetter. Smooth is better than sharp: a random mobility model for simulation of wireless networks. In *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 19–27. ACM, 2001.
- [BHPC04] Christian Bettstetter, Hannes Hartenstein, and Xavier Pérez-Costa. Stochastic properties of the random waypoint mobility model. *Wireless Networks*, 10(5):555–567, 2004.
- [BK01] Christian Bettstetter and Oliver Krause. On border effects in modeling and simulation of wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communication Networks (MWCMN)*, 2001.
- [BW<sup>+</sup>02] Christian Bettstetter, Christian Wagner, et al. The spatial node distribution of the random waypoint mobility model. *WMAN*, 11:41–58, 2002.

- [CAP11] Angela Sara Cacciapuoti, Ian F Akyildiz, and Luigi Paura. Primary-user mobility impact on spectrum sensing in cognitive radio networks. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*, pages 451–456. IEEE, 2011.
- [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.
- [CBD02] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2(5), 2002.
- [CMB04] Danijela Cabric, Shridhar Mubaraq Mishra, and Robert 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. IEEE, 2004.
- [Com03] Federal Communications Commission. FCC, ET Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order. Dec. 2003.
- [Gol09] Jafar S. Goldsmith, A. Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective. *Proceedings of the IEEE*, 97:894 – 914, May. 2009.
- [LFO<sup>+</sup>12] Miguel Luis, Antonio Furtado, Rodolfo Oliveira, Rui Dinis, and Luis Bernardo. Energy sensing parameterization criteria for cognitive radios. In *Wireless Communication Systems (ISWCS), 2012 International Symposium on*, pages 61–65. IEEE, 2012.
- [LFO<sup>+</sup>13] Miguel Luis, António Furtado, Rodolfo Oliveira, Rui Dinis, and Luis Bernardo. Towards a realistic primary users’ behavior in single transceiver cognitive networks. 2013.

- [LJSK05] JJ Lehtomaki, Markku Juntti, Harri Saarnisaari, and Sami Koivu. Threshold setting strategies for a quantized total power radiometer. *Signal Processing Letters, IEEE*, 12(11):796–799, 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.
- [M<sup>+</sup>00] Joseph Mitola et al. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio. *Doctor of Technology, Royal Inst. Technol.(KTH), Stockholm, Sweden*, pages 271–350, 2000.
- [RS02] Giovanni Resta and Paolo Santi. An analysis of the node spatial distribution of the random waypoint mobility model for ad hoc networks. In *Proceedings of the second ACM international workshop on Principles of mobile computing*, pages 44–50. ACM, 2002.
- [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.
- [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] Harry Urkowitz. Energy detection of unknown deterministic signals. *Proceedings of the IEEE*, 55(4):523–531, 1967.
- [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.

