Dissertação de Mestrado

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO ACESSO OPORTUNÍSTICO AO ESPECTRO EM UMA REDE DE RÁDIO COGNITIVO COM MULTICANAIS E SENSORIAMENTO IMPERFEITO

BRANISLAV EDGAR FEIJÓ COUCEIRO

SETEMBRO/2016

Análise de Desempenho do Acesso Oportunístico ao Espectro em uma Rede de Rádio Cognitivo com Multicanais e Sensoriamento Imperfeito

Branislav Edgar Feijó Couceiro

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

Santa Rita do Sapucaí 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Couceiro, Branislav Edgar Feijó
C853a
Análise de Desempenho do Acesso Oportunístico ao Espectro em uma Rede de Rádio Cognitivo com Multicanais e Sensoriamento Imperfeito. / Branislav Edgar Feijó Couceiro. – Santa Rita do Sapucaí, 2016.
72 p.

Orientador: Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito.
Dissertação de Mestrado – Engenharia de Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

1. Análise de desempenho 2. Rádio Cognitivo 3. Acesso oportunístico ao espectro 4. sensoriamento imperfeito 5. Cadeias de Markov 6. Engenharia de Telecomunicações. I. Brito, José Marcos Câmara. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

FOLHA DE APROVAÇÃO

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

Coordenador do Curso de Mestrado – INATEL

“Posso todas as coisas naquele que me fortalece”

Filipenses 4-13

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela sua graça sem a qual não seria possível concluir esta dissertação.

Aos meus pais, por tudo que fizeram, têm feito e que farão por mim, pois eles são o pilar central da minha formação acadêmica. Ao Ministério das Telecomunicações e Tecnologias de Informação de Angola, em particular o seu ministro José Carvalho da Rocha por ter acreditado e investido em mim e ao Inatel pela oportunidade que me foi concedida de fazer parte de uma instituição de excelência.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Marcos Câmara Brito pelos ensinamentos, por ser um guia nos momentos mais nebulosos dessa caminhada e principalmente pelo exemplo. Aos meus amigos e companheiros da República Master, Amílcar João, Miguel Francisco e Antônio Cristóvão pela partilha dessa caminhada, que seja eterna a amizade, ao meu amigo Pedro Ivo Guimarães por tudo que fez por mim desde o primeiro dia; aos meus colegas e amigos do mestrado Luzia Natacha, Eliet Cardoso, Elvira Diogo, Dionísio Noque, Indira Almeida, Ana Paulo Poia, Gabriel Bearare, Daniel Siqueira, Thiale Moura e a todos os demais colegas pelo companheirismo; aos colegas da equipe de basquete do Inatel e em especial ao professor Eduardo Ribeiro, a todos os irmãos da Igreja Santificação e Paz e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste sonho.

Ao projeto Centro de Referência em Radiocomunicação (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, por ter financiado parcialmente este trabalho através da Finep, com recursos do Funtel, bolsa número 01.14.0231.00.

LISTA DE FIGURAS vi

LISTA DE TABELAS vii

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS viii

LISTAS DE SÍMBOLOS ix

RESUMO x

ABSTRACT xi

Capítulo 1: Introdução 1

1.1 Introdução ao problema de escassez do espectro de radiofrequência 1
1.2 Rádio cognitivo e o acesso dinâmico ao espectro como soluções para o problema de escassez do espectro de rádio frequência 2
1.2.1 **Modelo de uso exclusivo** 4
1.2.2 **Modelo de partilha aberta** 4
1.2.3 **Modelo de acesso hierárquico** 4
1.3 Acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo 5
1.4 Análise de desempenho do acesso oportunístico ao espectro 7
1.5 Contribuições deste trabalho 9

Capítulo 2: Modelamento do Acesso Oportunístico ao espectro de uma rede de rádio cognitivo com sensoriamento imperfeito 11

2.1 Introdução 11
2.2 Cenário da rede e Considerações 11
2.3 Estratégia de acesso ao canal 14
2.4 Análise da cadeia de Markov de tempo contínuo 16
2.4.1 Diagrama de transição de estado com população infinita 16
2.4.2 Diagrama de transição de estado com população finita 21
2.4.3 Matriz de Transição e Probabilidades em regime estacionário 25
2.5 Métricas de performance e análise de desempenho 26
2.5.3 **Probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar** 27
2.5.4 Capacidade da rede primária 31
2.5.5 Probabilidade de bloqueio de uma chamada secundária 33
2.5.6 **Probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar** 36
2.5.7 Capacidade da rede secundária 39
***2.5.8* Utilização do espectro** 41
2.6 **Conclusão** 43

Capítulo 3: Análise de desempenho do acesso oportunístico ao espectro com sensoriamento imperfeito e cooperativo por fusão de decisão 44

3.1 Introdução 44
3.2 Sensoriamento cooperativo com fusão de decisão 46
3.2.1 Regra OR 47
3.2.2 Regra AND 49
3.2.3 Regra MAJORITÁRIA 50

3.3 Comparação entre o desempenho do acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo com sensoriamento cooperativo versus uma rede de rádio cognitivo com sensoriamento não cooperativo 53
3.3.1 Probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar 55
3.3.2 Capacidade da rede primária 56
3.3.3 Probabilidade de bloqueio de uma chamada secundária 57
3.3.4 Probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar 58
3.3.5 Capacidade da rede secundária 59
***3.3.6* Utilização do espectro** 59
3.4 Conclusão 60
Capítulo 4: Conclusões e trabalhos futuros **62**

4.1 **Conclusões** 62
4.2 **Trabalhos futuros** 63
Anexo A **64**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: **69**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelos de acesso dinâmico ao espectro..... 3
Figura 1.2 Oportunidades espectrais 6
Figura 2.1 Diagrama de estados para 3 canais..... 19
Figura 2.2 Diagrama de estados para 3 canais..... 23
Figura 2.3 Probabilidade de um usuário primário terminar a sua transmissão para o modelo de população infinita 29
Figura 2.4 Probabilidade de um usuário primário terminar a sua transmissão para o modelo de população finita..... 30
Figura 2.4 Capacidade da rede primária para o modelo de população infinita 32
Figura 2.6 Capacidade da rede primária para o modelo de população finita 33
Figura 2.7 Probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada para o modelo de população infinita 35
Figura 2.8 Probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada para o modelo de população finita 36
Figura 2.9 Probabilidade de um usuário secundário terminar a sua transmissão para o modelo de população infinita 38
Figura 2.10 Probabilidade de um usuário secundário terminar a sua transmissão para o modelo de população finita..... 39
Figura 2.11 Capacidade da rede secundária para o modelo de população infinita..... 40
Figura 2.12 Capacidade da rede secundária para o modelo de população finita..... 41
Figura 2.13 Utilização do espectro para o modelo de população infinita 42
Figura 2.14 Utilização do espectro parar o modelo de população finita 43
Figura 3.1 Sensoriamento cooperativo centralizado..... 45
Figura 3.2 Sensoriamento cooperativo descentralizado 45
Figura 3.3 Probabilidades cooperadas obtidas sob a regra *OR* 48
Figura 3.4 Probabilidades cooperadas obtidas sob a regra *AND*..... 49
Figura 3.5 Probabilidades cooperadas obtidas sob a regra *MAJORITÁRIA*..... 51
Figura 3.6 Probabilidade de um usuário primário terminar a sua transmissão 55
Figura 3.7 Capacidade da rede primária..... 56
Figura 3.8 Probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada 57
Figura 3.9 Probabilidade de um usuário secundário terminar a sua transmissão..... 58
Figura 3.10 Capacidade da rede secundária 59
Figura 3.11 Utilização do espectro..... 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Transição de estado partindo de um estado genérico (i,j). Modelo de população finita 24
Tabela 3-1 transição de estado para população infinita e sensoriamento cooperativo partindo de um estado genérico (i,j) 54

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G- *The Third Generation of Mobile Telephone Technology*

AOE- Acesso oportunístico ao espectro

CMTC- Cadeia de Markov de tempo continuo

CF- Centro de fusão

ISM – *Industrial, Sientific and Medical*

M/M/N/N- Modelo de fila Markoviana de N servidores e N posições na fila

M/M/N/N/N- Sistema de Engset para N servidores com perda

PDA- *Personal Digital Assistant*

P_{D-} Probabilidade de detecção

P_F- Probabilidade de Falso Alarme

P_{M-} Probabilidade de má detecção

OSA- *Opportunistic Spectrum Access*

Q_F- Probabilidade cooperada de falso alarme

Q_D-Probabilidade cooperada de detecção

Q_M-Probabilidade cooperada de má detecção

UP- Usuário primário

US- Usuário secundário

CR- Rádio Cognitivo

UWB- *Ultra Wide Band*

WLAN- *Wireless Local Area Network*

LISTAS DE SÍMBOLOS

λ_1- Taxa de chegada de chamadas primárias

λ_2- Taxa de chegada de chamadas secundárias

μ_1- Taxa de serviço de chamadas primárias

μ_2- Taxa de serviço de chamadas secundárias

i- Número de chamadas primárias

j- Número de chamadas secundárias.

$\pi(x)$- Probabilidade de estar no estado *x*

M- Número de canais

S- Conjunto de estados possíveis

Q- Matriz de transição

P_{PT}- Probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar

R_{int1} - Taxa com que usuários secundários interrompem o usuário primário e este é forçado a terminar.

P_{b1} - Probabilidade de uma chamada primária ser bloqueada.

ρ_1 - Capacidade da rede primária

P_{b2} - Probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada.

P_{ST} - Probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar

R_{int2} - Taxa com que o usuário primário interrompe o usuário secundário de forma com que o usuário secundário é forçado a terminar

ρ_2 - Capacidade da rede secundária

U - Utilização do espectro

γ_1 - Taxa média de chamadas primárias admitidas no sistema

γ_2 - Taxa média de chamadas secundárias admitidas no sistema

$\pi(i, j)$ - Probabilidade do estado (i, j)

$T_{(i-1,j)}^{(i,j)}$ - Transição de um estado (i, j) para um estado $(i-1, j)$,

$\pi_i[N]$- Probabilidade do estado *i* em um sistema de Engset com perda para *N* servidores

$\pi^*(x)$- Probabilidade de que dado a chegada de um uma chamada o sistema esteja no estado *(x)*

RESUMO

O rádio cognitivo emergiu como tecnologia promissora para mitigar o problema de escassez de espectro ao explorar oportunisticamente porções do espectro não utilizadas. No acesso oportunístico ao espectro (AOE), a rede secundária sensoria o espectro para identificar oportunidades espectrais instantâneas e locais de modo a utilizá-las sem interferir na comunicação primária. Neste trabalho, é utilizada uma cadeia de Markov de tempo contínuo para modelar e fazer a análise de desempenho do acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo com multicanais e sensoriamento imperfeito (falsos alarmes e má detecções). Os estudos estenderam os resultados previamente apresentados na literatura, que consideraram apenas o cenário com população infinita, de modo a considerar também o cenário de população finita. A análise de desempenho é feita para diferentes parâmetros e são apresentadas discussões e resultados numéricos. Neste trabalho é ainda estudado o sensoriamento cooperativo por fusão de decisão e são apresentadas estratégias a serem utilizadas no centro de fusão para atingir objetivos específicos. Adicionalmente é feita uma comparação entre o desempenho do acesso oportunístico ao espectro com sensoriamento imperfeito e não cooperativo e o desempenho do acesso oportunístico ao espectro com sensoriamento imperfeito e cooperativo com fusão de decisão; discussões e resultados numéricos são apresentados durante todo o trabalho.

Palavras-chaves: Rádio cognitivo, acesso oportunístico ao espectro, análise de desempenho, sensoriamento imperfeito.

ABSTRACT

Cognitive radio have emerging as promising technology to tackle the problem of spectrum scarcity by opportunistically exploit the underutilized radio spectrum. In the opportunistic spectrum access (OSA), the secondary network senses the spectrum to identify local and instantaneous spectrum opportunities in order to utilize those opportunities in a non-intrusive manner to the primary communications. In this work, a continuous time Markov chain was used to model and evaluate the performance of the opportunistic spectrum access in a multichannel cognitive radio network with imperfect sensing (false alarms and misdetection). The study is made as an extension for the infinite population assumption already presented in the literature in a way that it can be also consider for the finite user population with arrival rate dependent assumption. Furthermore, numerical results are presented for both approaches. In this work, is also presented a study on the cooperative sensing by decision fusion and the different strategies that can be used on the fusion center in order to achieve different goals. Additionally, a comparison between the performance of the opportunistic spectrum access in a cognitive radio network with cooperative sensing by decision fusion and the performance of the opportunistic spectrum access in a cognitive radio network with non-cooperative sensing is made. Numerical results and discussions are presented throughout the entire study.

Keywords: Cognitive radio, opportunistic spectrum access, performance evaluation, imperfect sensing.

Capítulo 1: Introdução

1.1 Introdução ao problema de escassez do espectro de radiofrequência

O espectro eletromagnético é um recurso natural utilizado para uma grande variedade de serviços. A utilização do espectro eletromagnético para comunicações sem fio usualmente significa emitir radiações eletromagnéticas sobre o espectro de radiofrequência que é a porção do espectro eletromagnético localizado entre 3 kHz e 300 GHz. A expressiva maioria dos sistemas de comunicação sem fio requer rigorosa proteção contra interferências de outros sistemas de comunicação sem fio. Assim, faixas de frequências são licenciadas aos sistemas de comunicação e serviços tradicionais para seu uso exclusivo. Contudo, com tal abordagem muitas vezes o recurso de rádio é desperdiçado. Por exemplo, o avanço tecnológico nos sistemas de comunicação resulta em melhoria na eficiência espectral de muitos dos sistemas legados, o que faz com que uma parte menor do espectro alocado seja necessário para prover exatamente o mesmo serviço, o que resulta em desperdício. Em sistemas de comunicações militares, de segurança pública e até mesmo em alguns sistemas comerciais são necessários recursos do espectro apenas para operações ocasionais, o que resulta em uma quantidade do espectro frequentemente inutilizada. Outra razão que resulta em desperdício do espectro é um erro econômico no licenciamento de um sistema de comunicação. Apesar do aparente fracasso comercial da tecnologia WIMAX, em alguns países foi alocado e licenciado espectro para a mesma, mas aparentemente muitas operadoras não utilizam a tecnologia WiMAX para prover os seus serviços, o que de novo resulta em desperdício de espectro. Assim, a natureza das aplicações de comunicação sem fio emergentes, bem como a dinâmica dos sistemas econômicos, fazem com que a atual política de regulamentação e uso do espectro resulte em desperdício do precioso e escasso recurso espectro de radiofrequência.

Apesar de quase todo espectro usável para comunicações sem fio já estar alocado, estudos preliminares e observações indicam que grande parte do espectro eletromagnético não é utilizado por um período de tempo significativo em um grande número de localidades [1]. De acordo com a *Federal Communication Commission* (FCC) [1], as taxas de utilização temporais e geográficas do espectro alocado variam entre 15 a 85% e medidas na

faixa de 30 a 300 MHz indicaram que alguns canais têm utilização menor que 1% e a ocupação média é de apenas 5.2%.

O fato é que, muito do precioso espectro eletromagnético, que é perfeito para comunicações sem fio, passa grande parte do tempo inutilizado.

Pode-se então dizer que aquilo que é a aparente escassez do espectro de rádio frequência é, na verdade, um resultado artificial da forma como o espectro é usado e regulamentado.

Assim, para mitigar o problema de escassez do espectro, o rádio cognitivo e o acesso dinâmico ao espectro foram propostos como soluções, tal como é explicado na próxima seção.

1.2 Rádio cognitivo e o acesso dinâmico ao espectro como soluções para o problema de escassez do espectro de rádio frequência

A ideia do rádio cognitivo (RC) foi oficialmente apresentada por Joseph Mitola III, em 1999 [2]. Era uma nova abordagem nas comunicações sem fio que Mitola descreveu como sendo o ponto em que os PDAs (*personal digital assistants*) e redes relacionadas, são suficientemente e computacionalmente inteligentes acerca do recurso de rádio relacionado a comunicações computador-computador para detectar necessidades de comunicação dos usuários em função do contexto, e providenciar recursos de rádio e serviços sem fios mais apropriados a essas necessidades [2].

Haykin, em 2005 [3], definiu o rádio cognitivo como sendo um sistema de comunicação sem fio inteligente, ciente do seu ambiente, que usa a metodologia de aprender sobre ambiente em que está operando e adaptar o seu estado interno, alterando certos parâmetros (por exemplo, potência de transmissão, frequência da portadora e estratégia de modulação) em tempo real, com dois objetivos primários: comunicações altamente confiáveis sempre e aonde for necessária e uso eficiente do espectro eletromagnético.

O conceito de acesso dinâmico ao espectro é que sistemas de rádio se adaptem dinamicamente a buracos espectrais, sobre as quais tenham limitado ou nenhum direito de uso, em resposta a objetivos ou circunstâncias que estão em constante mudança, este

conceito é contrário da atual política de alocação do recurso de rádio, aonde a alocação é fixa e exclusiva para o uso do sistema licenciado.

Assim, o rádio cognitivo é provavelmente a aplicação mais vital do acesso dinâmico ao espectro, onde faixas de frequências licenciadas e/ou janelas de tempo licenciadas são oportunisticamente acessadas por usuários não licenciados de forma que a interferência causada aos usuários licenciados possa ser negligenciada. Essa é uma técnica em que o sistema de rádio se adapta dinamicamente às oportunidades espectrais existentes.

A Figura 1.1 ilustra as estratégias do acesso dinâmico ao espectro, que podem ser classificadas em 3 categorias: modelo de uso exclusivo, modelo de partilha aberta e modelo hierárquico [4], aonde o rádio cognitivo devido a sua capacidade de aprender do seu meio ambiente e adaptar o seu estado interno em tempo real pode operar em qualquer modelo.

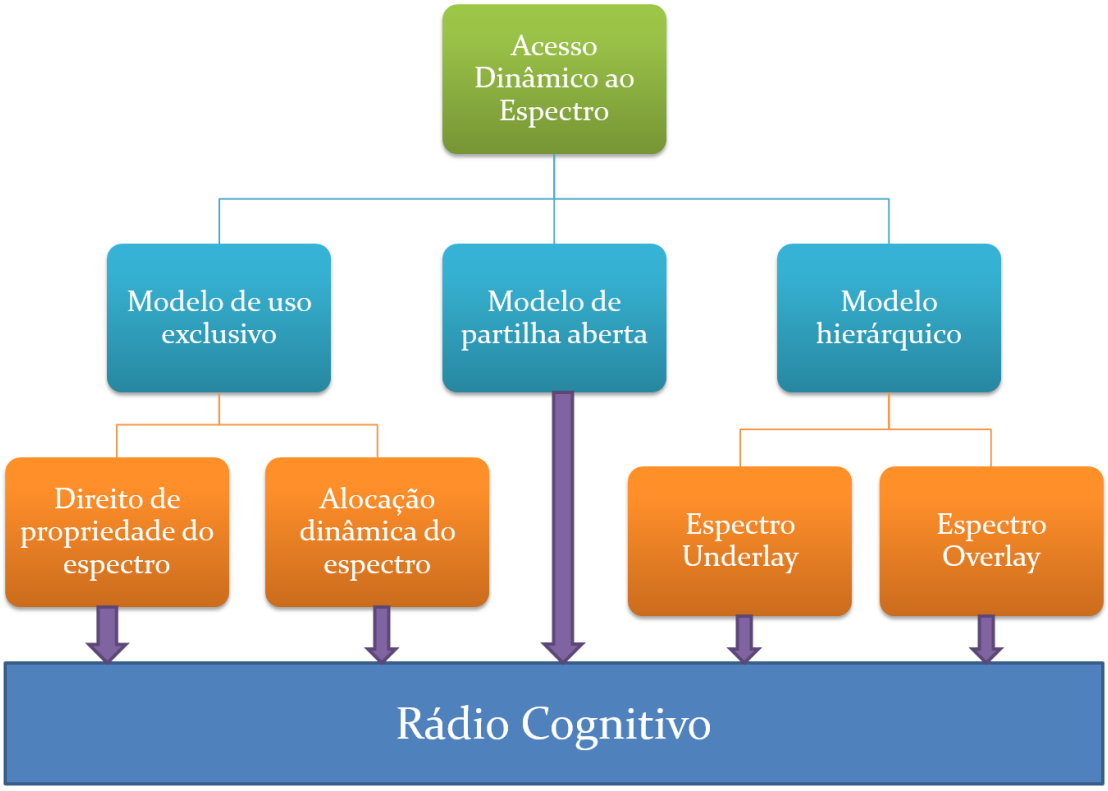

Figura 1.1 *Modelos de acesso dinâmico ao espectro.*

1.2.1 Modelo de uso exclusivo

No modelo de acesso exclusivo é mantida a estrutura básica da atual política de regulamentação, bandas de frequência são licenciadas a serviços para seu uso exclusivo, duas abordagens são consideradas nesse modelo: direito de propriedade do espectro e alocação dinâmica do espectro.

Direito de propriedade do espectro: permite ao licenciado alugar ou partilhar por lucro, bem como escolher livremente a tecnologia. A economia e o mercado deverão jogar um grande papel no mais lucrativo uso deste recurso.

Alocação dinâmica do espectro: essa abordagem tem como objetivo melhorar a eficiência do uso do espectro a partir de uma atribuição dinâmica do espectro usando dados estatísticos do tráfego para diferentes serviços. Por exemplo, em uma região e em uma dada hora o espectro é alocado para um determinado serviço mais demandante do recurso de rádio.

Contudo, essas abordagens não conseguem eliminar lacunas espectrais devido a natureza em rajada do tráfego sem fio.

1.2.2 Modelo de partilha aberta

Nesse modelo todos os usuários têm direitos iguais para o uso do espectro. Esse modelo tem sido aplicado com grande sucesso para serviços de comunicação sem fio que operam nas faixas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and medical*). Por exemplo, redes locais sem fio (WLAN).

1.2.3 Modelo de acesso hierárquico

Esse modelo adota a estrutura hierárquica de acesso com usuários primários (licenciados) e secundários (não licenciados). A ideia básica é disponibilizar o espectro licenciado para que os usuários secundários usem sem causar interferência danosa aos primários, considerando-se duas abordagens: espectro *underlay* e espectro *overlay*.

Espectro Underlay: impõe severas restrições à potência de transmissão dos usuários secundários de modo que a potência de transmissão esteja sempre abaixo da temperatura de ruído dos usuários primários. É permitido ao usuário secundário transmissão simultânea com o usuário primário.

Espectro Overlay (Acesso Oportunístico ao espectro): essa abordagem não impõe necessariamente restrições severas aos usuários secundários na potência de transmissão, mas sim em quando e onde eles podem transmitir. Essa abordagem procura identificar diretamente lacunas espectrais (temporais e espaciais) e permite que usuários secundários usem essas oportunidades espectrais instantâneas sem interferir nos usuários licenciados.

Comparado com o modelo de uso exclusivo do espectro e o modelo de partilha aberta, o modelo de acesso hierárquico é provavelmente o mais compatível com a atual política de alocação do espectro bem como com os legados sistemas de comunicações sem fio.

Neste trabalho foi adaptado para estudo a abordagem *Overlay* ou acesso oportunístico ao espectro sob o modelo de acesso hierárquico do acesso dinâmico ao espectro. No restante do trabalho é adotado apenas o termo acesso oportunístico ao espectro (AOE).

1.3 Acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo

No acesso oportunístico ao espectro, o rádio cognitivo utiliza o espectro eletromagnético nos momentos de inatividade dos usuários primários, denominados de oportunidades espectrais, lacunas espectrais ou buracos espectrais. Oportunidades espectrais definem as faixas de frequências e intervalos de tempo que o espectro está disponível. A Figura 1.2 ilustra tais oportunidades espectrais em um cenário artificial podendo ser observadas as porções do espectro livres e ocupadas em função do tempo e da frequência.

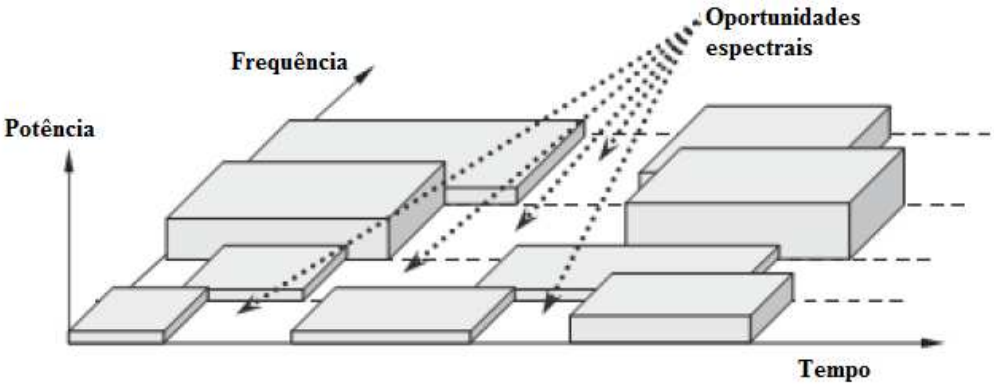

Figura 1.2 *Oportunidades espectrais.*

Os usuários secundários devem identificar de forma rápida e precisa as oportunidades espectrais. A identificação de oportunidades espectrais é crucial no acesso oportunístico ao espectro para garantir uma comunicação não intrusiva à rede primária. Oportunidades espectrais podem ser identificadas através do sensoriamento espectral.

Sensoriamento espectral é o processo em que o detector de oportunidades espectrais identifica a presença ou ausência de usuários primários em um dado canal de comunicação. O processo de sensoriamento pode ser considerado como a realização de um teste de hipóteses binárias, onde a hipótese H_0 representa a ausência do usuário primário e a hipótese H_1 representa a presença do usuário primário.

Assim, a probabilidade de o detector decidir por H_1 dado que a hipótese correta é H_1 (decidir corretamente pela presença do usuário primário) é denominada por probabilidade de detecção (P_D), que é representada como indicado na Expressão (1.1). Se o detector decidir por H_0 dado que a hipótese correta é H_1 (detector decide por ausência do usuário primário dado que o usuário primário estava presente), então acontece uma má detecção o que poderá levar a uma colisão com o usuário primário. A probabilidade de ocorrer uma má detecção (P_M), é representada como indicado na Expressão (1.2). Se o detector decidir por H_1 dado que a hipótese correta é H_0 (detector decidiu por presença de usuário primário dado que o usuário primário estava ausente), então acontece um falso alarme e a oportunidade espectral é desperdiçada. A probabilidade de acontecer um falso alarme (P_F) é representada como indicado na Expressão (1.3). Consequentemente, a probabilidade de o detector decidir corretamente pela ausência do usuário primário é $1\text{-}P_F$. Assim tem-se que:

$$P_D = P(decisão = H_1 \mid H_1) \tag{1.1}$$

$$P_M = P(decisão = H_0 \mid H_1) \tag{1.2}$$

$$P_F = P(decisão = H_1 \mid H_0) \tag{1.3}$$

O objetivo geral do AOE é providenciar oportunidades de transmissão aos usuários secundários, ao mesmo tempo que protege os usuários primários de interferências.

1.4 Análise de desempenho do acesso oportunístico ao espectro

A análise de desempenho em sistemas de telecomunicações é de fundamental importância para avaliações comparativas e tomadas de decisão. Avaliar o desempenho de um sistema é necessário em todos os estágios do ciclo de vida do sistema, e ter o conhecimento do desempenho é particularmente importante sempre que se quer comparar dois ou mais sistemas, bem como dar resposta se vale a pena ou não implementar um sistema alternativo, se, por exemplo, o sistema existente tiver um desempenho pior. A performance de um sistema é estudada para melhorar o entendimento das características do sistema em causa.

Para a análise de desempenho e modelamento da ocupação do espectro em sistemas de telecomunicações, os modelos de diagrama de estado têm sido largamente utilizados, no caso de alocação fixa, os modelos de fila convencionais M/M/N/N têm servido como referência para o modelamento e análise de desempenho de sistemas de multicanais. Para o caso do acesso oportunístico, abordagem similar pode ser tomada usando também uma cadeia de Markov de tempo contínuo (CMTC) para modelar as interações entre usuários primários e secundários. Em [5], é proposto para modelamento das interações entre usuários legados (primários) e secundários uma cadeia de Markov de tempo contínuo multidimensional na qual pode ser analisada as dinâmicas do sistema. Contudo, essa análise assumiu sensoriamento perfeito. A mesma abordagem de diagrama de estado multidimensional foi usada para modelamento do acesso oportunístico em [6]-[7], onde os autores utilizam uma cadeia de Markov de tempo contínuo para mostrar que uma maior capacidade pode ser encontrada por parte dos usuários secundários se o acesso

oportunístico for implementado com agregação de canais; novamente considera-se capacidade de sensoriamento perfeita por parte dos usuários secundários. Em [8], os autores fizeram uma extensão da abordagem de [7] considerando agora vários perfis de tráfego na rede secundária e com níveis de prioridades diferentes, mas mantiveram a consideração que o sensoriamento é perfeito. Em [9], os autores modelaram o acesso oportunístico ao espectro como uma cadeia de Markov e consideraram que se um canal primário estiver desocupado ele pode ser repartido entre múltiplos usuários secundários. A análise considerou um modelo com população finita e sensoriamento perfeito. Em [10], fez-se a análise de desempenho para um sistema de rádio cognitivo considerando sensoriamento imperfeito, contudo, foi apresentado o estudo apenas para o caso especifico de 3 canais. Em [11] os autores apresentaram uma extensão do estudo apresentado em [10], permitindo que a mesma abordagem fosse possível para qualquer número de canais. A característica proeminente da abordagem em [10]-[11] é que o diagrama de estado tem taxas de transição dependente do estado em cada nó. Essas transições são encontradas tendo em vista todas as possibilidades do sensoriamento imperfeito bem como todas as possibilidades da sequência de busca do canal. Contudo, no modelo apresentado em [10]-[11], considera-se que a população de usuários primários e secundários é infinita e a taxa de chegada de chamadas constante e independente do número de chamadas em serviço. Em um cenário mais prático, a taxa de chegada de chamadas é dependente do número de chamadas em serviço. Considerando que um usuário quando está sendo servido não gera mais chamadas, então o número de chamadas que podem chegar ao sistema decresce à medida que o número de chamadas em serviço aumenta, de tal forma que se, por exemplo, todos os usuários estiverem sendo servidos, nenhuma chamada chega ao sistema. Assim, a taxa de chamada precisa ser proporcional ao número de usuários que não estão sendo servidos (usuários que podem gerar chamadas novas).

Assim, verificou-se que as pesquisas relacionadas com o modelamento e análise de desempenho do acesso oportunístico ao espectro usando diagrama de estado têm sido pouco realistas pelo fato de negligenciarem os efeitos dos erros de sensoriamento que em um sistema real são inevitáveis, ou quando considerado o erro de sensoriamento, por considerarem apenas o modelo de população infinita.

1.5 Contribuições deste trabalho

O objetivo deste trabalho é então estender as análises previamente apresentadas na literatura considerando um modelo com população finita e sensoriamento imperfeito. Ainda, analisa-se também a influência do sensoriamento cooperativo no desempenho do sistema.

Em resumo, as contribuições deste trabalho são:

- Dois novos parâmetros de análise de desempenho (capacidade da rede primária e capacidade da rede secundária) foram proposto em complementação aos parâmetros proposto em [10]-[11].
- Os modelos apresentados em [10]-[11] foram estendidos para considerar o caso em que a população é finita (trafego com desestimulo).
- Comparou-se o desempenho de um sistema com sensoriamento cooperativo com o sistema com sensoriamento não cooperativo.

Como resultado das pesquisas desenvolvidas neste trabalho, os seguintes artigos foram publicados:

- ***"Performance Evaluation of the Opportunistic Spectrum Access in a Cognitive Radio Network with Imperfect Sensing"*** publicado em The Fifteenth International Conference on Networks (ICN-2016) Fevereiro 21 - 25, 2016 - Lisboa, Portugal.

- ***"Performance Evaluation of the Opportunistic Spectrum Access in a Cognitive Radio Network with Cooperative and Non-cooperative Sensing"*** publicado em The IEEE 3rd International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC) Maio 11-13, 2016 -Hammamet, Tunísia

Além deste capítulo introdutório, este trabalho apresenta outros três capítulos, cada um apresentado de forma resumida a seguir. No Capítulo 2 são estudados os modelos de diagrama de estados para modelamento do acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo com sensoriamento imperfeito. O estudo é feito levando-se em consideração que a população de usuários primários e secundários é infinita, com taxa de chegada de chamadas constante, bem como considerando que a população de usuários

primários e secundários é finita e conhecida, com taxa de chegada de chamadas dependente do número de usuários com chamadas em progresso; a análise de desempenho é feita para diferentes parâmetros e são apresentadas discussões e resultados numéricos. No Capítulo 3 é estudado o sensoriamento cooperativo por fusão de decisão e são apresentadas estratégias para atingir objetivos específicos, adicionalmente é feita uma comparação entre o desempenho do acesso oportunístico ao espectro com sensoriamento imperfeito e não cooperativo e o desempenho do acesso oportunístico ao espectro com sensoriamento imperfeito e cooperativo com fusão de decisão. Finalmente, conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 4.

Capítulo 2: Modelamento do Acesso Oportunístico ao espectro de uma rede de rádio cognitivo com sensoriamento imperfeito

2.1 Introdução

O uso da abordagem de diagrama de estado para análise de desempenho e modelamento da ocupação do espectro têm ganhado significativa relevância com a proliferação de estratégias de acesso ao espectro. Em [5]-[11], vários modelos de diagrama de estado são propostos considerando várias estratégias para o acesso oportunístico ao espectro, mas o modelo de diagrama de estado apresentado em [10]-[11] tem um aspecto particularmente diferente e provavelmente mais realístico, porque apresenta uma abordagem para análise de desempenho do acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo considerando sensoriamento imperfeito. Contudo, o modelo apresentado em [10]-[11] faz o estudo apenas para o caso em que a população de usuários é infinita e o trafego é constante.

Neste Capítulo adota-se o mesmo modelo usado em [10]-[11]. Mas a análise será feita tanto para a consideração de que a população de usuários é infinita, com taxa de chegada de chamadas constante, bem como para quando a população de usuário é finita e conhecida, com taxa de chegada de chamadas proporcional ao número de usuários que podem gerar chamadas novas. O sistema é modelado e várias métricas de desempenho são consideradas para a sua análise, nomeadamente: probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar, capacidade da rede primária, probabilidade de bloqueio da rede secundária, probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar, capacidade da rede secundária e utilização do espectro.

2.2 Cenário da rede e Considerações

Considere uma rede com M canais disponíveis e que esses canais são partilhados entre usuários primários e secundários, sendo que os usuários primários têm prioridade sobre os usuários secundários.

Tal como em [10]-[11], no modelo de população infinita considera-se que os usuários primários e secundários geram chamadas com taxas λ_1 e λ_2, respectivamente. Chamadas primárias e secundárias são servidas com taxas μ_1 e μ_2, respectivamente. Considera-se que as chegadas de chamadas primárias e secundárias são processos poissonianos e que o tempo de serviço para as chamadas primárias e secundárias são exponencialmente distribuídos.

O modelo de população finita considera que o número de usuários primários (*UP*) é conhecido e igual ao número de canais, de tal forma que cada usuário primário tenha o seu próprio canal (cenário típico para o caso de alocação fixa para o uso exclusivo), e considera que o número de usuários secundários (*US*) é também conhecido.

Similar a [9], um processo *on-off* é associado a cada usuário para o serviço de uma chamada no modelo de população finita. O processo *on-off* é um processo alternado onde um usuário alterna entre os estados *on* e *off*, o período usado para servir um usuário é chamado período *on*, e o tempo entre consecutivos períodos *on* é chamado período *off*. O tempo de serviço de uma chamada (período *on*) é assumido ser exponencialmente distribuído com médias $(1/\mu_1)$ e $(1/\mu_2)$ para usuários primários e secundários, respectivamente. E o tempo do período *off* é assumido ser exponencialmente distribuído com medias $(1/\lambda_1)$ e $(1/\lambda_2)$ para usuários primários e secundários, respectivamente. Ou seja, quando um usuário primário está sendo servido (período *on*) ele não gera chamadas e a sua chamada é servida a uma taxa μ_1, e quando um usuário primário não está sendo servido (período *off*) ele gera chamadas a uma taxa λ_1.

Idênticas considerações valem para um usuário secundário com taxas μ_2 e λ_2.

As demais considerações são mantidas idênticas para os dois modelos, sendo:

- Todos os canais são considerados homogêneos.
- O tempo de sensoriamento e o tempo para realizar *handover* de espectro são negligenciados comparados com a duração de dois eventos consecutivos, ou seja, não acontece transição de estado no período de sensoriamento.
- Usuários primários sempre sabem da existência de outros usuários primários. E, portanto, não há colisões entre usuários primários.

- Usuários secundários sempre sabem quais são os canais ocupados por outros usuários secundários. Isto pode ser feito por intermédio de um canal comum de controle da rede secundária [12]. Ou através de um protocolo de múltiplo acesso na rede secundária [13]. Portanto, usuários secundários nunca irão usar ou sensoriar canais que já estejam sendo usados por outros usuários secundários. Assim sendo, não há colisões entre usuários secundários.
- Usuários secundários procuram por canais livre de forma aleatória e com iguais probabilidades. A busca termina quando um canal livre é encontrado ou todos os canais são definidos como ocupados [14]. Canais livres são detectados como ocupados com uma probabilidade de falso alarme P_F e canais ocupados são detectados como livres com uma probabilidade de má detecção P_M.
- Usuários primários ocupam os canais de forma aleatória [14].
- Em um sistema real, o usuário primário pode experimentar interrupção se um usuário secundário procurando por canais livres detectar incorretamente que um canal que está sendo utilizado pelo primário está livre e transmitir nesse canal; outro tipo de interrupção se dá quando um usuário secundário ativo em um dado canal falha na detecção da chegada de um primário no canal em que o secundário está transmitindo. Referimo-nos a tais erros como má detecção de classe A e classe B, respectivamente [15]. Neste trabalho, tal como em [10]-[11], assume-se que apenas a má detecção de classe A acontece. Consequentemente, um usuário secundário ativo em um canal sempre detecta a chegada de um usuário primário no canal em que está transmitindo de forma que a má detecção de classe B nunca ocorre. Depois disto, o usuário secundário inicia uma busca por um novo canal livre para que possa continuar a sua transmissão. Durante esta fase, o usuário secundário sensoreia os demais canais com ordem aleatória até que encontre um canal livre ou todos os canais sejam definidos como ocupados. Canais livres são detectados como ocupados com uma probabilidade de falso alarme P_F e canais ocupados são detectados como livres com uma probabilidade de má detecção P_M.
- Em caso de colisão entre um usuário primário e um usuário secundário, ambas as transmissões serão perdidas e ambos os usuários deixam o canal [15].
- Todas as transições são instantâneas

2.3 Estratégia de acesso ao canal

Em uma rede de rádio cognitivo com M canais licenciados em que usuários secundários tenham acesso a eles oportunisticamente nos períodos de inatividade dos usuários primários, eventos que originam transição de estado são:

1) ***Chegada de um usuário primário***: se um usuário primário chegar a um canal que não esteja sendo ocupado por um usuário secundário, ele simplesmente transmite e não há nenhuma variação de estado do ponto de vista da rede secundária, mas se um usuário primário chegar a um canal que está sendo ocupado por um secundário, o usuário secundário detecta a presença do primário e deixa o canal para o uso do primário. Depois disso, o usuário secundário inicia uma busca por um novo canal livre para que possa continuar a sua transmissão. Durante essa fase, o usuário secundário sensoreia os demais canais com ordem aleatória até que encontre um canal livre ou todos os canais sejam definidos como ocupados. Se o usuário secundário detectar um novo canal como estando livre e este canal estiver efetivamente livre, o usuário secundário poderá continuar a sua transmissão naquele canal. Mas se o usuário secundário detectar um novo canal como estando livre e este canal estiver ocupado por outro usuário primário, então o usuário secundário transmite no referido canal, o que resultará em colisão com o primário que lá está. Assim, as chamadas (primária e secundária) serão forçadas a terminar. Se o usuário secundário, após a busca por um novo canal livre, não detectar nenhum canal novo como livre, quer seja porque não há mais canais livres ou porque canais que estejam livres foram detectados como ocupados, então a chamada do secundário que foi interrompida pela chegada do primário será forçada a terminar.

2) ***Partida de um Primário***: A partida de um usuário primário pode acontecer nos seguintes cenários:

a) Sempre que o usuário primário terminar a sua chamada regularmente, ou seja, se durante todo o tempo de serviço a sua chamada não for interrompida por nenhum usuário secundário.
b) Sempre que o usuário primário for forçado a deixar o sistema antes de concluir efetivamente a sua chamada, ou seja, quando a chamada do usuário primário for interrompida por um usuário secundário por causa de um erro de detecção.

3) ***Chegada de um secundário***: quando houver uma chegada de um usuário secundário, este inicia uma busca por um canal livre para que possa iniciar a sua chamada. Durante essa fase, o usuário secundário sensoreia os canais com ordem aleatória até que encontre um canal livre ou todos os canais forem definidos como ocupados. Se o usuário secundário detectar um canal como estando livre e este canal estiver efetivamente livre, o usuário secundário poderá então iniciar a sua chamada, mas se o usuário secundário detectar um canal como estando livre e este canal estiver ocupado por um usuário primário, o usuário secundário transmitirá no referido canal, o que resultará em colisão com o primário que lá está. Assim, a chamada secundária não poderá iniciar por causa da colisão e a chamada primária será forçada a terminar. A chamada secundária poderá ainda ser bloqueada se o usuário secundário, após a busca por um canal livre, não detectar nenhum canal como livre, quer seja porque não haja canais livres ou porque canais que estejam eventualmente livres foram detectados como ocupados.

4) ***Partida de um usuário secundário***: A partida de um usuário secundário que tenha conseguido com sucesso um canal livre para iniciar a sua chamada acontecerá nos seguintes casos:
   a) Sempre que o usuário secundário terminar a sua chamada regularmente, ou seja, durante todo o tempo de serviço da sua chamada o usuário secundário não for interrompido por nenhum usuário primário de modo que seja forçado a terminar.
   b) Sempre que o usuário secundário for forçado a deixar o sistema antes de concluir efetivamente a sua transmissão.

2.4 Análise da cadeia de Markov de tempo contínuo

A ocupação do espetro foi modelada como uma cadeia de Markov de tempo contínuo bidimensional, em que $x = \{i,j\}$ é a representação geral dos estados da cadeia, onde i representa o número de chamadas primárias em serviço, e j o número de chamadas secundárias em serviço. O parâmetro $\pi(x)$ representa a probabilidade do sistema estar no estado x, ou seja, a probabilidade de que i chamadas primárias estejam no sistema e j chamadas secundárias estejam no sistema, por exemplo, o estado $x = \{2,1\}$ significa que duas chamadas primárias e uma chamada secundária estão a ser transmitidas.

O conjunto de estados possíveis será $S = \{x|0 \leq i \leq M;\ 0 \leq j \leq M;\ 0 \leq (i+j) \leq M\}$; onde $\boldsymbol{M}$ é o número de canais disponíveis.

2.4.1 Diagrama de transição de estado com população infinita

As taxas de transição de estado são obtidas analisando todos os possíveis eventos que geram transição de estado e todas as possíveis opções de detecção a partir do estado em análise.

Por exemplo, considere uma rede com 3 canais para o modelo de população infinita, e analisemos a cadeia no estado $x = \{1,0\}$, o que significa que existe uma chamada primária no sistema e zero chamadas secundárias.

A transição do estado $x = \{1,0\}$ para o estado $x = \{0,0\}$, pode ocorrer em quatro cenários diferentes:

1) Primeiramente, pode ocorrer se o usuário primário terminar regularmente a sua chamada com taxa μ_1;
2) Pode ocorrer também se chegar um usuário secundário exatamente no canal ocupado pelo usuário primário (com probabilidade $1/3$ porque o usuário secundário busca por canais livre de forma aleatória e com iguais probabilidades), e este, após o sensoriamento, decidir que esse canal está livre (com probabilidade P_M) e transmitir no mesmo canal resultando em colisão. Nesse caso, ambas as transmissões serão

perdidas e a cadeia transitará para o estado $x = \{0,0\}$. Então, a taxa de transição neste cenário é $1/3\lambda_2 P_M$;

3) Outra possibilidade de transição para o estado $x = \{0,0\}$ é se o usuário secundário chegar a um dos dois canais livres (com probabilidade $2/3$), mas depois do sensoriamento decidir que o canal está ocupado (com probabilidade P_F). Neste caso, o usuário secundário continua a sua busca e se ele decidir que irá para o canal ocupado pelo usuário primário (com probabilidade $1/2$) e não detectar a presença do usuário primário (com probabilidade P_M) e transmitir neste canal, o usuário primário e o usuário secundários colidirão e a cadeia irá para o estado $x = \{0,0\}$, com uma taxa de transição de $2/3\ \lambda_2\ P_F\ ½\ P_M$;

4) A última possibilidade é se o usuário secundário chegar a um dos dois canais livres (com probabilidade $2/3$), mas depois do sensoriamento decidir que o canal está ocupado (com probabilidade P_F). Então, o usuário secundário continua a sua busca por um canal livre. Se o usuário secundário, buscando por outro canal, decidir sensoriar o outro canal livre (com probabilidade $1/2$) e após o sensoriamento decidir que este canal também está ocupado (com probabilidade P_F), então o usuário secundário continua buscando por um canal livre e sensoreia o canal ocupado pelo primário e, se decidir que o canal está livre (com probabilidade P_M), o usuário secundário transmite nesse canal colidindo com o primário que lá está e leva a cadeia para o estado $x = \{0,0\}$, com taxa $2/3\lambda_2 P_F 1/2 P_F P_M$.

Assim, a taxa de transição total do estado $x = \{1,0\}$ para o estado $x = \{0,0\}$ é:

$$\mu_1 + \lambda_2 \frac{1}{3} P_M + \lambda_2 \frac{2}{3} P_F \frac{1}{2} P_M + \lambda_2 \frac{2}{3} P_F \frac{1}{2} P_F P_M \tag{2.1}$$

Observe outro exemplo para o modelo de população infinita. Analise agora a cadeia no estado $x = \{1,1\}$, o que significa que existe no sistema uma chamada primária e uma chamada secundária.

A transição do estado $x = \{1,1\}$ para o estado $x = \{1,2\}$, pode ocorrer em dois cenários diferentes:

1) Primeiramente, pode ocorrer se o usuário secundário chegar exatamente no canal livre. Como ele procura por canais livres de forma aleatória e com iguais probabilidades e sabendo que ele conhece o canal ocupado pelo outro usuário secundário, então ele tem apenas duas opções de busca e a probabilidade de ele ir exatamente ao canal livre é *1/2*, se ele chegar exatamente no canal livre e decidir corretamente que o canal está livre com probabilidade ($1-P_F$), ele transmite neste canal e leva a cadeia para o estado $x = \{1,2\}$,com uma taxa de $\lambda_2\, 1/2\, (1-P_F)$;
2) Pode ocorrer também a transição para o estado $x = \{1,2\}$ se o usuário secundário chegar exatamente ao canal ocupado pelo usuário primário (com probabilidade *1/2)* e decidir corretamente que esse canal está ocupado (com probabilidade P_D). Neste caso, o usuário secundário continua a busca e vai para o canal que está livre e após sensoriamento decidir corretamente que o canal está livre com probabilidade ($1-P_F$) e transmitir neste canal. Neste caso, a cadeia vai para o estado $x = \{1,2\}$ a uma taxa de $\lambda_2\, ½\, P_D(1-P_F)$;

   Assim, a taxa de transição total do estado $x = \{1,1\}$ para o estado $x = \{1,2\}$ é:

$$\lambda_2 \frac{1}{2}(1-P_F) + \lambda_2 \frac{1}{2} P_D (1-P_F) \qquad (2.2)$$

A mesma abordagem deve ser usada para determinar a taxa de transição de qualquer par de estados diretamente conectados.

A Figura 2.1 ilustra a cadeia de Markov que modela o acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo com multicanais e sensoriamento imperfeito, para o caso específico de 3 canais ($M = 3$) apresentada em [10]-[11] e reproduzida aqui.

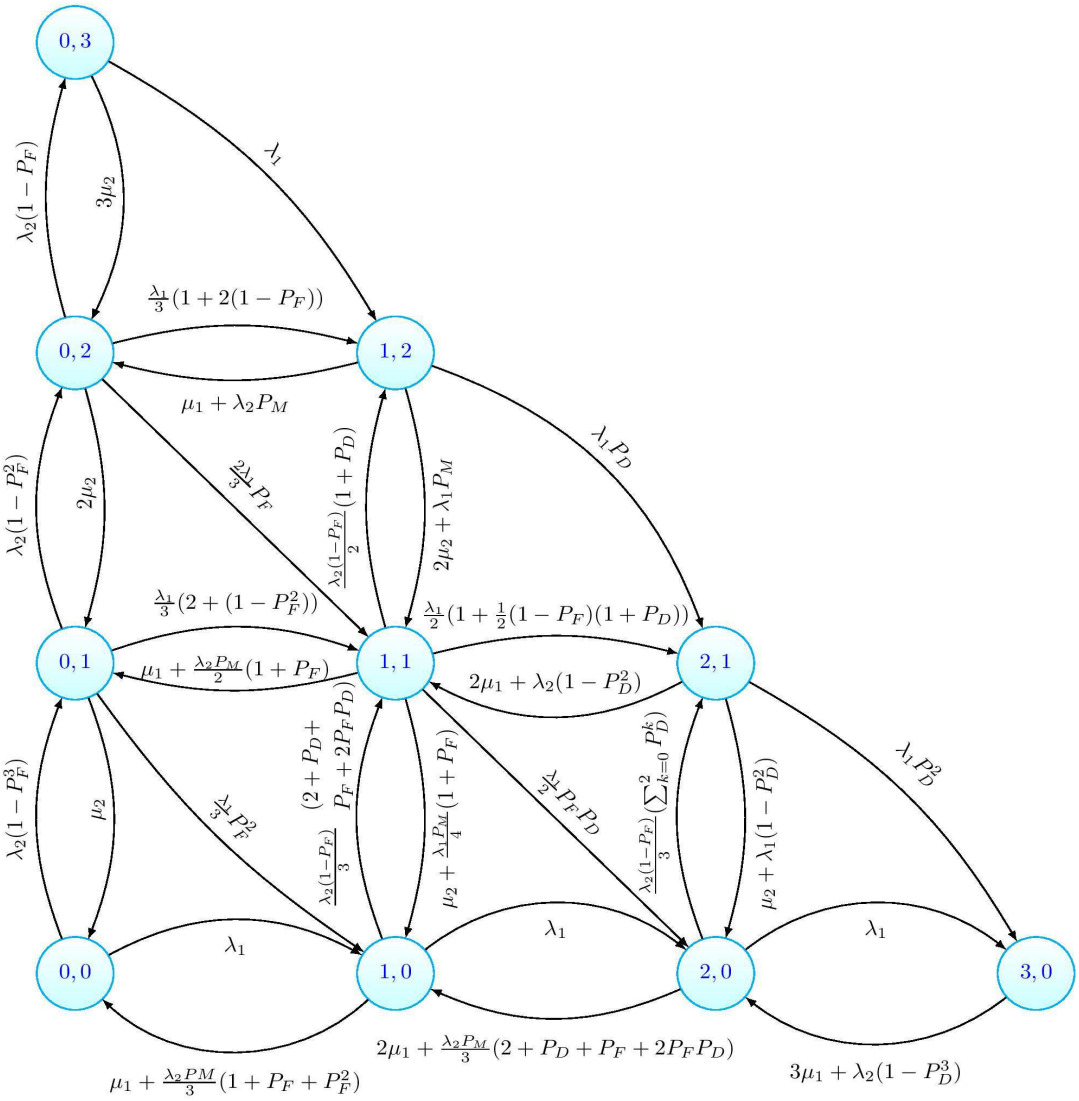

Figura 2.1 *Diagrama de estados para 3 canais com população infinita*

Para generalizar a cadeia de Markov para o modelo de população infinita e para qualquer número de canais, as taxas de transição podem ser encontradas de forma recursiva utilizando as seguintes expressões genéricas apresentadas em [11] e reproduzidas aqui.

Considere o caso em que o número de usuários secundários em serviço aumenta para um. Nesse caso tem-se a recursão [11]:

$$f(i,k)=\frac{k}{i+k}(1-P_F)+\frac{k}{i+k}P_F\,f(i,k-1)+\frac{i}{i+k}P_D\,f(i-1,k) \tag{2.3}$$

Onde *i* é o número de usuários primários e *k* é o número de canais livres, ou seja, não ocupados por usuários primários ou secundários. A função *f(.)* denota a função que aumenta o número de usuários secundários de um. Assim, a taxa de transição é encontrada ao multiplicar *f(i,k)* por λ_2, de tal forma que $T_{(i,j+1)}^{(i,j)} = \lambda_2 f(i,k)$. Para os casos particulares em que *i=0* ou *k=1* tem-se a função *f(.)* calculada por[11]:

$$\begin{cases} f(0,k) = 1 - P_F{}^K \\ f(i,1) = \dfrac{1}{i+1} f(1-P_F) \sum_{n=0}^{i} P_D{}^i \end{cases} \tag{2.4}$$

Considere agora o caso onde o número de usuários primários reduz de um. Obtém-se a recursão da seguinte forma [11]:

$$g(i,k) = \frac{i}{i+k} P_M + \frac{i}{i+k} P_D g(i-1,k) + \frac{k}{i+k} P_F g(i,k-1) \tag{2.5}$$

A transição resultante é $T_{(i-1,j)}^{(i,j)} = i\mu_1 + \lambda_2 g(i,k)$. A função *g(.)* denota a função em que o número de usuários primários decresce de um.

Para o caso em que o número de usuários primários aumenta de um, obtém-se a taxa de transição da seguinte forma [11]:

$$T_{(i+1,j)}^{(i,j)} = \lambda_1 \frac{M-i-j}{M-i} + \lambda_1 \frac{j}{M-i} f(i, M-i-j) \tag{2.6}$$

No caso em que o número de usuários secundários decresce de um, a taxa de transição é obtida da seguinte forma [11]:

$$T_{(i,j-1)}^{(i,j)} = j\mu_2 + \lambda_1 \frac{j}{M-i} \mathrm{g}(i, M-i-j) \tag{2.7}$$

Finalmente para o caso em que o número de usuários primários aumenta de um e o número de usuários secundários diminui de um obtém-se a taxa de transição da seguinte forma [11]:

$$T_{(i+1,j-1)}^{(i,j)} = \lambda_1 \frac{j}{M-i}\left[1 - f(i, M-i-j)\,\mathrm{g}(i, M-i-j)\right] \tag{2.8}$$

2.4.2 Diagrama de transição de estado com população finita

Veja agora como são encontradas as taxas de transição do modelo para o caso de população finita. Para construir a cadeia de Markov para o modelo de população finita leva-se também em consideração o número de usuários que estão sendo servidos e o número de usuários que podem gerar chamadas novas.

Por exemplo, considere um sistema com 3 canais, 3 usuários primários e 4 usuários secundários e analisemos a cadeia no estado $x = \{1,1\}$.

A transição do estado $x = \{1,1\}$ para o estado $x = \{0,1\}$ pode ocorrer em 3 cenários diferentes:

1) Se a chamada do usuário primário terminar regularmente o seu serviço com taxa μ_1;

2) Se um usuário secundário chegar ao canal ocupado pelo usuário primário (com probabilidade ½); como há um usuário secundário sendo servido, então apenas os outros 3 usuários que estão ociosos podem gerar chamadas. Assim, a taxa de chegada neste caso é $3\lambda_2$. O usuário com a nova chegada falha no sensoriamento do canal onde se encontra o usuário primário (com probabilidade P_M) e transmite neste canal, resultando em colisão. Neste caso, ambas transmissões são perdidas levando a cadeia para o estado $x = \{0,1\}$. Como o usuário secundário procura por canais novos de forma aleatória e com iguais probabilidades, a taxa de transição neste cenário é $3\lambda_2 P_M 1/2$.

3) Outra possibilidade é se um usuário secundário chegar ao canal livre (com probabilidade *1/2*), mas após o sensoriamento decidir que o canal está ocupado

(com probabilidade P_F). Neste caso, o secundário continua a sua busca por canais livres e vai para o canal ocupado pelo usuário primário e falha no sensoriamento (com probabilidade P_M) e transmite neste canal colidindo com o usuário primário e ambas transmissões são perdidas, levando a cadeia para o estado $x = \{0,1\}$, com taxa $3\lambda_2 \; P_F \; ½P_M$. Assim, a transição total do estado $x = \{1,1\}$ para o estado $x = \{0,1\}$ será:

$$\mu_1 + 3\lambda_2 \frac{1}{2} P_M + 3\lambda_2 \frac{1}{2} P_F P_M \tag{2.9}$$

Com a mesma abordagem determina-se a taxa de transição de qualquer par de estados diretamente conectado. A Figura 2.2 ilustra cadeia de Markov com as suas taxas de transição explícitas para o caso de 3 canais, 3 usuários primários e 4 usuários secundários.

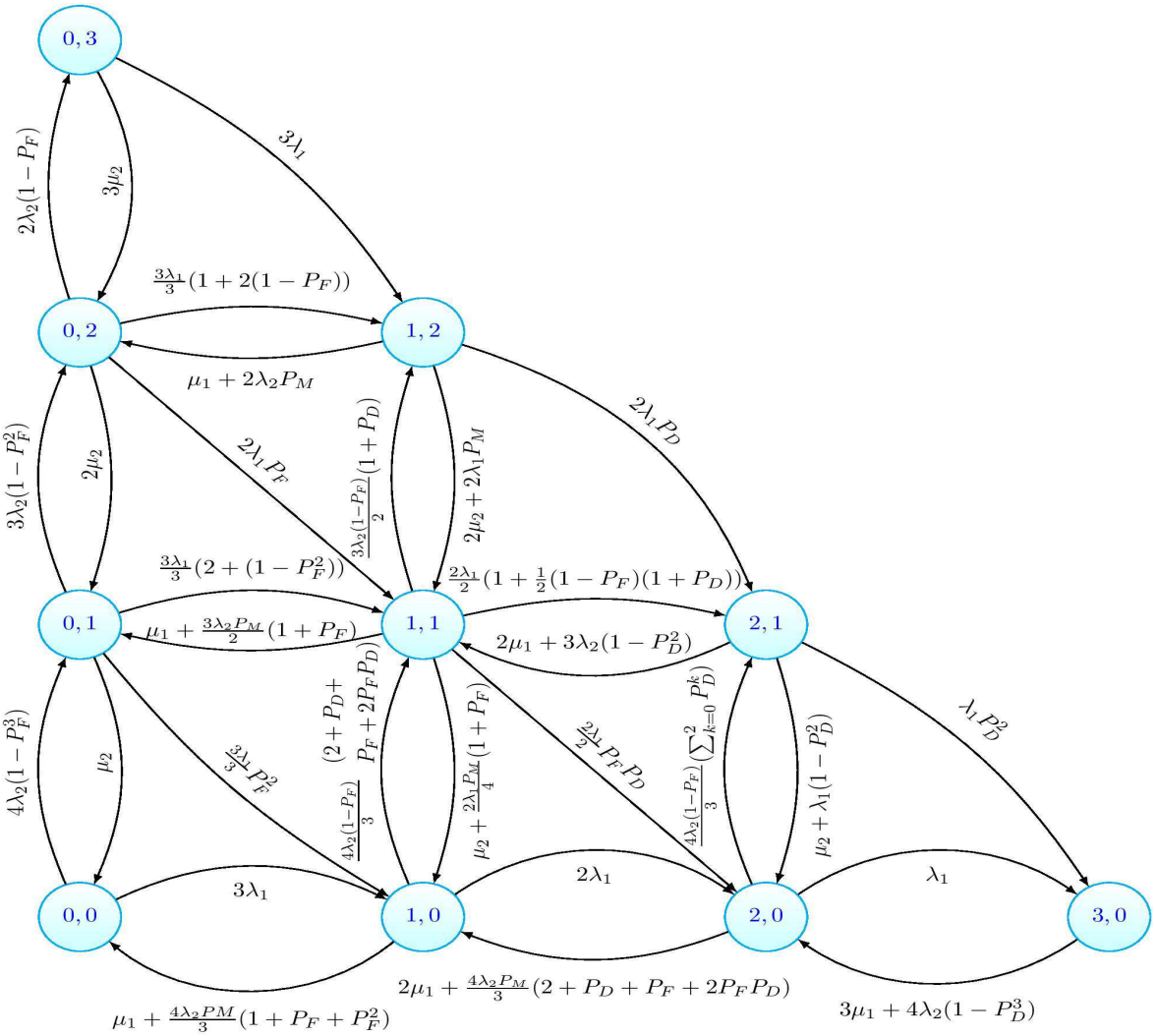

Figura 2.2 *Diagrama de estados para 3 canais com população finita*

Como se pode observar, no modelo de população finita as taxas de chegada de chamadas primárias bem como as de chamadas secundárias são dependentes do número de chamadas em serviço, e como cada estado da cadeia indica o número de chamadas sendo servidas, então a taxa de chegada da cadeia de Markov para população finita se torna dependente do estado, ao contrário da taxa de chegada da cadeia de Markov para população infinita, que é independente do estado.

Para o modelo de população finita, as expressões genéricas que podem ser usadas para determinar as taxas de transição de um estado para outro diretamente conectado a este,

para qualquer número de canais *M*, e para qualquer número de usuários primários e secundários são apresentadas na Tabela 2.1.

As expressões genéricas foram encontradas ao se estudar as taxas de transição para vários estados e para vários números de canais até que as taxas de transição se tornam recorrentes.

Tabela 2-1 Transição de estado partindo de um estado genérico (i,j). Modelo de população finita

Estado destino	Condição	Taxa de transição
$(i+1, j)$	$i < M$	$\frac{(PU-i)\lambda_1\alpha}{M-i} + \frac{(PU-i)\lambda_1 j}{M-i}\left[\sum_{t=1}^{\alpha}\binom{\alpha}{t}(1-P_F)^t P_F^{\alpha-t}\left(\sum_{r=0}^{i}\binom{i}{r}P_D^{\,r}P_M^{\,i-r}\frac{t}{t+(i-r)}\right)\right]$
$(i-1, j)$	$i > 0$	$i\mu_1 + (SU-j)\lambda_2\left[\sum_{t=1}^{i}\binom{i}{t}P_M^{\,t}P_D^{\,(i-t)}\left(\sum_{k=0}^{\alpha}\binom{\alpha}{k}P_F^{\,k}(1-P_F)^{\alpha-k}\frac{t}{t+(\alpha-k)}\right)\right]$
$(i, j+1)$	$(i+j) < M$	$(SU-j)\lambda_2\left[\sum_{t=1}^{\alpha}\binom{\alpha}{t}(1-P_F)^t P_F^{\,[\alpha-t]}\left(\sum_{r=0}^{i}\binom{i}{r}P_D^{\,r}P_M^{\,i-r}\frac{t}{t+(i-r)}\right)\right]$
$(i, j-1)$	$j > 0, i = 0$	$j\mu_2$
$(i, j-1)$	$j > 0, i > 0$	$j\mu_2 + \frac{(PU-j)\lambda_1 j}{M-i}\left[\sum_{t=1}^{i}\binom{i}{t}P_M^{\,t}P_D^{\,i-t}\left(\sum_{r=0}^{\alpha}\binom{\alpha}{r}P_F^{\,r}(1-P_F)^{\alpha-r}\frac{t}{t+\alpha-r}\right)\right]$
$(i+1, j-1)$	$i < M, j > 0$	$\frac{(PU-i)\lambda_1 j}{M-i}P_F^{\,\alpha}P_D^{\,i}$

$\alpha = \left[M - (i+j)\right]$

2.4.3 Matriz de Transição e Probabilidades em regime estacionário

Seja Q a matriz de transição da CMTC. Uma vez determinada a transição total de um estado a para um estado b, que é a soma de todas as transições do estado a para o estado b, considerando todas as possíveis atividades dos usuários primários e secundários para todo $(a \neq b) \in S$ designado q_{ab}, os elementos da diagonal principal em Q, designadamente, q_{aa}, $a \in S$ são encontrados como em [8]:

$$q_{aa} = -\sum_{b \in S, b \neq a} q_{ab} \tag{2.10}$$

As probabilidades em regime estacionário $\pi(x)$ podem ser calculadas a partir da matriz de transição e a equação de normalização dada por:

$$\pi Q = 0, \sum_{x \in S} \pi(x) = 1 \tag{2.11}$$

Onde π é o vetor de estado estacionário.

Alternativamente, as probabilidades em regime estacionário podem ser calculadas utilizando as equações globais de equilíbrio. Tais equações podem ser escritas utilizando a regra que a soma do fluxo que entra em um estado é igual a soma do fluxo que sai do mesmo estado [16]. Assim, constitui-se um sistema de equações formado pelas equações de equilíbrio de cada estado e a equação de normalização (a soma das probabilidades de todos os estados é igual à 1), que pode ser facilmente resolvido numericamente usando, por exemplo, o MATLAB.

Neste trabalho, o processo para calcular as probabilidades em regime estacionário usando o MATLAB é implementado em 4 passos:

- No primeiro passo, o conjunto de estados possíveis S é gerado bem como a ordem com que cada estado vai ser equacionado nos passos subsequentes.
- No segundo passo, são geradas as taxas do estado de destino para cada estado, considerando todas as possíveis transições partindo daquele estado. Para isso são utilizadas as taxas de transição genéricas apresentadas nas tabelas 2.1 e 2.2 para os modelos de população infinita e finita

respectivamente, sendo colocadas na matriz de transição conforme as posições dos estados gerados no primeiro passo.

- No terceiro passo, os elementos da diagonal principal da matriz de transição são calculados conforme indicado na Expressão (2.10).
- Finalmente, no quarto passo, as probabilidades em regime estacionário são então calculadas a partir da matriz de transição gerada.

Como referência deste processo, no Anexo A deste trabalho pode ser encontrada a rotina escrita no MATLAB que foi utilizada para reproduzir os resultados das probabilidades em regime estacionário, apresentadas em [10] para o modelo de população infinita e para o caso de 3 canais, de modo a validar o processo e a rotina de MATLAB.

Uma vez encontradas as probabilidades em regime estacionário, o sistema pode então ser analisado conforme explicado na próxima subseção.

2.5 Métricas de performance e análise de desempenho

Nesta subseção são apresentadas as métricas que servirão para avaliar o desempenho do sistema. São também apresentados resultados numéricos para cada métrica que servirá para avaliar numericamente o desempenho do acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádios cognitivos com multicanais e sensoriamento imperfeito.

A análise apresentada em [11] considera as seguintes métricas de desempenho: a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar, a probabilidade de um usuário secundário terminar com sucesso a sua chamada, probabilidade de bloqueio da rede secundária, probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar e utilização do espectro.

Neste trabalho, são introduzidas 2 novas métricas de desempenho para a análise do sistema, a saber:

a) Capacidade da rede primária;

b) Capacidade da rede secundária;

Assim, as métricas de desempenho serão utilizadas tanto para analisar o desempenho do modelo apresentado em [11] para a consideração de população infinita, bem como para analisar o sistema apresentado aqui para a consideração de população finita.

Para o modelo de população infinita, optou-se por utilizar os mesmos valores usados em [10] para os seguintes parâmetros: $\lambda_1 = 7$, $\lambda_2 = 3{,}5$, $\mu_1 = \mu_2 = 4$, $P_F = 0{,}15$ e $P_D = 0{,}713$. Para ilustrar os resultados, optou-se em usar $M=5$, $M=10$, e $M=5$ para o número de canais.

Para o modelo de população finita, considera-se um sistema primário com 12 usuários primários (UP = 12) e consequentemente 12 canais (M = 12). O número de usuários secundários que tentam oportunisticamente acessar esses canais foi fixado em 15 (US = 15). Os parâmetros $\lambda_1 = 1$ e $\lambda_2 = 1$ são os valores das taxas de chegada para cada usuário primário e secundário, respectivamente, e as suas respectivas taxas de serviço por canal são $\mu_1 = 3$ e $\mu_2 = 3$. Tal como em [9], a probabilidade de falso alarme e a probabilidade de detecção foram fixadas em $P_F = 0{,}15$ e $P_D = 0{,}713$, respectivamente.

Os valores da probabilidade de falso alarme e a probabilidade de detecção em alguns gráficos foram mantidos constantes tal como em [9], enquanto que em outros variou-se ou a probabilidade de detecção ou a probabilidade de falso alarme.

2.5.3 Probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar

Probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar (P_{PT}), se refere a probabilidade de uma chamada primária que foi admitida no sistema ser forçada a terminar devido às colisões com usuários secundários causadas por erros de detecção [10]-[11].

Para o modelo de população infinita, a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar (P_{PT}) é [11]:

$$P_{PT} = \frac{R_{int1}}{\lambda_1 (1 - P_{b1})} \tag{2.12}$$

Onde $Rint_1$ é a taxa com que o usuário secundário interrompe o usuário primário e este é forçado a terminar, e P_{b1} é a probabilidade de uma chamada primária ser bloqueada.

Então, tem-se que:

$$R_{int1} = \left[\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=0}^{N-i} \pi(i,j) \left(T_{(i-1,j)}^{(i,j)} - i\mu_1 \right) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-i} \pi(i,j) \left(T_{(i,j-1)}^{(i,j)} - i\mu_2 \right) \right] \tag{2.13}$$

$$P_{b1} = \pi(M, 0) \tag{2.14}$$

Onde $\pi(i,j)$ é a probabilidade do estado (i,j) e $T_{(i-1,j)}^{(i,j)}$ é a taxa de transição de um estado (i,j) para um estado $(i-1,j)$.

Para o modelo de população finita, a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar (P_{PT}) será:

$$P_{PT} = \frac{R_{int1}}{\gamma_1} \tag{2.15}$$

Onde R_{int1} é a taxa com que um usuário secundário interrompe o usuário primário e este é forçado a terminar calculada pela Expressão (2.13), adequando-se os parâmetros para o caso de população finita, e γ_1 é a taxa média de chamadas primárias admitidas no sistema. Como o número de canais é igual ao número de usuários primários, então, todas as chamadas primárias são admitidas e ao contrário do modelo de população infinita, a taxa de chegada não é constante.

Então, tem-se que:

$$\gamma_1 = \sum_{x \in S} \left(UP - i \right) \lambda_1 \pi(x) \tag{2.16}$$

Onde *UP* é número de usuários primários no sistema e *i* é o número de usuários primários sendo servidos, fazendo com que *(UP-i)* seja o número de usuários que não estão sendo servidos, e que portanto, podem gerar chamadas novas.

A Figura 2.3 ilustra a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar para o modelo de população infinita em função da probabilidade de detecção. Pode-se observar que quando $P_D = 1$, a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar é zero, porque $P_D = 1$ quer dizer probabilidade de detecção perfeita, ou seja, não há interrupção na rede primaria causada pela rede secundária. A Figura 2.3 ilustra ainda que as interrupções aumentam à medida que a probabilidade de detecção diminui. A partir deste parâmetro pode-se especificar para o sistema, a probabilidade de detecção necessária para uma probabilidade de interrupção do usuário primário máxima fixada.

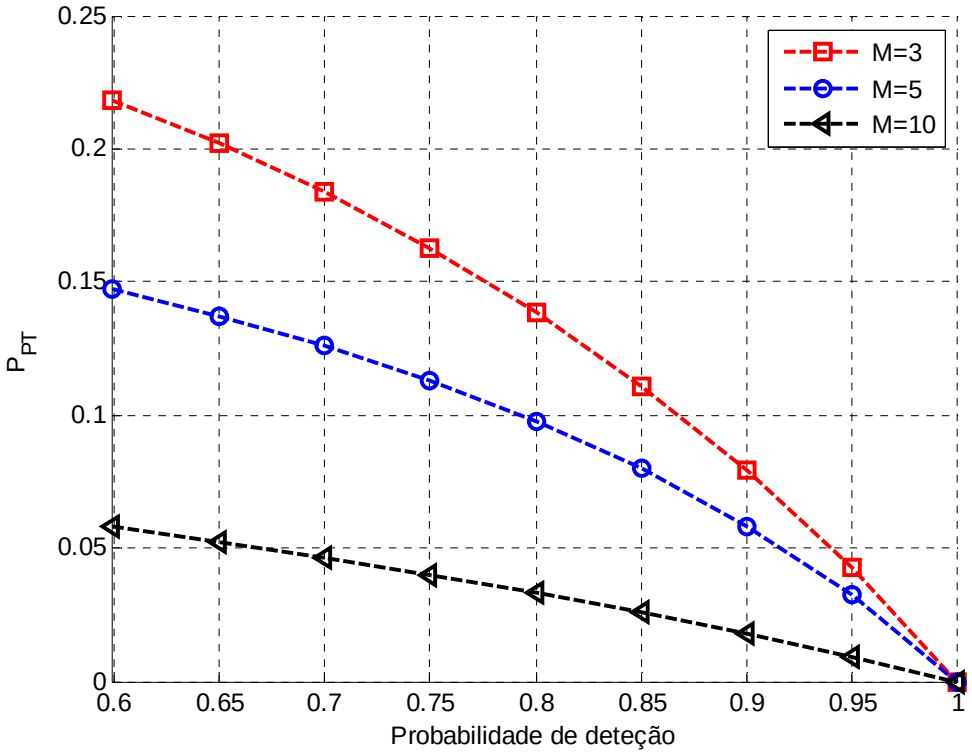

Figura 2.3 *Probabilidade de um usuário primário terminar a sua transmissão para o modelo de população infinita.*

A Figura 2.4 apresenta a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar para o modelo de população finita em função do número de usuários secundários

no sistema e para diferentes valores da probabilidade de detecção (P_D). Pode-se observar que quando $US = 0$, a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar é zero porque se não há usuários secundários, tem-se a convencional alocação de espectro fixa e como o número de canais é igual ao número de usuários primários, nenhuma chamada primária é bloqueada ou forçada a terminar. À medida em que se aumenta o número de usuários secundários, aumenta também o nível de interferência dos usuários secundários nos usuários primários e, com isso, aumenta-se também a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar. É possível ver também que no caso de a probabilidade de detecção ser 1, nunca haverá interrupção na rede primária, por mais que se aumentem o número de usuários secundários, porque $P_D=1$ significa detecção perfeita. A partir deste parâmetro pode-se estabelecer o número máximo de usuários secundários na rede, para uma dada probabilidade de detecção e um valor máximo especificado para a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar.

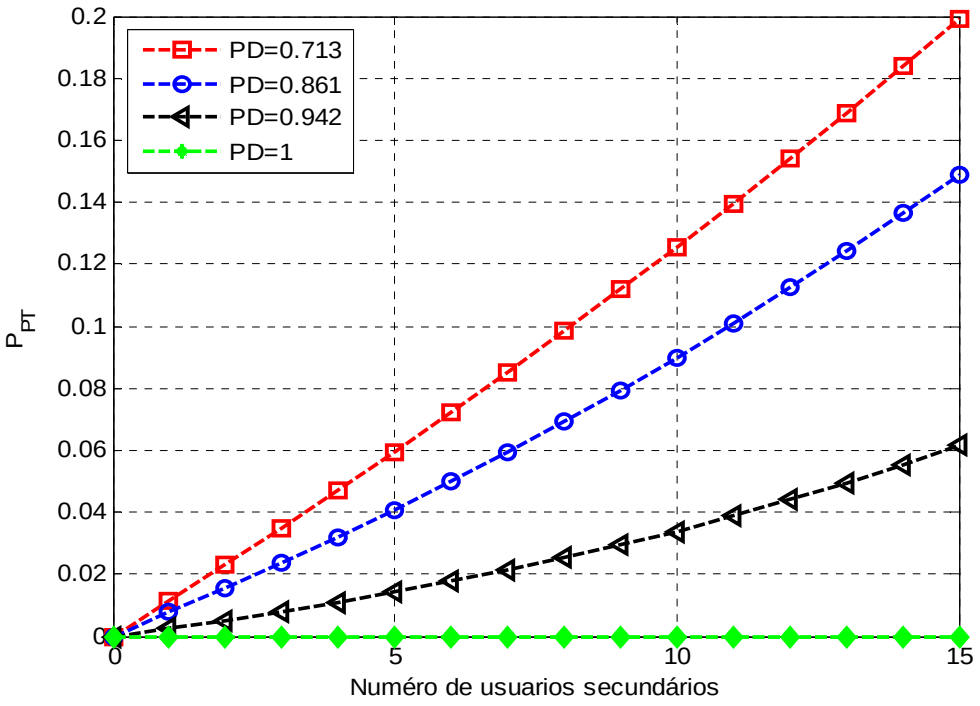

Figura 2.4 *Probabilidade de um usuário primário terminar a sua transmissão para o modelo de população finita.*

2.5.4 Capacidade da rede primária

A capacidade da rede primária é definida como o número médio de chamadas primárias que terminam com sucesso por unidade de tempo (sem serem interrompidas por usuários secundários). A capacidade da rede primária pode ser calculada de duas formas: pela forma convencional que é calculando a taxa média de chamadas concluídas com sucesso, ou a partir da taxa de chegada, excluindo o que não é bloqueado e o que não é forçado a terminar.

Assim, a capacidade da rede primária para o modelo de população infinita é dada por:

$$\rho_1 = \lambda_1(1-P_{b1})(1-P_{PT}) \tag{2.17}$$

ou

$$\rho_1 = \sum_{x \in S} i\mu_1\pi(x) \tag{2.18}$$

Para o modelo de população finita a capacidade da rede primária será dada por:

$$\rho_1 = \gamma_1(1-P_{PT}) \tag{2.19}$$

ou

$$\rho_1 = \sum_{x \in S} i\mu_1\pi(x) \tag{2.20}$$

Onde i é o número de chamadas primárias no estado x

Assumido o sensoriamento perfeito para o modelo de população finita, tal que $P_D = 1$ e $P_F = 0$, a rede secundária se torna completamente transparente à rede primária, de tal forma que o acesso na rede secundária não afeta em nada a rede primária. Neste caso, a rede primária pode ser modelada como um sistema de fila de população finita sem perda (sistema de Engset sem perda ou M/M/N/N/N). Assim, assumindo sensoriamento perfeito, a capacidade da rede primária pode ser calculada tanto usando as expressões 2.19 ou 2.20, com $P_D = 1$ e $P_F = 0$, ou usando a Expressão 2.21 que usa a já conhecida fórmula de Engset para calcular as probabilidades dos estados em regime estacionário.

$$\rho^*_1 = \sum_{i=0}^{N} i\mu_1\pi_i[N] \tag{2.21}$$

Onde $\pi_i[N]$ é a probabilidade do estado i em um sistema de Engset sem perda para N servidores [17]:

$$\pi_i[N] = \frac{\binom{N}{i}\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}\right)^i}{\sum_{k=0}^{N}\binom{N}{k}\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}\right)^k} \tag{2.22}$$

A Figura 2.5 ilustra a capacidade da rede primária em função da probabilidade de detecção para o modelo de população infinita. Pode-se observar que a capacidade da rede primária diminui à medida que os erros de detecção vão sendo mais frequentes, pois se mais frequentes são as interrupções, menos são as chamadas que têm a possibilidade de serem concluídas com sucesso.

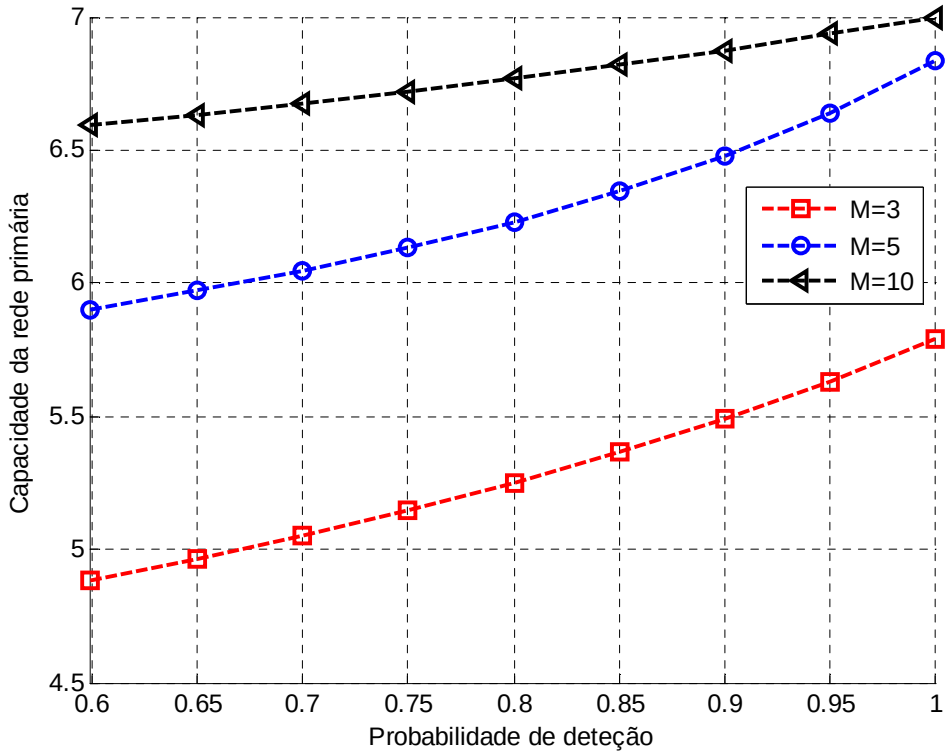

Figura 2.5 *Capacidade da rede primária para o modelo de população infinita.*

A Figura 2.6 ilustra a capacidade da rede primaria em função do número de usuários secundários no sistema para o modelo de população finita. Percebe-se que a capacidade da rede primária decresce quanto mais *US* tentam acessar oportunisticamente a rede primária, porque se menos *US* tentam acessar o sistema primário, mais chamadas primárias terão oportunidade de concluir com sucesso a sua transmissão. A Figura 2.6 ilustra ainda que se for assumido sensoriamento perfeito, o sistema primário se comporta como um sistema M/M/N/N/N, de tal forma que a capacidade obtida é exatamente igual à capacidade que o sistema primário iria obter se não existisse a rede secundária.

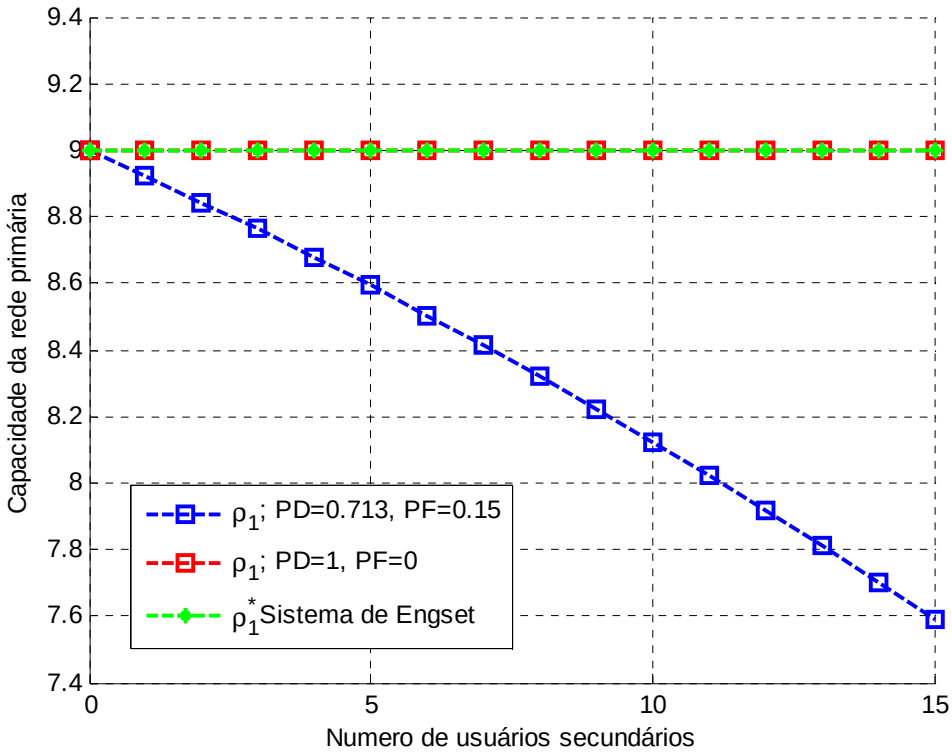

Figura 2.6 *Capacidade da rede primária para o modelo de população finita.*

2.5.5 Probabilidade de bloqueio de uma chamada secundária

Uma chamada secundária é bloqueada se a chegada de uma chamada secundária não levar o sistema a um estado *(i,j + 1)*.

Assim, para o modelo de população infinita, a probabilidade de bloqueio de uma chamada secundária é:

$$P_{b2} = \sum_{x \in S} \pi(x) \left(1 - \frac{T_{(i,j+1)}^{(i,j)}}{\lambda_2} \right) \tag{2.23}$$

Em um sistema de população infinita, a probabilidade de chegada é independe do estado em que a cadeia está, porque a taxa de chegada é constante e não depende do estado. Já em um sistema de população finita, a probabilidade de chegada de uma chamada, depende em que estado a cadeia está, porque a taxa de chegada no sistema é dependente do estado. Assim, seja $\pi^*(x)$ a probabilidade de que dada a chegada de uma chamada o sistema esteja no estado (x), e $\pi(x)$ a probabilidade de que o sistema esteja no estado (x). Porque a taxa de chegada é dependente do estado, ao contrário do modelo de população infinita $\pi^*(x) \neq \pi(x)$. Para o modelo de população finita $\pi^*(x)$ é calculada por [17]:

$$\pi^*(x) = \frac{(US - j)\lambda_2 \pi(x)}{\sum_{x \in S} (US - j)\lambda_2 \pi(x)} \tag{2.24}$$

A Expressão (2.24) diz que $\pi^*(x)$ é a taxa de chamadas que chegam ao estado (x), dividida pela taxa total de chamadas que chegam no sistema.

A probabilidade de bloqueio da rede secundária para o modelo de população finita é:

$$P_{b2} = \sum_{x \in S} \pi^*(x) \left(1 - \frac{T_{(i,j+1)}^{(i,j)}}{(US - j)\lambda_2} \right) \tag{2.25}$$

A Figura 2.7 ilustra a probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada em função da taxa de chegada de chamadas primárias para o modelo de população infinita. Percebe-se que se a taxa de chegada de chamadas primárias aumentar, então a probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada também aumenta. Isto ocorre

porque haverá menos oportunidades de transmissão para a rede secundária, resultando então em mais chamadas bloqueadas.

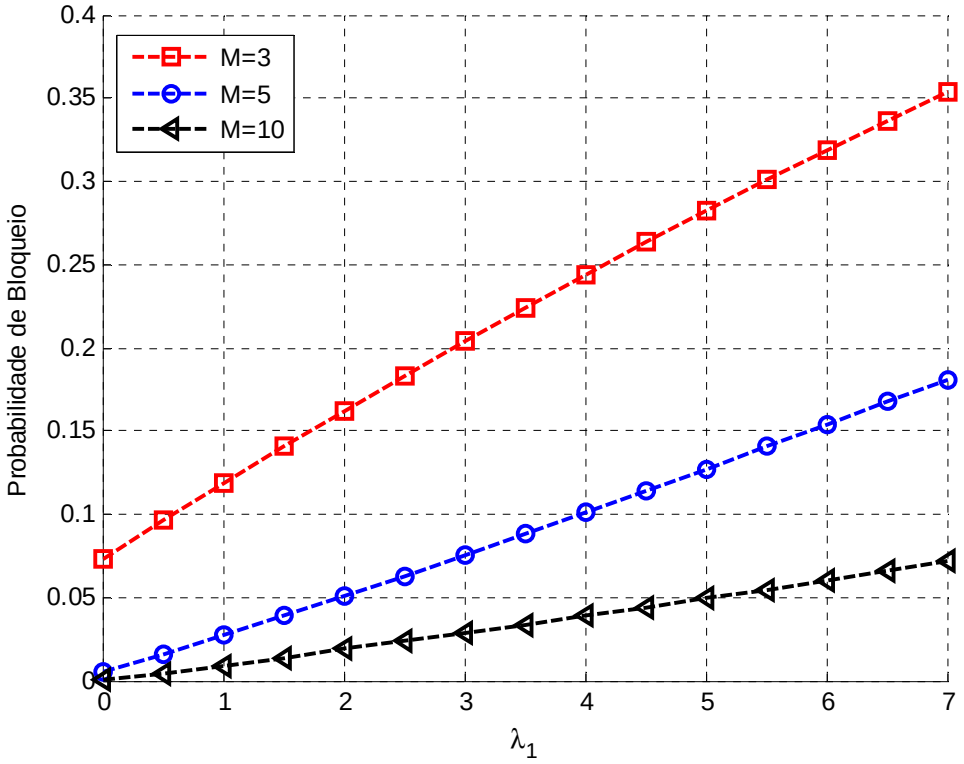

Figura 2.7 *Probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada para o modelo de população infinita.*

A Figura 2.8 ilustra a probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada em função da taxa de chegada de chamadas primárias para o modelo de população finita. Percebe-se figura que neste modelo, mais chamadas secundárias são bloqueadas devido ao aumento de atividade na rede primária. Isto ocorre porque, tal como no modelo de população infinita, à medida que chamadas primárias vão se tornando mais frequentes, haverá menos oportunidades de transmissão para a rede secundária.

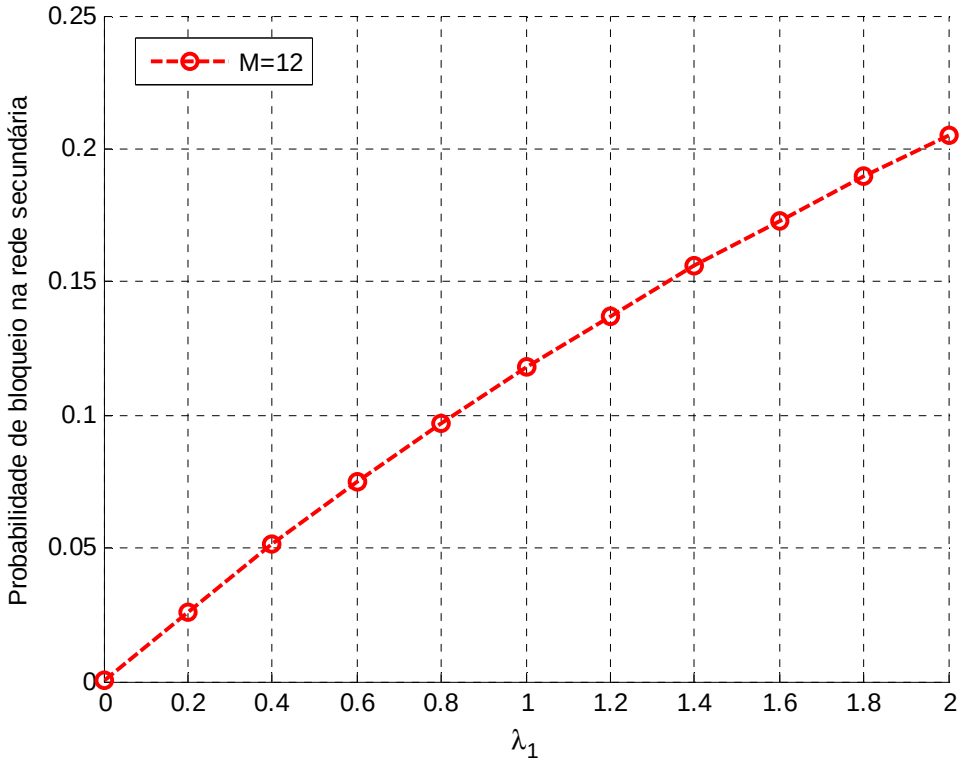

Figura 2.8 *Probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada para o modelo de população finita.*

2.5.6 **Probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar**

A probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar (P_{ST}) se refere a probabilidade de uma chamada secundária que foi admitida no sistema ser forçada a terminar antes de ser completada regularmente.

Assim, a probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar para o modelo de população infinita é expressa por:

$$P_{ST} = \frac{R_{int2}}{\lambda_2(1-P_{b2})} \tag{2.26}$$

Onde $Rint_2$ é a taxa com que o usuário primário interrompe o usuário secundário de forma que o usuário secundário é forçado a terminar antes que sua chamada complete regularmente o seu serviço, e é dada por:

$$R_{int2} = \left[\sum_{x \in S} \pi(x)(T_{(i,j-1)}^{(i,j)} - j\mu_2) + \sum_{x \in S} \pi(x) T_{(\mathrm{i+1,j-1})}^{(i,j)} \right] \tag{2.27}$$

A grandeza $\lambda_2(1-P_{b2})$ se refere a taxa de chegada de chamadas secundárias que não foram bloqueadas, ou seja, taxa de chamadas admitidas no sistema.

A probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar para o modelo de população finita é expressa por:

$$P_{ST} = \frac{R_{int_2}}{\gamma_2} \tag{2.28}$$

Onde *Rint2* é a taxa com que o usuário primário interrompe o usuário secundário fazendo com que este seja forçado a terminar a sua chamada, e γ2 é a taxa média de chamadas secundárias admitidas no sistema. Ou seja, chamadas secundárias geradas e não bloqueadas.

Assim, tem-se que:

$$\gamma_2 = \sum_{x \in S} (US - j)\, \lambda_2 \pi(x)(1 - \mathrm{P}_{B2}) \tag{2.29}$$

Onde *US* é número de usuários secundários no sistema e *j* é o número de usuários secundários sendo servidos, fazendo com que *(US-j)* seja o número de usuários secundários que não estão sendo servidos, e que portanto, podem gerar chamadas novas.

A Figura 2.9 ilustra a probabilidade de um usuário secundário terminar a sua transmissão em função da taxa de chegadas de chamadas primárias. Percebe-se que no modelo de população infinita, com o aumento da taxa de chegada de chamadas primárias, usuários secundários serão interrompidos com mais frequência. A Figura 2.9 ilustra também que quanto maior for o número de canais, na eventualidade de um usuário secundário ser interrompido pela chegada de um usuário primário, mais oportunidades este usuário tem de achar outro canal para continuar a sua chamada e, portanto, menor a probabilidade de ele ser forçado a terminar a chamada.

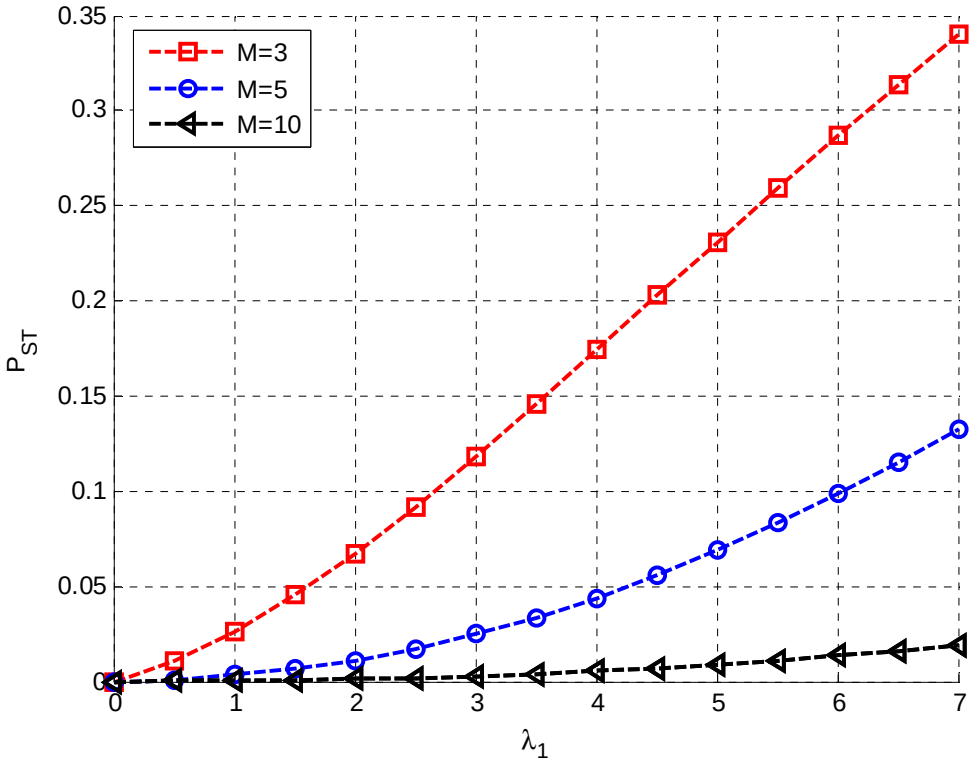

Figura 2.9 *Probabilidade de um usuário secundário terminar a sua transmissão para o modelo de população infinita.*

A Figura 2.10 ilustra a probabilidade de um usuário secundário terminar a sua transmissão em função da taxa de chegadas de chamadas primárias para o modelo de população finita. Percebe-se que à medida que a taxa de chegada de chamadas primárias aumenta, é menos provável que uma chamada secundária venha a concluir com sucesso a sua transmissão.

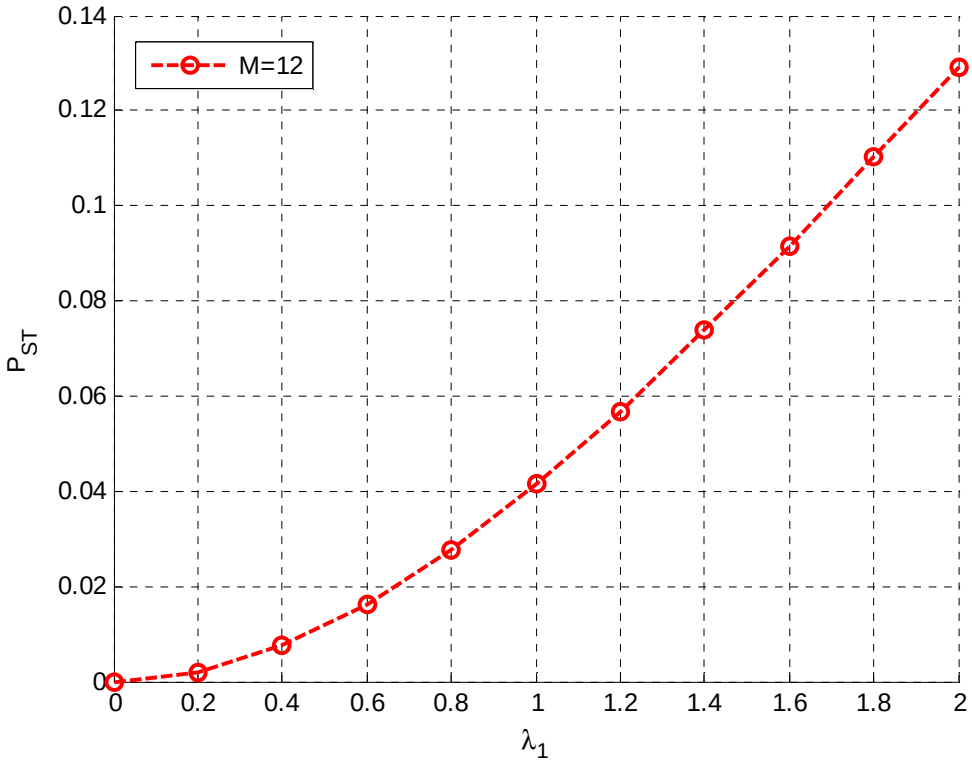

Figura 2.10 *Probabilidade de um usuário secundário terminar a sua transmissão para o modelo de população finita.*

2.5.7 Capacidade da rede secundária

A capacidade da rede secundária define o número médio de chamadas secundárias que terminam com sucesso por unidade de tempo. Assim, a capacidade da rede secundária para o modelo de população infinita é dada por:

$$\rho_2 = \lambda_2 (1 - P_{b2})(1 - P_{ST}) \tag{2.30}$$

Ou

$$\rho_2 = \sum_{x \in S} j \mu_2 \pi(x) \tag{2.31}$$

Onde j é o número de usuários secundários sendo servidos.

Para o modelo de população finita a capacidade da rede secundária é dada por:

$$\rho_2 = \sum_{x \in S} (SU - j)\lambda_2 \pi(x)(1 - \mathrm{P}_{B2})(1 - P_{ST}) \tag{2.32}$$

ou

$$\rho_2 = \sum_{x \in S} j\mu_2 \pi(x) \tag{2.33}$$

Onde j é o número de usuários secundários sendo servidos

A Figura 2.11 ilustra a capacidade da rede secundária em função da taxa de chegadas de chamadas primárias. Percebe-se que para o modelo de população infinita pouca capacidade na rede secundária é conseguida se chegadas de chamadas primárias forem frequentes. A Figura 2.11 ilustra ainda que mais capacidade é obtida quando existem mais canais disponíveis.

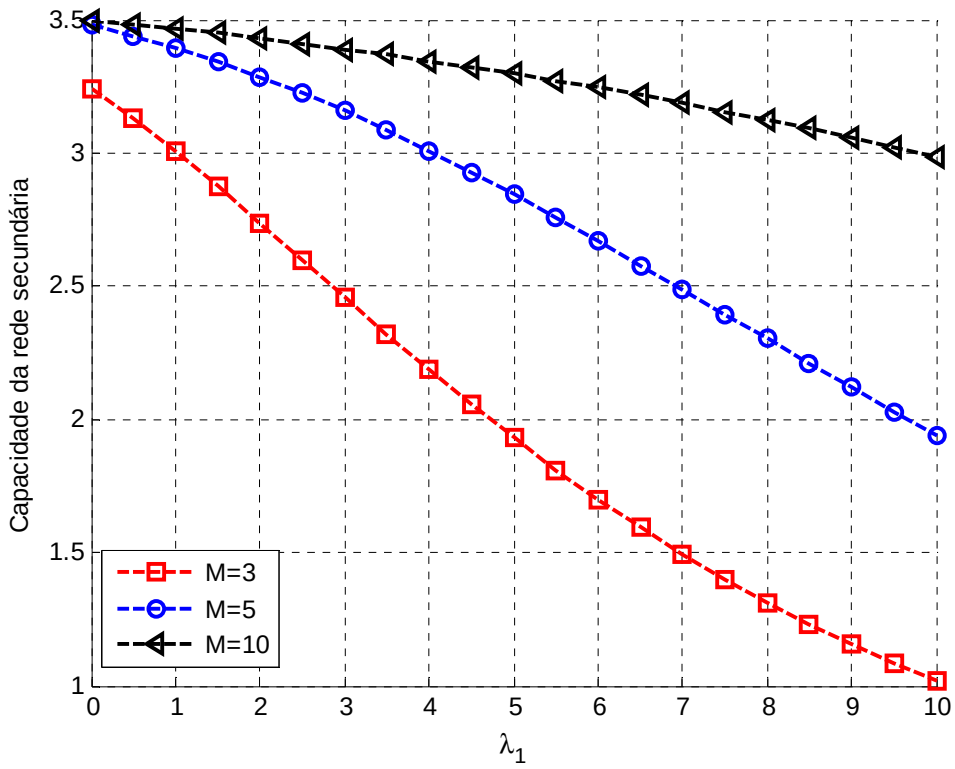

Figura 2.11 *Capacidade da rede secundária para o modelo de população infinita.*

A Figura 2.12 ilustra a capacidade da rede secundária em função da taxa de chegadas de chamadas primárias para o modelo de população finita. Percebe-se que pouca capacidade da rede secundária será obtida se chamadas primárias são frequentes.

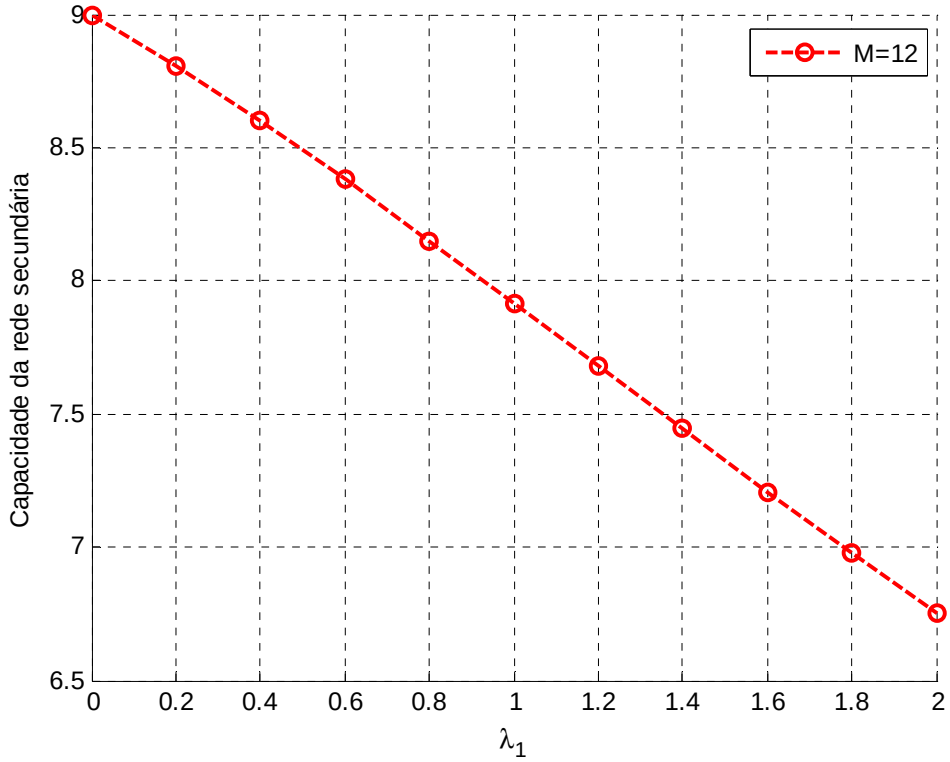

Figura 2.12 *Capacidade da rede secundária para o modelo de população finita.*

2.5.8 Utilização do espectro

A utilização total do espectro é definida como a relação entre o número médio de canais utilizados e o número total de canais existentes, o que determina o percentual do espectro que é utilizado. Assim, a utilização total do espectro tanto para o modelo de população infinita bem como para o modelo de população finita é:

$$U = \sum_{x \in S} \pi(x) \frac{(i+j)}{M} \tag{2.34}$$

A Figura 2.13 ilustra o comportamento da utilização do espectro em função da probabilidade de detecção para o modelo de população infinita. Percebe-se pela figura que uma melhor utilização total do espectro pode ser obtida se houver menos erros de detecção.

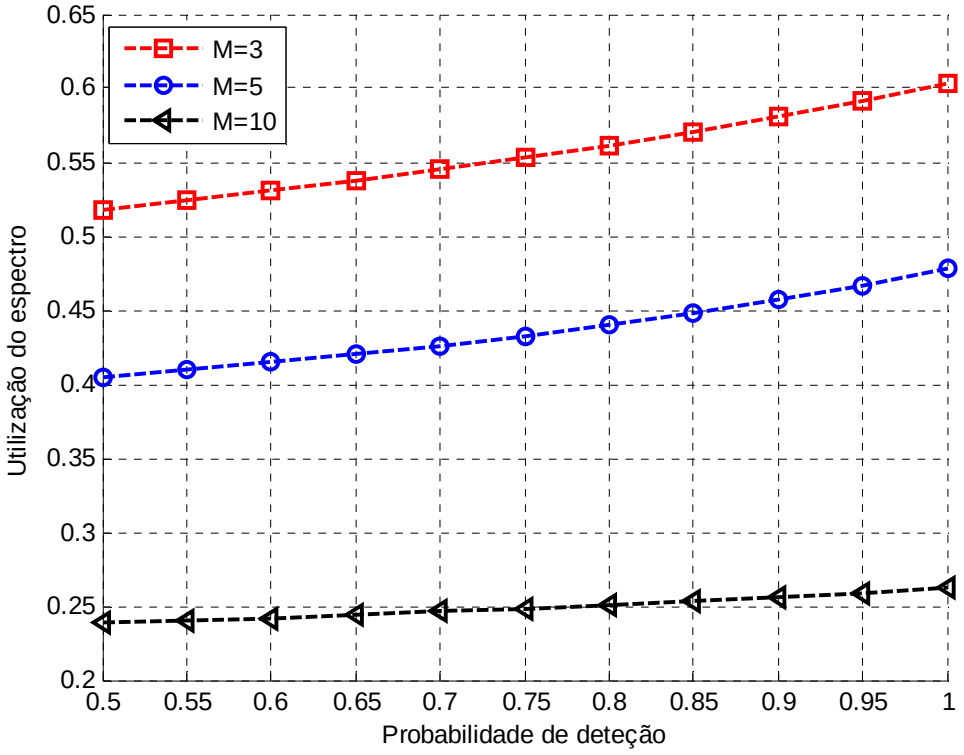

Figura 2.13 *Utilização do espectro para o modelo de população infinita.*

A Figura 2.14 ilustra o comportamento da utilização do espectro em função da probabilidade de detecção para o modelo de população finita. Percebe-se pela figura 2.14 que uma melhor utilização total do espectro pode ser obtida no modelo de população finita se houver menos erros de detecção.

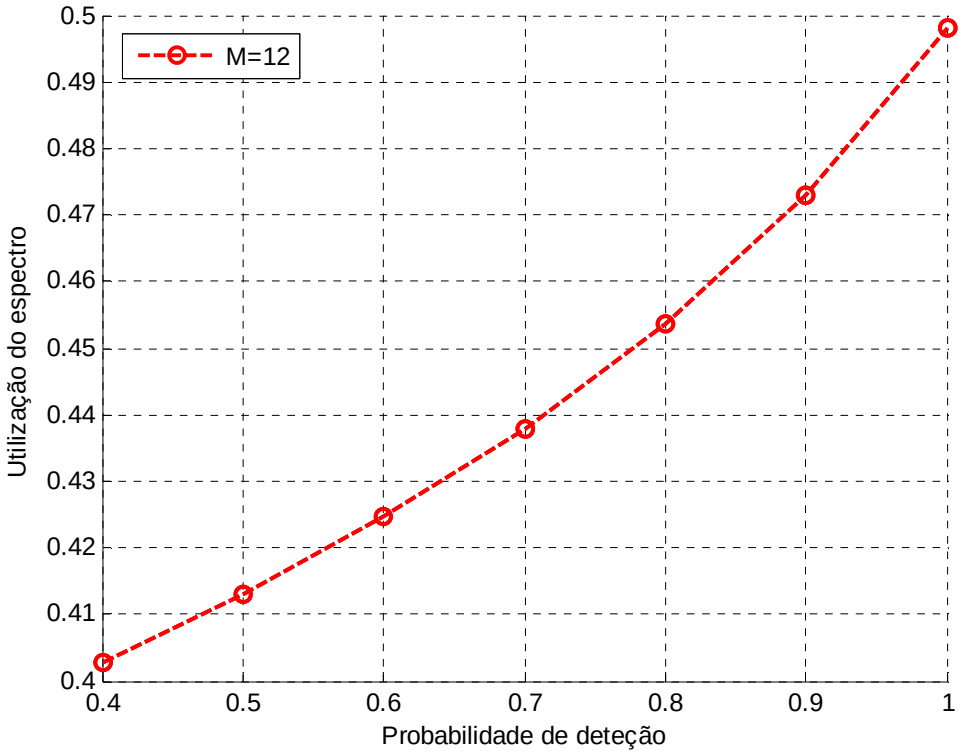

Figura 2.14 *Utilização do espectro parar o modelo de população finita*

2.6 Conclusão

Neste Capítulo foi apresentado o modelamento para o acesso oportunístico em uma rede de rádio cognitivo com multicanais e sensoriamento imperfeito, a cadeia de Markov de tempo contínuo que modela o sistema foi apresentada com as suas taxas de transição explícitas. Métricas de desempenho foram deduzidas, permitindo fazer a análise quantitativa do acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo com multicanais e sensoriamento imperfeito. As análises foram feitas tanto para o modelo de população finita, como para o modelo de população infinita.

Capítulo 3: Análise de desempenho do acesso oportunístico ao espectro com sensoriamento imperfeito e cooperativo por fusão de decisão

3.1 Introdução

O sensoriamento espectral é uma das principais funções do rádio cognitivo para prevenir interferência danosa ao usuário licenciado (usuário primário). Contudo, em um cenário mais prático, muitos fatores como desvanecimento, sombreamento e sensibilidade do receptor podem comprometer o sensoriamento. O sensoriamento espectral cooperativo demonstra ser um método eficiente para mitigar o efeito desses problemas.

A ideia principal do sensoriamento espectral cooperativo é explorar a diversidade espacial dos usuários secundários. Ao cooperar as informações de sensoriamento entre os usuários secundários, a decisão sobre a presença ou ausência do usuário primário pode ser mais precisa levando-se em conta uma perspectiva global em vez de uma decisão individual.

No processo de sensoriamento cooperativo, inicialmente, cada usuário secundário realiza o sensoriamento individualmente, logo após, as informações do sensoriamento são partilhadas entre os usuários secundários e as informações partilhadas são fundidas e uma decisão final é tomada baseada nas informações de todos os usuários secundários participantes da cooperação.

A partilha das informações de sensoriamento pode ser feita de forma centralizada ou distribuída, nomeadamente sensoriamento cooperativo centralizado e sensoriamento cooperativo descentralizado, respectivamente.

No sensoriamento cooperativo centralizado, tal como ilustra a Figura 3.1, todos os usuários secundários enviam as suas informações de sensoriamento para uma entidade central chamada centro de fusão (CF), onde as informações de sensoriamento são fundidas e, por fim, uma decisão final é tomada.

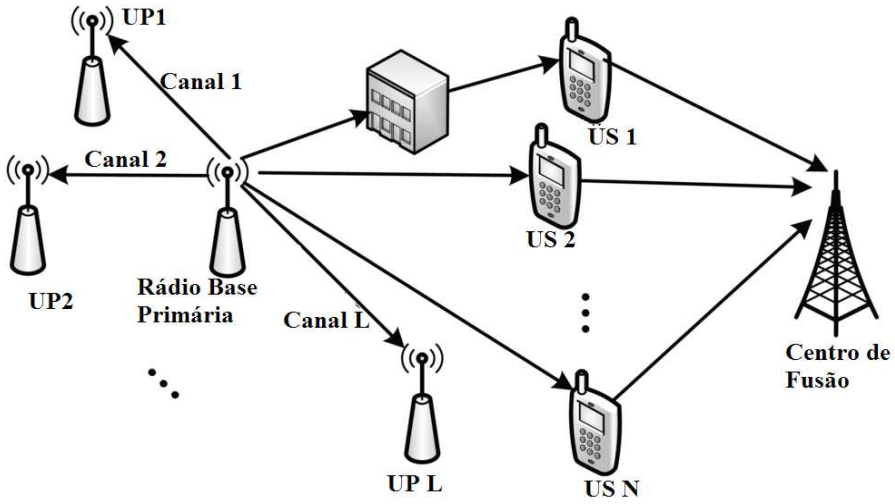

Figura 3.1 *Sensoriamento cooperativo centralizado.*

No sensoriamento cooperativo descentralizado não existe uma entidade central responsável pela tomada de decisão, todos os usuários secundários partilham as informações de sensoriamento diretamente entre si e a fusão é feita localmente em cada usuário secundário, tendo em vista as informações de todos outros usuários secundários participantes da cooperação. A Figura 3.2 ilustra o funcionamento do sensoriamento cooperativo descentralizado.

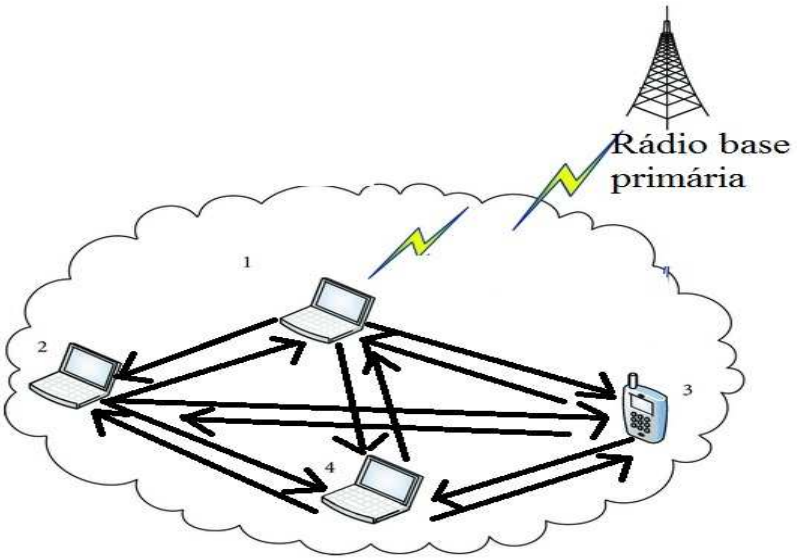

Figura 3.2 *Sensoriamento cooperativo descentralizado.*

No sensoriamento cooperativo (quer seja centralizado ou distribuído) existem duas formas básicas de fundir as informações de sensoriamento, nomeadamente fusão de dados e fusão de decisão.

Sensoriamento cooperativo por fusão de dados: no sensoriamento cooperativo por fusão de dados os usuários secundários executam o sensoriamento localmente e partilham informações de sensoriamento (por exemplo: potência de recepção, distância do transmissor primário, etc) sem tomar uma decisão, essa é tomada apenas no centro de fusão em que esses dados são fundidos.

Sensoriamento cooperativo por fusão de decisão: no sensoriamento por fusão de decisão, os usuários secundários executam o sensoriamento localmente e tomam uma decisão sobre presença ou ausência do usuário primário. Depois disso enviam essas decisões para o centro de fusão que, fundindo-as, toma então uma decisão final sobre a ocupação do espectro.

Neste trabalho é adotada para estudo a regra fusão de decisão para o sensoriamento cooperativo em um sistema de rádio cognitivo.

3.2 Sensoriamento cooperativo com fusão de decisão

Regras de fusão de decisão no centro de fusão de uma rede de rádio cognitivo podem ser generalizadas para a regra K-out-of-N [18]. Sob esta regra, o centro de fusão decide pela presença do usuário primário se e somente se pelo menos K dos N usuários secundários decidirem pela presença do usuário primário, e o centro de fusão decide pela ausência do usuário primário em caso contrário [18]. Assim, a probabilidade de o centro de fusão ter um falso alarme ou uma detecção correta pode ser obtida da seguinte forma [16]:

$$Q_F = \sum_{l=K}^{N} \binom{N}{l} P_F{}^{l} (1 - P_F)^{N-l} \tag{3.1}$$

$$Q_D = \sum_{l=K}^{N} \binom{N}{l} P_D{}^{l} (1 - P_D)^{N-l} \tag{3.2}$$

Onde P_D e P_F são as probabilidades locais de detecção e de falso alarme respectivamente; N é o número total de usuários secundários que participam da cooperação; e o valor de K representa o número mínimo de usuários secundários que precisam decidir por ocupado para que o centro de fusão decida por ocupado.

Pode-se observar nas expressões 3.1 e 3.2 que ao fazer o valor de K como 1, N, e N/2, a regra K-out-of-N se torna as regras OR, AND e MAJORITÁRIA, respectivamente [18].

3.2.1 Regra OR

Sob a estratégia da regra OR, o centro de fusão decide por ocupado se pelo menos um usuário decidir por ocupado, e decide por livre em caso contrário. Ou seja, o centro de fusão só decide por livre se todos os usuários decidirem por livre (unanimidade para o livre), bastando um usuário secundário decidir por ocupado para o centro de fusão decidir por ocupado. Assim, a probabilidade de detecção e a probabilidade de falso alarme cooperadas sob a regra OR são calculadas usando a regra K-out-N, fazendo o valor de K igual a 1:

$$Q_F = \sum_{l=1}^{N} \binom{N}{l} P_F^{\,l} (1 - P_F)^{N-l} \tag{3.3}$$

$$Q_D = \sum_{l=1}^{N} \binom{N}{l} P_D^{\,l} (1 - P_D)^{N-l} \tag{3.4}$$

Pode-se observar que as probabilidades cooperadas dependem fortemente do número de usuários secundários na cooperação. Assim, deve-se analisar numericamente como variam as probabilidades cooperadas (Q_D e Q_F) em função do número de usuários secundários participantes na cooperação, estando o centro de fusão sob a estratégia da regra OR. Considere as probabilidades locais P_D = 0,713 e P_F = 0,15 (valores utilizados no Capítulo anterior e também em [10]).

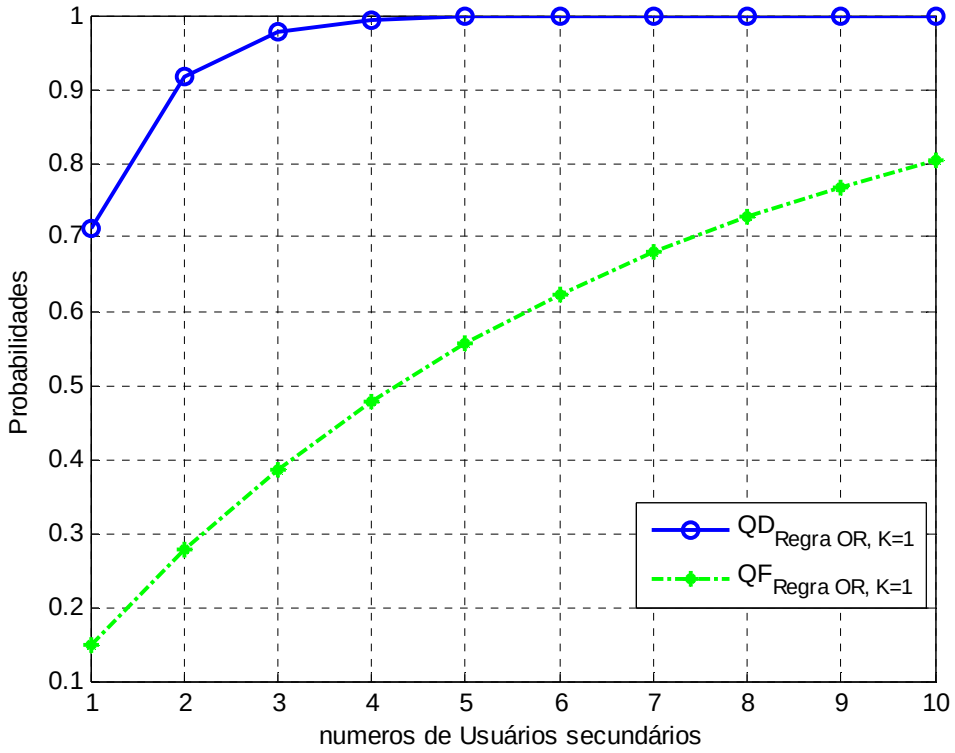

Figura 3.3 *Probabilidades cooperadas obtidas sob a regra OR.*

Pode-se observar da Figura 3.3 que sob a regra OR, à medida que o número de usuários que participam na cooperação aumenta, a probabilidade de detecção rapidamente aumenta, o que é desejável, pois probabilidade de detecção igual a 1 significa que o centro de fusão nunca irá interromper um usuário primário, o que é desejável. Por outro lado, a probabilidade de falso alarme também aumenta e isto significa oportunidade de transmissão desperdiçada, mostrando que a rede secundária raramente irá achar um canal livre para transmitir mesmo que este esteja efetivamente livre. Ou seja, se o interesse do sistema é priorizar a rede primária aumentando a probabilidade de detecção e assim reduzir a possibilidade de um usuário primário ser interrompido pelo secundário, a regra OR favorece a essa estratégia, mas por outro lado degrada a probabilidade de falso alarme e com isso diminui a possibilidade da rede secundária detectar um canal livre para transmitir mesmo que tal canal esteja livre.

3.2.2 Regra AND

Sob a regra AND, o centro de fusão decide por ocupado somente se todos os usuários secundários decidirem por ocupado e decide por livre em caso contrário. Assim, a probabilidade de detecção e a probabilidade de falso alarme sob a regra AND são calculadas usando a regra K-out-N, fazendo o valor de K igual a N:

$$Q_F = \sum_{l=N}^{N} \binom{N}{l} P_F{}^{l} (1 - P_F)^{N-l} = P_F{}^{N} \tag{3.5}$$

$$Q_D = \sum_{l=N}^{N} \binom{N}{l} P_D{}^{l} (1 - P_D)^{N-l} = P_D{}^{N} \tag{3.6}$$

Deve-se analisar numericamente então como variam as probabilidades cooperadas (Q_F e Q_D) em função do número de usuários secundários participantes na cooperação, estando o centro de fusão sob a regra AND. Considere as probabilidades locais P_D=0,713 e P_F=0,15 (valores utilizados no Capítulo anterior e também em [10]).

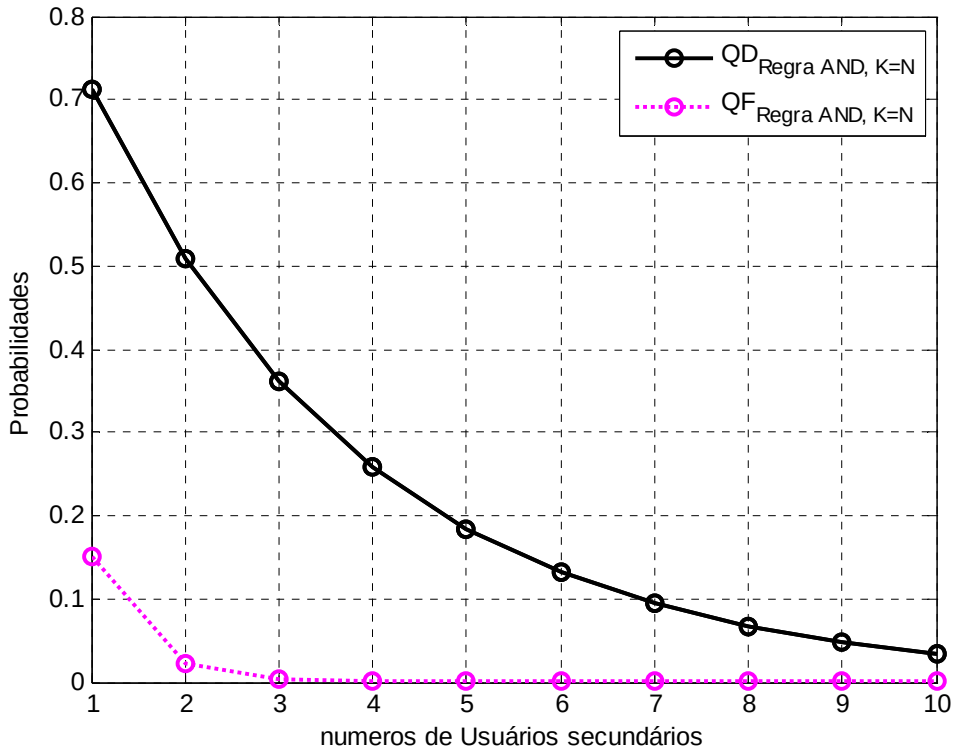

Figura 3.4 *Probabilidades cooperadas obtidas sob a regra AND.*

Pode-se observar da Figura 3.4 que sob a regra AND, à medida que o número de usuários que participam na cooperação aumenta, a probabilidade de falso alarme rapidamente diminui, o que é desejável, pois falsos alarmes significam oportunidades de transmissão desperdiçadas; mas, por outro lado, a probabilidade de detecção também diminui, o que não é desejável, pois probabilidade de detecção baixa significa interrupções frequentes ao usuário primário. Ou seja, se o interesse na rede é priorizar a rede secundária reduzindo os falsos alarmes, a regra AND favorece a essa estratégia, mas em contrapartida degrada a probabilidade de detecção e com isso aumenta as interrupções aos usuários primários.

3.2.3 Regra MAJORITÁRIA

Sob a regra MAJORITÁRIA, o centro de fusão decide por ocupado se pelo menos metade dos usuários secundários decidirem por ocupado e decide por livre em caso contrário. Ou seja, o centro de fusão decide por ocupado se a maioria decidir por ocupado e em caso de empate, e decide por livre em caso contrário. Assim, a probabilidade de detecção e a probabilidade de falso alarme sob a regra MAJORITÁRIA são calculadas usando a regra K-out-N, fazendo o valor de K igual a N/2:

$$Q_F = \sum_{l=\left\lceil \frac{N}{2} \right\rceil}^{N} \binom{N}{l} P_F{}^{l} (1 - P_F)^{N-l} \tag{3.7}$$

$$Q_D = \sum_{l=\left\lceil \frac{N}{2} \right\rceil}^{N} \binom{N}{l} P_D{}^{l} (1 - P_D)^{N-l} \tag{3.8}$$

Deve-se analisar numericamente então como variam as probabilidades cooperadas (Q_F e Q_D) em função do número de usuários secundários participantes na cooperação, estando o centro de fusão sob a regra MAJORITÁRIA, considerando as probabilidades locais $P_D = 0{,}713$ e $P_F = 0{,}15$ (valores utilizados no Capítulo anterior e também em [10]).

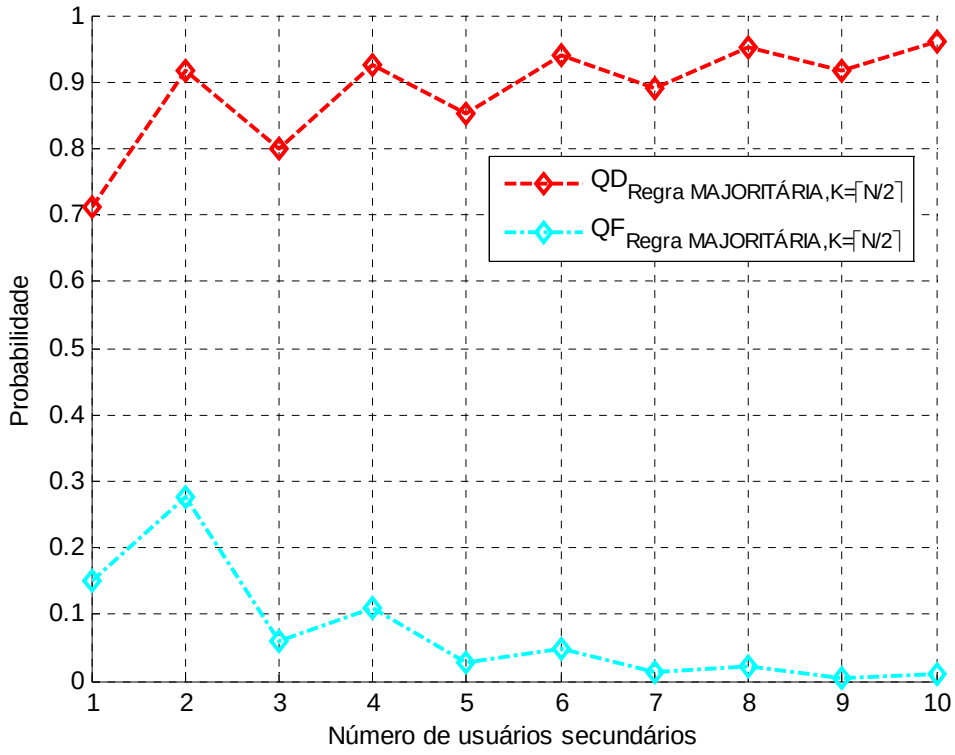

Figura 3.5 *Probabilidades cooperadas obtidas sob a regra MAJORITÁRIA.*

A Figura 3.5 ilustra as probabilidades cooperadas sob a estratégia da regra MAJORITÁRIA em função do número de usuários secundários participantes na cooperação. Pode-se observar que a probabilidade de detecção melhora com o aumento do número de usuários, o que é desejável, e a probabilidade de falso alarme também melhora o que também é desejável. Logo, não existe uma contrapartida negativa na melhora de uma probabilidade em relação a outra o que acontecia nas outras estratégias. Pode-se ver também que a curva é oscilante porque a regra MAJORITÁRIA diz que em caso de empate o centro de fusão decide por ocupado, fazendo com que exista no caso do número de usuários secundários ser par, uma vantagem para a probabilidade de detecção, pois em caso de empate o centro de fusão vai decidir por ocupado protegendo a rede primária.

Portanto, a regra MAJORITÁRIA, é das estratégias apresentadas, a que apresenta uma melhor relação entre a probabilidade de detecção e a probabilidade de falso alarme, sendo que ambas probabilidades melhoram à medida que o número de usuários secundários que participam na cooperação aumenta.

Pode-se então dizer que as regras AND, OR e MAJORITÁRIA são casos particulares da regra K-out-of-N, e que o valor de K (a estratégia utilizada que define o valor mínimo necessário de usuários secundários que precisam decidir por ocupado para que o centro de fusão decida por ocupado) pode tomar qualquer valor entre 1 e N, sendo que quanto mais próximo K estiver do valor 1 a probabilidade de detecção cooperada melhora e em contrapartida a probabilidade de falso alarme piora, e quanto mais próximo o K estiver do valor de N melhora a probabilidade de falso alarme e em contrapartida piora a probabilidade de detecção. Na estratégia da regra MAJORITÁRIA ambas probabilidades melhoram com o aumento do número de usuários secundários na cooperação.

Assim, se a estratégia for diminuir as interrupções dos usuários secundários aos primários deve-se fazer tender o K para 1, mas com o prejuízo de que mais oportunidades de transmissão serão desperdiçadas na rede secundária. Se a estratégia for diminuir a probabilidade de bloqueio na rede secundária por força de poucas oportunidades de transmissão causadas por erros de sensoriamento, então deve-se fazer o valor de K tender para N com o prejuízo de interromper mais vezes os usuários primários, e se a estratégia for manter um melhor equilíbrio entre os erros de sensoriamento considerando tanto a rede primária bem com a rede secundária, então a melhor opção é a regra MAJORITÁRIA ($K = N/2$).

3.3 Comparação entre o desempenho do acesso oportunístico ao espectro em uma rede de rádio cognitivo com sensoriamento cooperativo versus uma rede de rádio cognitivo com sensoriamento não cooperativo

Como apresentado na seção anterior, os usuários secundários em uma rede de rádio cognitivo podem melhorar significativamente o seu desempenho no sensoriamento espectral para identificar oportunidades de transmissão se cooperarem entre si. Assim, nesta seção é utilizada a mesma abordagem do Capítulo 2 para analisar o desempenho do acesso oportunístico ao espectro em um sistema de rádio cognitivo de multicanais com sensoriamento imperfeito, mas desta vez considerando sensoriamento cooperativo por fusão de decisão, os resultados são comparados com o desempenho do acesso oportunístico em um sistema de rádio cognitivo com multicanais e sensoriamento imperfeito não-cooperativo apresentado no Capítulo 2.

Como o sensoriamento cooperativo depende do número de usuários secundários que participam na cooperação, então é utilizado o modelo de população finita apresentado no Capítulo 2, porque nesse modelo, ao contrário do modelo de população infinita, o número de usuários secundários é conhecido. Para o caso do sensoriamento cooperativo é utilizada a estratégia da regra majoritária na rede secundária, porque, conforme mostrado na seção anterior, esta regra resulta em menos erros de sensoriamento considerando tanto a rede primária como a rede secundária.

No modelo apresentado no Capítulo 2 foi usada a abordagem em que os usuários secundários baseavam-se apenas nas suas probabilidades locais (P_D e P_F). Agora, considera-se que os resultados de sensoriamento são cooperados. Assim, no modelo para sensoriamento cooperativo, as taxas de transição não são mais em função das probabilidades locais (P_D e P_F), mas sim das probabilidades cooperadas (Q_D e Q_F).

Para transformar o modelo de população finita com sensoriamento imperfeito não-cooperativo apresentado no Capítulo 2 em um modelo de população finita com sensoriamento imperfeito cooperativo, basta apenas substituir nas taxas de transição P_D, P_F e P_M por Q_D, Q_F e Q_M, respectivamente. Onde $Q_M = 1-Q_D$ e os valores de Q_F e Q_D são calculados conforme apresentado nas Expressões 3.1 e 3.2 respectivamente, com o valor de K fixado em = N/2.

A Tabela 3.1 ilustra as taxas de transição genéricas para o caso cooperativo, que é exatamente a mesma para o caso não-cooperativo apresentada no Capítulo 2 substituindo apenas P_D, P_F e P_M por Q_D, Q_F e Q_M , respectivamente.

Tabela 3-1 transição de estado para população finita e sensoriamento cooperativo partindo de um estado genérico (i,j)

Estado destino	Condição	Taxa de transição
$(i+1, j)$	$i < M$	$\frac{(UP-i)\lambda_1\alpha}{M-i} + \frac{(UP-i)\lambda_1 j}{M-i}\left[\sum_{t=1}^{\alpha}\binom{\alpha}{t}(1-Q_F)^t Q_F^{\alpha-t}\left(\sum_{r=0}^{i}\binom{i}{r}Q_D^{\,r}Q_M^{\,i-r}\frac{t}{t+(i-r)}\right)\right]$
$(i-1, j)$	$i > 0$	$i\mu_1 + (US-j)\lambda_2\left[\sum_{t=1}^{i}\binom{i}{t}Q_M^{\,t}Q_D^{\,(i-t)}\left(\sum_{k=0}^{\alpha}\binom{\alpha}{k}Q_F^{\,k}(1-Q_F)^{\alpha-k}\frac{t}{t+(\alpha-k)}\right)\right]$
$(i, j+1)$	$(i+j) < M$	$(US-j)\lambda_2\left[\sum_{t=1}^{\alpha}\binom{\alpha}{t}(1-Q_F)^t Q_F^{\,[\alpha-t]}\left(\sum_{r=0}^{i}\binom{i}{r}Q_D^{\,r}Q_M^{\,i-r}\frac{t}{t+(i-r)}\right)\right]$
$(i, j-1)$	$j > 0, i = 0$	$j\mu_2$
$(i, j-1)$	$j > 0, i > 0$	$j\mu_2 + \frac{(UP-j)\lambda_1 j}{M-i}\left[\sum_{t=1}^{i}\binom{i}{t}Q_M^{\,t}Q_D^{\,i-t}\left(\sum_{r=0}^{\alpha}\binom{\alpha}{r}Q_F^{\,r}(1-Q_F)^{\alpha-r}\frac{t}{t+\alpha-r}\right)\right]$
$(i+1, j-1)$	$i < M, j > 0$	$\frac{(UP-i)\lambda_1 j}{M-i}Q_F^{\,\alpha}Q_D^{\,i}$

$\alpha = \left[M - (i+j)\right]$

Uma vez definidas as taxas de transição, as probabilidades em regime estacionário podem ser calculadas como apresentado no Capítulo 2 e o desempenho do sistema pode então ser analisado considerando agora o sensoriamento cooperativo.

De forma a comparar numericamente o desempenho do acesso oportunístico ao espectro quando não há cooperação no sensoriamento, com o desempenho do acesso oportunístico ao espectro quando existe cooperação no sensoriamento, considera-se as mesmas métricas de desempenho e valores utilizados no Capítulo 2, sendo que para o caso de sensoriamento cooperativo os valores de P_D, P_F e P_M são substituídos por Q_D, Q_F e Q_M respectivamente.

A comparação das duas abordagens para cada métrica de desempenho é apresentada nas subseções a seguir.

3.3.1 Probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar

A probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar (P_{PT}) é calculada como ilustrado na Expressão 2.15 do Capítulo 2. A Figura 3.6 ilustra a probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar, em função do número de usuários secundários no sistema.

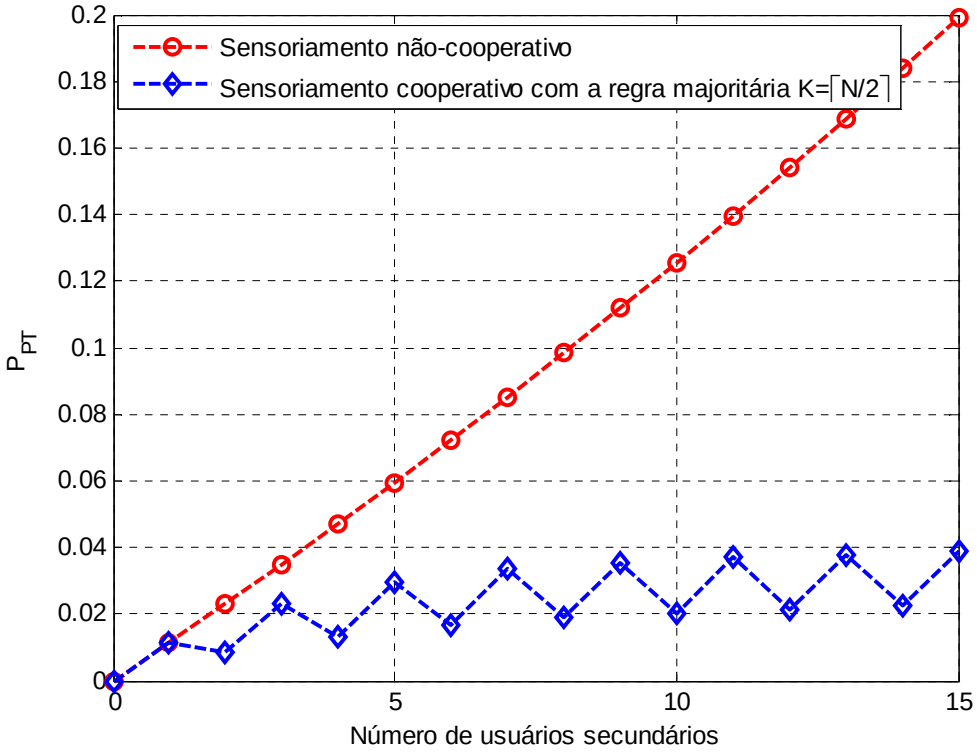

Figura 3.6 *Probabilidade de um usuário primário terminar a sua transmissão.*

No caso do sensoriamento não-cooperativo, a probabilidade de um usuário primário terminar a sua transmissão aumenta com o número de usuários secundários. Isso acontece porque, quanto mais usuários secundários tentarem acessar oportunisticamente o espectro mais provavelmente interromperão uma chamada primária. Para o caso do sensoriamento cooperativo, apesar do aumento de usuários secundários, não há um grande aumento da probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar, porque um maior número de usuários secundários na cooperação para o sensoriamento resulta em melhoria da probabilidade de detecção e, com isso, menos erros de detecção, que, consequentemente, resultam em menos chamadas primárias interrompidas.

3.3.2 Capacidade da rede primária

A capacidade da rede primária é calculada pela Expressão 2.19 do Capítulo 2. A Figura 3.7 ilustra a capacidade da rede primária em função do número de usuários secundários.

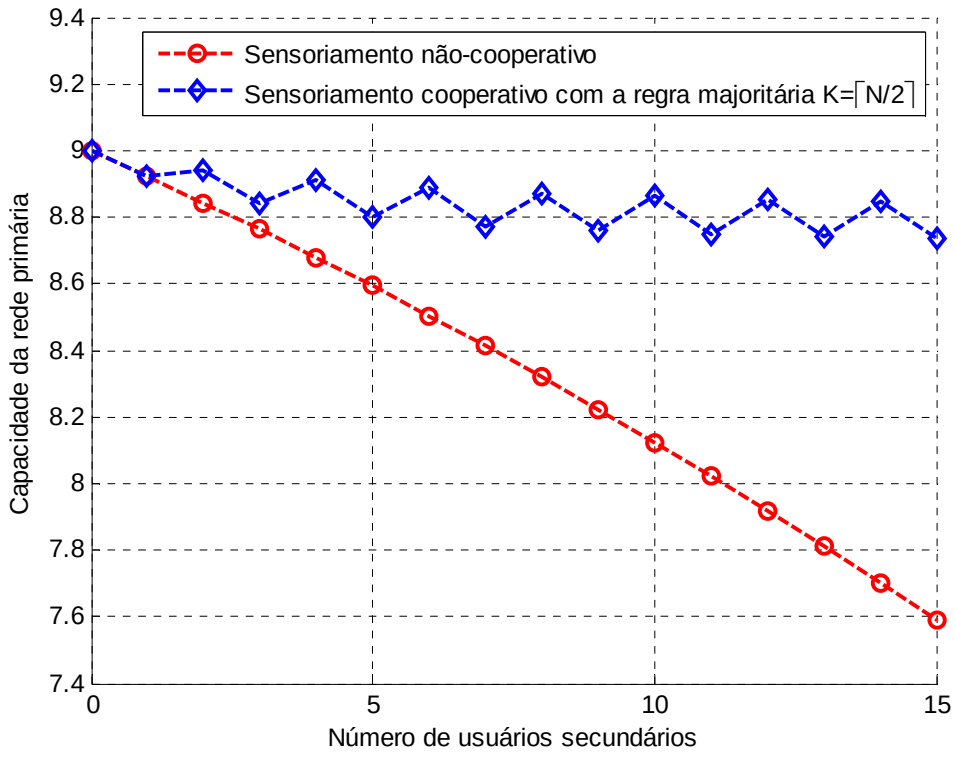

Figura 3.7 *Capacidade da rede primária.*

A Figura 3.7 mostra que com o resultado de uma melhor probabilidade de detecção, obtida com o sensoriamento cooperativo, mais chamadas primárias conseguem completar o seu serviço regularmente, se comparando com o caso em que o sensoriamento é feito de forma não-cooperativa.

3.3.3 Probabilidade de bloqueio de uma chamada secundária

A probabilidade de bloqueio da rede secundária é calculada pela Expressão 2.25 do Capítulo 2. A Figura 3.8 ilustra a probabilidade de bloqueio da rede secundária em função do número de usuários secundários.

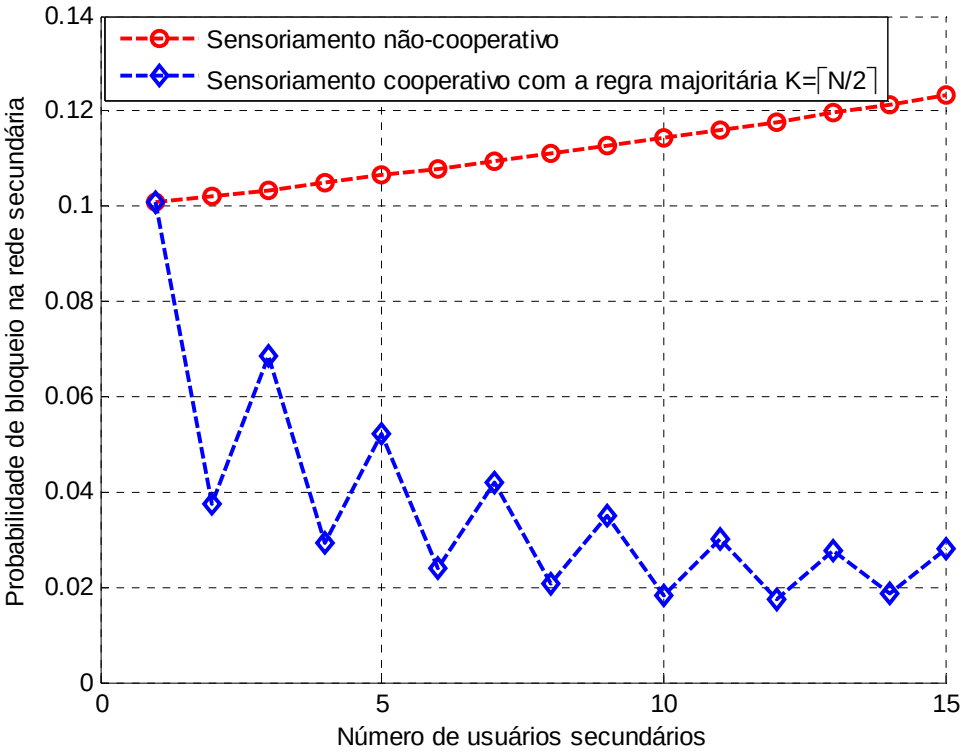

Figura 3.8 *Probabilidade de uma chamada secundária ser bloqueada.*

A Figura 3.8 ilustra que mais chamadas secundárias são bloqueadas se o sensoriamento for implementado de forma não-cooperativa do que se for implementado de

forma cooperativa, a razão é que menos chamadas são bloqueadas à medida que se aumenta o número de usuários secundários participantes na cooperação.

3.3.4 Probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar

A probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar é calculada pela Expressão 2.28 do Capítulo 2. A Figura 3.9 ilustra a probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar em função do número de usuários secundários.

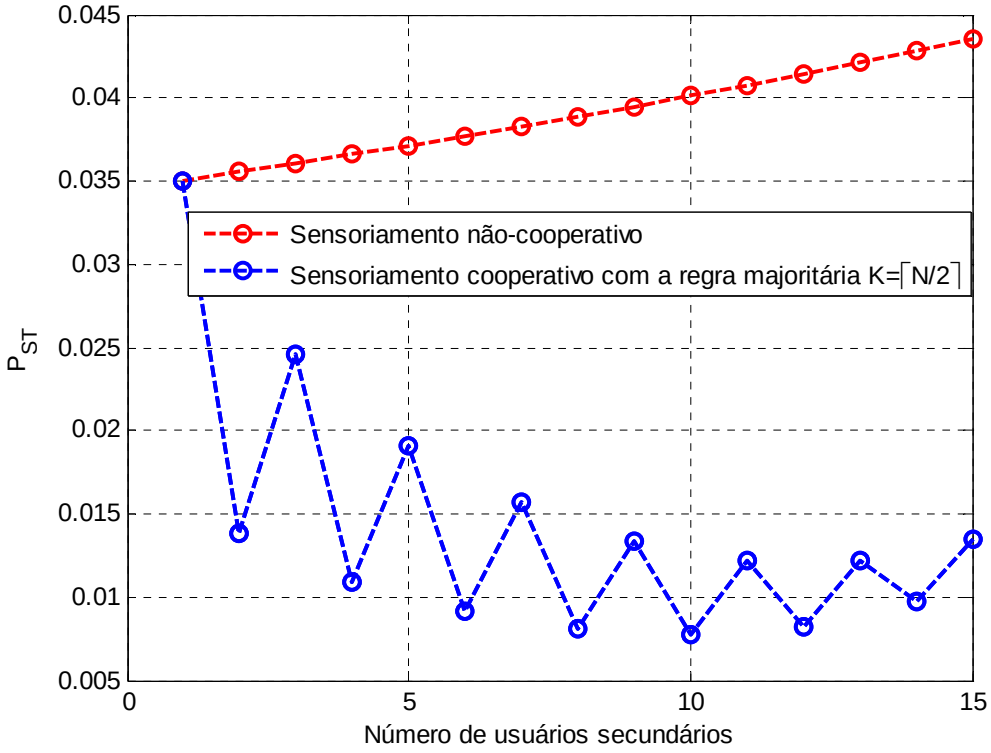

Figura 3.9 *Probabilidade de um usuário secundário terminar a sua transmissão*

A Figura 3.9 ilustra que o sensoriamento cooperativo resulta em menos chamadas secundárias interrompidas. Isso acontece porque sob o sensoriamento cooperativo, o usuário secundário mais facilmente irá encontrar outro canal para transmitir se for interrompido pelo primário, isso porque a probabilidade de falso alarme é melhor no caso cooperativo do que no caso não-cooperativo.

3.3.5 Capacidade da rede secundária

A capacidade da rede secundária é calculada pela Expressão 2.32 do Capítulo 2. A Figura 3.10 ilustra a capacidade da rede secundária em função do número de usuários secundários.

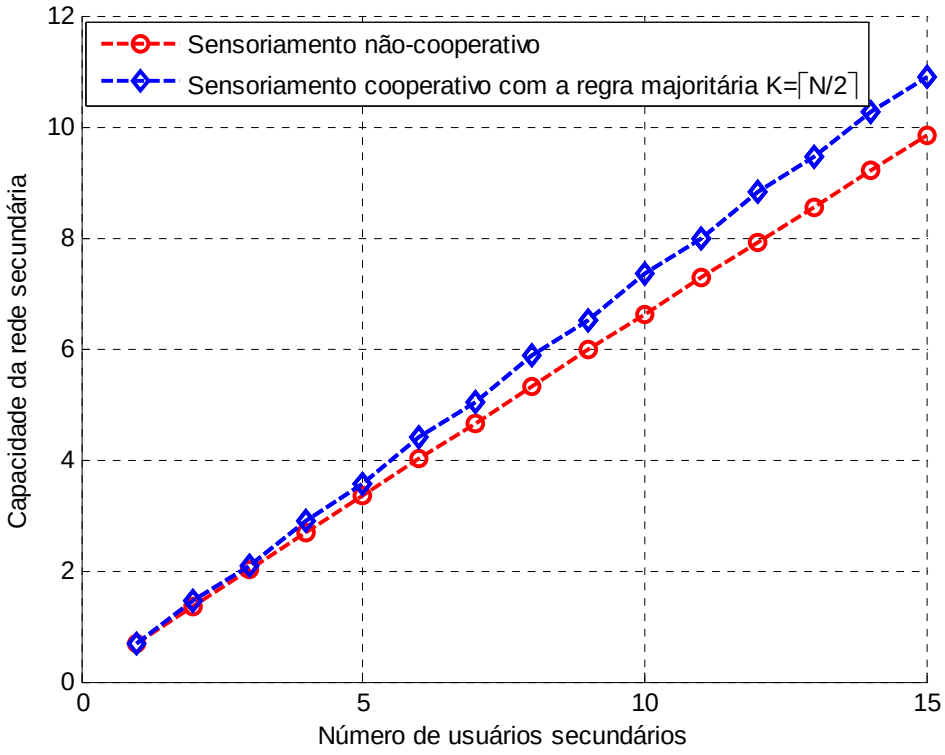

Figura 3.10 *Capacidade da rede secundária*

A Figura 3.10 ilustra que no caso do sensoriamento ser implementado de forma cooperativa, mais chamadas secundárias irão completar com sucesso o seu serviço do que se o sensoriamento for implementado de forma não cooperativa.

3.3.6 Utilização do espectro

A utilização do espectro é calculada pela Expressão 2.34 do Capítulo 2. A Figura 3.11 ilustra a utilização do espectro em função do número de usuários secundários.

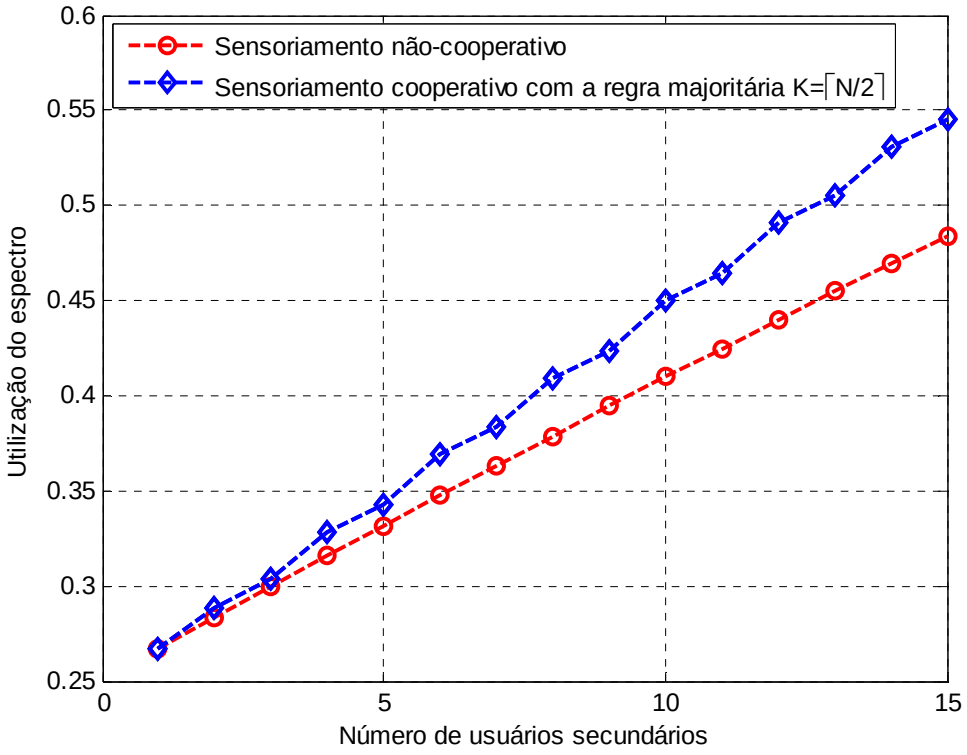

Figura 3.1 *Utilização do espectro*

A Figura 3.11 ilustra que devido a menos erros de detecção obtidos no sensoriamento cooperativo, uma melhor utilização pode ser obtida no sistema se o sensoriamento for implementado de forma cooperativa. Ainda, à medida que aumenta o número de usuários secundários na cooperação melhora-se o sensoriamento e por conseguinte o desempenho do acesso oportunístico ao espectro.

3.4 Conclusão

Neste Capítulo, foi apresentado o estudo sobre a regra de decisão por fusão de decisão no sensoriamento cooperativo. Várias estratégias podem ser adotadas no centro de fusão para se atingir objetivos específicos na rede de rádios cognitivos. Foram estudadas particularmente as regras AND, OR e MAJORITÁRIA e constatou-se que tais regras são apenas casos particulares da regra K-out-of-N. Adicionalmente, fez-se um estudo do desempenho do acesso oportunístico em um sistema com multicanais e sensoriamento

imperfeito cooperativo utilizando a regra majoritária como estratégia no centro de fusão e comparando-o com o desempenho do acesso oportunístico ao espectro em um sistema com multicanais e sensoriamento imperfeito não-cooperativo, usando para isso o modelo de diagrama de estado com população finita apresentado no Capítulo 2. Resultados numéricos foram apresentados e concluiu-se que o desempenho de um sistema de rádio cognitivo pode ser significativamente melhorado se o sensoriamento for feito de forma cooperativa ao invés de forma não-cooperativa.

Capítulo 4: Conclusões e trabalhos futuros

4.1 **Conclusões**

O acesso oportunístico ao espectro é um importante aspecto para o uso da tecnologia de rádios cognitivos, que é considerada uma tecnologia chave para as próximas gerações de redes de comunicação sem fio.

Neste trabalho apresentou-se o modelamento e análise de desempenho do acesso oportunístico ao espectro em um sistema de rádio cognitivo com multicanais e sensoriamento imperfeito. As análises foram feitas com base em modelos de fila com múltiplos servidores, modelados a partir de uma cadeia de Markov. As análises consideraram tanto modelos com população infinita, já previamente apresentados na literatura, quanto modelos com população finita que são uma das contribuições desse trabalho. Os seguintes parâmetros foram considerados: probabilidade de um usuário primário ser forçado a terminar, capacidade da rede primária, probabilidade de bloqueio da rede secundária, probabilidade de um usuário secundário ser forçado a terminar, capacidade da rede secundária e utilização do espectro.

Adicionalmente, foi feito um estudo da regra de fusão no caso do sensoriamento cooperativo por fusão de decisão. A análise terminou com o estudo do desempenho do acesso oportunístico ao espectro em um sistema de rádio cognitivo com sensoriamento cooperativo. Comparando o desempenho obtido com desempenho do acesso oportunístico ao espectro em um sistema de rádio cognitivo com sensoriamento não-cooperativo. A partir dessas análises concluiu-se que o desempenho do acesso oportunístico ao espectro pode ser significativamente melhorado se houver cooperação no sensoriamento entre os usuários secundários, e que o sensoriamento melhora à medida que o número de usuários secundários que participam na cooperação aumenta.

As principais contribuições deste trabalho podem ser resumidas como:

- A análise de desempenho considerando o modelo apresentado em[10]-[11], para o modelo de população infinita adicionando-se duas novas métricas de performance.

- A análise de desempenho do apresentado para a consideração de população finita.
- O estudo das estratégias de decisão no centro de fusão para o sensoriamento cooperativo por fusão de decisão.
- A comparação e desempenho do acesso oportunístico ao espectro com sensoriamento cooperativo por fusão de decisão com o desempenho do acesso oportunístico ao espectro com sensoriamento não-cooperativo.

4.2 **Trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, a agregação de canais bem como a fragmentação de canais são largamente propostos para o acesso oportunístico ao espectro, assim, é útil investigar o caso em que os usuários secundários podem agregar canais primários (contíguos ou não-contíguos). Para o caso de agregação de canais, a taxa de serviço dos usuários secundários deverá ser a taxa de serviço por canal multiplicado pelo número de canais agregados. Para o caso de fragmentação de canais (caso em que os usuários secundários partilham porções de um canal primário), a taxa de serviço de um usuário secundário deverá ser a taxa de serviço de um canal primário dividido pelo número de usuários secundários que partilham esse canal, poderá também ser estudado o caso em que os usuários secundários implementam essas duas abordagens simultaneamente (para o caso de tráfego elástico, por exemplo).

Poderá ser estudado também o caso em que a rede secundária possui diferentes tipos de tráfego com níveis de prioridade diferentes e, assim estudar vários esquemas de alocação de recursos e analisar os seus desempenhos. Poderá, ainda, ser estudado o acesso oportunístico ao espectro para diferentes esquemas de ocupação do espectro por parte dos usuários primários, além da ocupação aleatória considerada neste trabalho.

Poderá também ser estudado o desempenho do acesso oportunístico ao espectro no caso em que os usuários secundários desconhecem a existência de outros usuários secundários, e portanto, é possível a colisão entre usuários secundários.

Anexo A

Programa no MATLAB para o cálculo das probabilidades em regime estacionário

```
% este código MATLAB serviu para o calcular e reproduzir das
% probabilidades
%em regime estacionário para o modelo
% de população infinita para o caso de 3 canais apresentado no
% artigo "Analysis of cognitive radio networks with imperfect sensing"
% dos autores SULIMAN, I.; LEHTOMAKI, J.; BRAYSY, T.; UMEBAYASHI, K.
% publicado
% em 2009 IEEE 20th Symposium On Personal, Indoor and Mobile Radio
% Communications, pages 1616-1620 e o grafico resultante deste cogigo
% reproduz a Figura 4 apresentada no referido artigo.


clear all
clc
hold on

%Dados de entrada

N=3;
PD=0.713;
PM=1-PD;
PF=0.15;
L1=7;
L2=3.5;
M1=4;
M2=4;

% primeiro passo, o conjunto de estados possíveis S é gerado bem como
% a ordem com que cada estado vai ser equacionado nos passos subsequentes

B=1;
 for j=0:N
     for i=0:N

        if (i+j)<=N
            A(i+1,j+1)=B;
            B=B+1;
        end
    end
 end

%No segundo passo, são geradas as taxas do estado destino para cada
%estado
```

```
%considerando todas as possíveis transições partindo daquele estado e são
%colocadas essas taxas na matriz de transição conforme as posições dos
%estados gerados no primeiro passo.

transicaoA(B-1)=0
a=1;
for j=0:N
    for i=0:N
        if (i+j)<=N
%Chegada de um UP, transição do estado (i,j) para (i+1,j)
if  (i+j)<N
               for t=1:N-(i+j)
                   for r=0:i
                       p(r+1)=nchoosek(i,r)*(PD^r*PM^(i-r))*(t/(t+(i-r)))
                   end
                   p1=sum(p(1,:))
                 clear p
                   d(t)=(nchoosek((N-(i+j)),t)*(1-PF)^t*PF^((N-(i+j))-
t))*p1
               end
               f=sum(d(1,:))
               transicaoA(a)=((N-(i+j))*L1)/(N-i)+((j*L1)/(N-i))*f
               equacao=A(i+1+1,j+1)
               Q(a,equacao)=transicaoA(a)

            clear f
              clear d
end
a=a+1;
        end
    end
end
transicaoB(B-1)=0

a=1;
for j=0:N
    for i=0:N
        if (i+j)<=N
%saida de um UP, transição do estado (i,j) para (i-1,j)
if  i>0
               for t=1:i
                   for r=0:(N-(i+j))
                       p(r+1)=nchoosek((N-(i+j)),r)*(PF^r*(1-PF)^((N-
(i+j))-r))*(t/(t+((N-(i+j))-r)))
                   end
                   p1=sum(p(1,:))
                 clear p
                   d(t)=(nchoosek(i,t)*PM^t*PD^(i-t))*p1
               end
               f=sum(d(1,:))
               transicaoB(a)=i*M1+L2*f
               equacao=A(i+1-1,j+1)
               Q(a,equacao)=transicaoB(a)

            clear f
              clear d
```

```
end
a=a+1;
        end
    end
end

transicaoC(B-1)=0

a=1;
for j=0:N
    for i=0:N
        if (i+j)<=N
%chegada de um secundário, transição do estado (i,j) para (i,j+1)
if  (i+j)<N
               for t=1:N-(i+j)
                   for r=0:i
                       p(r+1)=nchoosek(i,r)*(PD^r*PM^(i-r))*(t/(t+(i-r)))
                   end
                   p1=sum(p(1,:))
                 clear p
                   d(t)=(nchoosek(N-(i+j),t)*(1-PF)^t*PF^((N-(i+j))-
t))*p1
               end
               f=sum(d(1,:))
               transicaoC(a)=L2*f
               equacao=A(i+1,j+1+1)
               Q(a,equacao)=transicaoC(a)

            clear f
              clear d
end
 a=a+1;
        end
    end
end
transicaoD(B-1)=0

d=0;
a=1;
for j=0:N
    for i=0:N
        if (i+j)<=N
%saida de um secundario, transição do estado (i,j) para (i,j-1)
if  j>0
               for t=1:i
                   for r=0:(N-(i+j))
                       p(r+1)=nchoosek((N-(i+j)),r)*(PF^r*(1-PF)^((N-
(i+j))-r))*(t/(t+((N-(i+j))-r)))
                   end
                   p1=sum(p(1,:))
                 clear p
                   d(t)=(nchoosek(i,t)*PM^t*PD^(i-t))*p1
               end
               f=sum(d(1,:))
               transicaoD(a)=j*M2+((j*L1)/(N-i))*f
               equacao=A(i+1,j+1-1)
```

```
                Q(a,equacao)=transicaoD(a)

            clear f
             d=zeros
end
  a=a+1;
        end
    end
end



a=1;
for j=0:N
    for i=0:N
        if (i+j)<=N
%chegada de um UP,e secundáio não encontra outro canal para continua
% a transmissão. transição do estado (i,j) para (i+1,j-1)
if  j>0

                transicaoE(a)=((j*L1)/(N-i))*PF^(N-(i+j))*PD^i
                equacao=A(i+1+1,j+1-1)
                Q(a,equacao)=transicaoE(a)

            clear f
              clear d
end
a=a+1;
        end
    end
end


%No terceiro passo, os elementos da diagonal principal da matriz de
%transição são calculados conforme indicado na Expressão (2.4) da
%dissertação


for aj=1:B-1


          fluxo_de_saida(aj)=
transicaoA(aj)+transicaoB(aj)+transicaoC(aj)+transicaoD(aj)+...
          transicaoE(aj)


           Q(aj,aj)=-fluxo_de_saida(aj);
end

%Finalmente no quarto passo, as probabilidades em regime estacionário
%são então calculadas a partir da matriz de transição gerada.
```

```
C=Q.'
C(B,:)=ones;

alfa(B,1)=1

probabilidades=C\alfa

sumation=sum(probabilidades(:,1))

 plot(probabilidades, '-ro')
grid on
```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

[1] FCC Spectrum Policy Task Force, "Report of the spectrum efficiency working group," Nov. 2002. [Online]. disponivel: http://www.fcc.gov/sptf/reports.html

[2] MITOLA III, J. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*, Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, Sweden, 2000.

[3] HAYKIN, S. *"Cognitive Radio: Brain-empowered wireless communications"* IEEE J. Sel. Commun., FEB. 2005, Vol.23, No 2, pages 201-220.

[4] GHOSH, G.; DAS, P.; CHATTERJEE, S. *"Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Access-A Study"* International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN), March 2014, Vol.6, No 1, pages 43-60.

[5] WANG, B.; ABDULREHEM, M.; LIU, R.; CLANCY, T.; "*Prioritized Markov approach for dynamic spectrum allocation*," IEEE transactions On wireless Communication, 2009, Vol.8, No 2, pages 1934-1943.

[6] JIAO, L.; LI, F. Y.; PLA, V. *"Dynamic channel aggregation strategies in cognitive radio networks with spectrum adaptation,"* 2011 IEEE GLOBECOM.

[7] JIAO, L.; LI, F. Y.; PLA, V. *"Modeling and performance analysis of channel assembling in multi-channel cognitive radio networks with spectrum adaptation,"* IEEE Transaction on Vehicular Technology., July 2012, vol. 61, no. 6, pages 2686–2697,

[8] BALAPUWADEGE, I.; JIAO, L.; LI, F. Y.; PLA, V. *"Channel Assembling With Priority-Based Queues in Cognitive Radio Networks: Strategies and Performance Evaluation"* IEEE transactions On wireless Communication, February 2014, Vol.13, No 2, pages 630-645.

[9] Wong, E.W.M.; Foh, C.H. "*Analysis of Cognitive Radio Spectrum Access With Finite User Population*". IEEE Communication Letters, May 2009, Vol. 3, No. 5, pages 294-296.

[10] SULIMAN, I.; LEHTOMAKI, J.; BRAYSY, T.; UMEBAYASHI, K. "*Analysis of cognitive radio networks with imperfect sensing"*, 2009

IEEE 20th Symposium On Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pages 1616-1620.

[11] SULIMAN, I.; LEHTOMAKI, J.; KATZ, M.; UMEBAYASHI, K. "*Analysis of cognitive radio networks with imperfect sensing*", IEICE Trans. Commun., vol E96-B, No 6, JUNE 2013.

[12] NEZHADAL, S. "*Common Control Channel Saturation Detection and Enhancement in Cognitive Radio Networks*". International Journal of Distributed and Parallel Systems, vol. 3, no. 1, (2012) January, pp. 15-25

[13] ZHAO, Q.; TONG, L.; SWAMI, A.; CHEN, Y. "*Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks*". A POMDP framework, Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.25, no.3, pp.589-600, April 2007

[14] LOU, L.; ROY, S. "*Analysis of search schemes in cognitive radio*". SECON, 2007, pp. 647–654.

[15] TANG, S.; MARK, B. "*Modeling and analysis of opportunistic spectrum sharing with unreliable spectrum sensing*". IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 8, pp. 1934-1943, 2009.

[16] KLEINROCK, L. *Queueing Systems, Volume I: Theory*. Jonh Wiley and Sons, March 1975

[17] VIRTANO, J. "*Engset's systems. [Online]*" Disponivel em: https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s383143/kalvot/E_engset.pdf

[18] AKYILDIZ, I.; LO, B. BALAKRISHNAN, R. "*Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey*" Physical Communication, December 2010, pages 40-62.

[19] NGATCHED, T.M.N.; SHUO DONG; ALFA, A.S.; "*Analysis of Cognitive Radio Networks with Channel Aggregation and Imperfect Sensing*", 2011 Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pages 1 – 6.

[20] NGATCHED, T.M.N.; SHUO DONG; ALFA, A.S.; JUN CAI "*Performance analysis of cognitive radio networks with channel assembling and imperfect sensing*", 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), pages 1688 – 1692

[21] LETAIEF, K.; ZHANG, W. *"Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks"* Proceedings of the IEEE, April 2009, pages 878-893

[22] LETAIEF, K.; ZHANG, W.; MALLIK, R. *"Optimization of Cooperative sensing in cognitive radio networks"* IEEE transactions On wireless Communication, December 2009, Vol. 8, pages 5761-5766

[23] LEON-GARCIA, A. *Probability, statistics, and random process for electrical engineering. Third Edition,* Pearson Prentice Hall, 2008.

[24] CHAN, W. *An elementary Introduction to Queueing systems.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014

[25] ZHAO, Q.; SADLER, M. *"A survey of dynamic spectrum access"* IEEE signal processing magazine, May 2007, pages 79-89.

[26] LI, L.; ZHANG, S.; WANG, K.; ZHOU, W. *"Queuing method in combined channel aggregation and fragmentation strategy for dynamic spectrum access"* IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC), 2012, pages 1214 - 1219

[27] TEVFIK, Y.; ARSLAN, H. *"A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications"* IEEE communications surveys & tutorials, vol. 11, no. 1, 2009,

[28] ALNABELSI, S. *On spectrum allocation strategies in Cognitive Radio Networks,* Ph.D. dissertation, Iowa State University, Ames, 2012.

[29] THOMOPOULOS, S.; VISWANATHAN, R.; BOUGOULIAS, R. *"Optimal Decision Fusion in Multiple Sensor Systems"* IEEE transactions on aerospace and electronic systems vol. aes-23, no. 5 September 1987, pages 644-653

[30] RAUNIRYAR, a.; JANG, J.; SHIM, S. *"Optimal Hard Decision Fusion Rule for Centralized and Decentralized Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks"* Journal of Advances in Computer Networks, Vol. 3, No. 3, September 2015

[31] SINA, M.; PRABHAKAR, S.; LEUS, G *"Optimal Hard Fusion Strategies for Cognitive Radio Networks"* IEEE WCNC, 2011

[32] COUCEIRO, B.; BRITO, J. *"Performance Evaluation of the Opportunistic Spectrum Access in a Cognitive Radio Network with*

Imperfect Sensing" The Fifteenth International Conference on Networks (ICN-2016).

[33] COUCEIRO, B.; BRITO, J. *"Performance Evaluation of the Opportunistic Spectrum Access in a Cognitive Radio Network with Cooperative and Non-cooperative Sensing"* The 3rd International Symposium on Networks, Computers and Communications, May 2016