



Catherine Paola Méndez Rangel

**Análise do desempenho de regras de fusão
para sensoriamento cooperativo do
espectro**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de
Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro

Maio de 2019



Catherine Paola Méndez Rangel

**Análise do desempenho de regras de fusão
para sensoriamento cooperativo do
espectro**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

Universidade Federal Fluminense - UFF

Carlos Rodriguez Ron

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO

Rio de Janeiro, 30 de maio de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Catherine Paola Méndez Rangel

Graduou-se em Engenharia Eletrônica pela Universidade Manuela Beltrán (Bogotá, Colômbia) em 2013

Ficha Catalográfica

Méndez Rangel, Catherine Paola

Análise do desempenho de regras de fusão para sensoriamento cooperativo do espectro / Catherine Paola Méndez Rangel ; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – 2019.

78 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Rádio cognitivo. 3. Espectro radioelétrico. 4. Detector de energia. 5. Hard decision. 6. Soft decision. I. Mello, Luiz A. R. da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Os agradecimentos desta dissertação vão primeiramente a Deus, sem ele nada disto seria possível.

Em especial não tenho palavras que expressem meu total agradecimento ao meu excelente orientador e professor Luiz Alencar Reis da Silva Mello me guiando e me ajudando profissional e economicamente na realização e execução de nosso trabalho, muito obrigada por sempre acreditar em mim, os dois sabemos que o caminho não foi fácil e hoje por fim encerro um ciclo mais da minha vida.

Agradeço aos meus professores de mestrado por todos os ensinamentos recebidos deles.

À PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao meus pais Lucas Evangelista Méndez e Alicia Rangel Duarte, sempre estiveram comigo e souberam todo meu processo, agradeço de coração infinitamente todo seu apoio, conversas e conselhos, vocês são e serão minha guia por sempre e meu maior motivo para cada dia ser melhor.

Mani Jennifer Alexandra Méndez Rangel aqui desejo manifestar minha maior gratidão com você, obrigada por tudo o que você faz e fez por mim, é uma benção ter uma irmã como você, tudo este sonho e travessia começou graças a você. Pauwi, Paula Andrea te amo com todo meu coração.

Agradeço às minhas avós Leonor Duarte e Bertha Daza e a toda minha espetacular família, um logro mais vamos pendurar na parede do meu amado avô e anjo Luis Rangel Grimaldo.

A minha bebê Roma, obrigada por ser um anjo e chegar inesperadamente a nossa vida, você é a melhor virá lata do mundo, te agradeço por cuidar e estar com minha mãe quando ela sentia saudades da Jennifer e de mim.

Aos meus amigos da PUC em especial a Albert, ao meu querido cunhado Mauricio e a sua maravilhosa família que já sinto como minha, a Juan Pablo e Johana e a sua futura filha, ao meu novo melhor amigo aqui do Rio José Luis, você sempre será meu parceiro de vida, obrigada por tudo querido meu.

E finalmente aos meus amigos Laura, Ricardo e Duvan, vocês são sensacionais me sentia em casa cada vez que conversava com vocês.

Resumo

Méndez Rangel, Catherine Paola; da Silva Mello, Luiz Alencar Reis. **Análise do desempenho de regras de fusão para sensoriamento cooperativo do espectro.** Rio de Janeiro, 2019. 78p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A tecnologia de rádios cognitivos está surgindo como uma eficaz alternativa para aumentar o número de usuários de serviços de dados em banda larga em diversas faixas de frequências. O conceito pretende resolver a escassez do espectro a partir de duas características básicas: a capacidade cognitiva e a capacidade de reconfiguração. A capacidade cognitiva refere-se à habilidade do rádio de conhecer o meio no qual pretende operar, identificar de forma oportunista os espaços espectrais não utilizados na sua totalidade ou em alguns intervalos de tempo e, a partir da sua reconfiguração transmitir informação sem provocar interferência no usuário principal da porção do espectro utilizado. Esta dissertação de mestrado apresenta os resultados obtidos da análise do desempenho de regras de fusão para sensoriamento remoto cooperativo. Na primeira parte são abordados os fundamentos teóricos de Rádio cognitivo e os aspectos mais importantes do gerenciamento do espectro radioelétrico, além dos fundamentos do detector de energia, detector mais simples de implementar e utilizar para o sensoriamento em redes cognitivas. A seguir são abordadas diferentes técnicas para sensoriamento em redes cognitivas, apresentando os esquemas de decisão e a detecção convencional do espectro cooperativo, os métodos Hard decision e Soft decision. Finalmente uma avaliação das regras de sensoriamento cooperativo em cenários reais é realizada para obter as conclusões do trabalho.

Palavras-chave

Rádio cognitivo; Espectro radioelétrico; detector de energia; Hard decision; Soft decision.

Abstract

Méndez Rangel, Catherine Paola; da Silva Mello, Luiz Alencar Reis (Advisor). **Analysis of the performance of fusion rules for cooperative spectrum sensing**. Rio de Janeiro, 2019. 78p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Cognitive radio technology is emerging as an effective alternative to increase the number of users in several frequency bands. The concept aims to solve the scarcity of the spectrum from two basic characteristics: the cognitive capacity and the capacity of reconfiguration. Cognitive ability refers to the ability of the radio to know the medium in which it is operating, to identify in an opportunistic way the unused spectral spaces in their totality or in some intervals of time and, from its reconfiguration transmit information without causing interference in the user of the portion of the spectrum used. This dissertation presents the results obtained from the analysis of the performance of fusion rules for cooperative remote sensing. The first part deals with the theoretical foundations of cognitive radio and the most important aspects of radioelectric spectrum management, as well as the fundamentals of the energy detector, the most important detector used in cognitive networks. Next, different techniques for sensing in cognitive networks are presented, presenting decision schemes and conventional detection of the cooperative spectrum, the Hard decision and Soft decision methods. Finally, an evaluation of the rules of cooperative sensing in real scenarios is carried out to obtain the conclusions of the work.

Keywords

Cognitive radio; radio spectrum; energy detector, hard decision, soft decision.

Sumário

1 Introdução	14
2 Rádio Cognitivo	18
2.1. Gerenciamento do Espectro.	20
2.1.1 Escassez de Espectro	21
2.1. 2 Espaços Brancos	22
2.2. Acesso dinâmico ao espectro	24
2.3. Sensoriamento do Espectro	25
2.4. Detector de Energia	26
3 Técnicas de sensoriamento em Redes cognitivas	30
3.1. Esquema de decisão centralizado	30
3.2. Esquema de decisão distribuído	31
3.3. Detecção convencional do espectro cooperativo	31
3.3.1. Hard decision	32
3.3.2. Soft decision	34
4 Avaliação das regras de sensoriamento cooperativo em cenários reais	38
4.1. Parâmetros técnicos utilizados	39
4.1.1. Parâmetros do usuários primário	39
4.1.2. Parâmetros do usuário secundário	40
4.2. Cálculo do SNR e mapa de valores de referência	41
4.3. Resultados <i>Hard</i>	48
4.4. Resultados <i>Soft</i>	55
5 Conclusões	63
Referências bibliográficas	65
A Códigos de Matlab	

A.1 Hard

69

A.2 Soft

73

Lista de figuras

Figura 2.1 - Ciclo do Rádio Cognitivo.	19
Figura 2.2 - Ciclo capacidade cognitiva.	20
Figura 2.3 - Atribuição de Faixas de frequências no Brasil.	21
Figura 2.4 - Buracos Brancos no Espectro.	23
Figura 2.5 - Alocação de frequência utilizada em Rádio Cognitivo	24
Figura 2.6 - Ramificação dos diferentes tipos de sensoriamento espectral.	26
Figura 2.7 - Diagrama de blocos detector de energia.	27
Figura 4.1 - Cenário de sensoriamento de Rádio cognitivo	38
Figura 4.2 - Diagrama de radiação do usuário primário do Azimuth	40
Figura 4.3 - Diagrama de radiação do usuário primário da Elevação	40
Figura 4.4 - Razão SNR para cada US	41
Figura 4.5 - US com níveis detetáveis ideais	42
Figura 4.6 - Efeito da aleatoriedade do canal	43
Figura 4.7 - Níveis detetáveis considerando-se o efeito do canal	43
Figura 4.8 - US com SNR aproximado de 0dB	44
Figura 4.9 - US com SNR aproximado de 5dB	45
Figura 4.10 - US com SNR aproximado de 10dB	45
Figura 4.11 - US com SNR aproximado de 10dB (variações de 2dB)	46
Figura 4.12 - US com SNR aproximado de 5dB (variações de 2dB)	46
Figura 4.13 - US com SNR aproximado de 0dB (variações de 2dB)	47
Figura 4.14 - US com SNR aproximado de 10dB (variações de 5dB)	47
Figura 4.15 - US com SNR aproximado de 5dB (variações de 5dB)	48
Figura 4.16 - US com SNR aproximado de 0dB (variações de 5dB)	48
Figura 4.17 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor HARD AND	49
Figura 4.18 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR variável e com decisor HARD AND considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.	50

Figura 4.19 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR variável e com decisor HARD AND considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.	50
Figura 4.20 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor HARD OR.	51
Figura 4.21 - Resultados de sensoramento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor HARD OR considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.	52
Figura 4.22 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor HARD OR considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.	52
Figura 4.23 - Resultados de sensoramento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Majority</i> .	53
Figura 4.24 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Majority</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.	54
Figura 4.25 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Majority</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.	54
Figura 4.26 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SLC</i> .	55
Figura 4.27 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SLC</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.	56
Figura 4.28 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SLC</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.	56
Figura 4.29 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SC</i> .	57
Figura 4.30 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SC</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.	57

Figura 4.31 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SC</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.	58
Figura 4.32 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft MRC</i> .	59
Figura 4.33 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft MRC</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.	59
Figura 4.34 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft MRC</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.	60
Figura 4.35 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SLS</i> .	61
Figura 4.36 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SLS</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.	61
Figura 4.37 - Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor <i>Soft SLS</i> considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.	62

Lista de tabelas

Tabela 4.1: Parâmetros de enlace da Estação Rádio Base do usuário primário.	39
Tabela 4.2: Parâmetros técnicos dos sensores.	40

1 Introdução

O campo das comunicações tem passado por importantes transformações desde o século XIX [1]. Com a invenção do telégrafo em 1833 e a criação das redes telegráficas, surgiram as telecomunicações e a transmissão da informação utilizando sinais eletromagnéticos. Este foi um grande avanço nos processos de comunicação, mas ainda longe de ser a solução para as necessidades de um mundo em rápida industrialização.

Os descobrimentos de Heinrich Hertz e James Maxwell foram as bases para a transmissão de sinais utilizando ondas eletromagnéticas. Em 1879 Alexander Graham Bell inventa o telefone sem fio. A seguir, os conceitos formulados por Nikola Tesla e Guglielmo Marconi formam a base da criação da transmissão sem fio, via rádio, mais fácil de implantar, porém sujeita à interferência entre diferentes sistemas.

Atualmente é possível encontrar uma grande variedade de sistemas comunicações via rádio, com diferentes serviços ou aplicações que permitem que a experiência da comunicação seja mais abrangente, mas o grande número de usuários e as demandas por cada vez maior capacidade em sistemas digitais são o grande desafio.

A demanda por maior capacidade requer a adequada utilização do espectro radioelétrico, recurso natural e de caráter limitado, que é administrado pelos governos [2]. É composto por um conjunto de frequências agrupadas em bandas, com frequências que variam, por definição, entre os 30 KHz e os 300 GHz. Para que o compartilhamento do espectro seja praticado da maneira controlada, a atribuição das diferentes bandas deve ser realizada por uma organização ou entidade

responsável, para o caso do Brasil o organismo encarregado é a Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL.

Embora exista um esforço grande pela realização de uma distribuição ótima das bandas do espectro, a imensa quantidade e diversidade de sistemas e dispositivos existentes na atualidade faz com que algumas bandas de frequência apresentem saturação, enquanto que outras sejam subutilizadas. Ainda há muito conservadorismo na utilização simultânea de faixas do espectro por usuários primários e secundários. Estudos da Federal Communications Commission (USA), motivados pela demanda reprimida para a implementação de novos serviços de comunicações e pela necessidade de mais altas taxas de transmissão, indicam que somente em 20% ou menos do espectro de radiofrequências disponível é efetivamente ocupado, em tempo e espaço.

A tecnologia de rádios cognitivos está surgindo como uma eficaz alternativa para aumentar o número de usuários em diversas faixas de frequências [3]. O conceito pretende resolver a escassez do espectro a partir de duas características básicas: a capacidade cognitiva e a capacidade de reconfiguração. A capacidade cognitiva refere-se à habilidade do rádio de conhecer o meio no qual está operando, identificar de forma oportunista os espaços espectrais não utilizados na sua totalidade ou em alguns intervalos de tempo e, a partir da sua reconfiguração transmitir informação sem provocar interferência no usuário principal da porção do espectro utilizado.

Partindo destes conceitos, o rastreamento e a utilização dos intervalos espectrais através da tecnologia de rádios cognitivos, permitirá aumentar a eficiência de uso do espectro com a introdução de novos serviços a serem explorados por usuários secundários obrigados a não interferir, ou provocar interferência muito limitada, nos usuários primários.

O uso dos rádios cognitivos prevê o sensoriamento do espectro, a gestão das informações de ocupação de espectro e o compartilhamento dinâmico de frequências. A execução destas funções exige a implementação de rádios definidos

por software (software define rádios – SDR) com características adaptativas, como sugerido por Jondral [4]. O rádio cognitivo é um SDR inteligente que pode, após a avaliação do ambiente de radiofrequências, registrar as informações detectadas e associá-las à sua região geográfica e a outros dados técnicos relevantes. Os dados obtidos, devidamente processados, permitirão tomar decisões quanto à ocupação do espectro, o início e interrupção da irradiação pelos sistemas secundários e as alterações de configuração dos transceptores e frequências de operação para que seja garantida a compatibilidade eletromagnética na área explorada.

A detecção do espectro utiliza basicamente três técnicas [5-7]: i) detecção de energia; ii) emprego de filtros casados; e iii) detecção de cicloestacionariedade. A detecção de energia é a técnica mais largamente utilizada devido à sua simplicidade de implementação. No entanto, esta opção pode levar a erros de detecção devido às flutuações no nível de ruído e outros fatores ambientais relacionados que afetam a propagação. Estas variações podem reduzir a probabilidade de acertos na identificação de usuários primários.

Os filtros casados são mais eficientes na detecção dos sinais, mas exigem um conhecimento prévio das características dos transmissores e emissões existentes na área, o que nem sempre é possível.

A técnica de detecção da cicloestacionariedade é bastante utilizada para determinar a presença de sinais dos quais não se conhecem as características, embora a discriminação do ruído em relação ao sinal que se deseja identificar seja computacionalmente intensiva, tornando esta técnica bastante complexa e onerosa para uma aplicação em larga escala.

Existem ainda técnicas cooperativas [8-11] para redes de rádios cognitivos que monitoram o espectro de modo compartilhado. Esta modalidade tem a limitação de onerar os canais comunicação com eventos de coordenação, o que reduz o tempo disponível para utilização dos espaços espectrais. Por outro lado, oferece grandes vantagens quanto à confiabilidade da detecção e consequente redução de interferências de usuários secundários sobre os primários. A técnica combina a

informação de diferentes usuários para tomar uma decisão sobre a presença ou ausência do usuário primário. Para a combinação da informação é utilizado um centro de fusão no qual são aplicadas regras de fusão para determinar a decisão certa para realizar a transmissão.

O objetivo desta dissertação é realizar, através de simulações computacionais, a análise comparativa do desempenho das regras de fusão para sensoriamento remoto cooperativo, para isso previamente é realizado um estudo detalhado da teoria sobre rádio cognitivo, gerenciamento de espectro e as técnicas de sensoriamento existentes. O trabalho desenvolvido está descrito em quatro capítulos, da seguinte maneira:

– No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos de Rádio Cognitivo. Na primeira seção do capítulo as características básicas de RC são apresentadas, seguida da distribuição e características do espectro radioelétrico e finalmente é abordada a técnica de detecção que será utilizada nas simulações, o detector de energia.

– No capítulo 3 são apresentadas as técnicas de sensoriamento em redes cognitivas, com foco nas técnicas de caráter cooperativo Hard e Soft.

– No capítulo 4 descrito o software de simulação desenvolvido e realizada a avaliação das regras de sensoriamento cooperativo apresentadas no capítulo 3.

– No capítulo 5 as conclusões da dissertação são apresentadas, resumindo as vantagens da utilização das diferentes técnicas de sensoriamento e são sugeridos temas a trabalhar em pesquisas no futuro.

2 Rádio Cognitivo

Muitas definições sobre o conceito de Rádio Cognitivo (RC de agora em diante) são encontradas na literatura técnica. As diferentes interpretações apresentadas por diferentes autores compartilham ideias semelhantes, e alguns termos como consciência, inteligência, aprendizagem, adaptabilidade, configurabilidade, autonomia, confiabilidade e eficiência, são comuns na maioria de referências e serão utilizados e abordados neste documento.

O conceito de RC foi inicialmente apresentado por Joseph Mitola III, considerado o pai do rádio cognitivo, na sua tese de doutorado [7]. Anos depois, de forma objetiva, Haykin [3] define o RC como um rádio que pode mudar seus parâmetros com base na interação com o ambiente no qual opera, e que tem os seguintes objetivos principais:

- Garantir uma comunicação altamente confiável, sempre e quando seja necessário.
- Permitir o uso eficiente do espectro radielétrico.

As duas características mais importantes do RC são:

– **Capacidade Cognitiva:** Refere-se à habilidade do RC de obter informações do seu ambiente operacional e geográfico, através de observações, para assim ter a capacidade de decidir quais são as faixas de frequência inativas. Isto é feito interagindo em tempo real com o entorno radioelétrico. As tarefas realizadas pela capacidade cognitiva fazem parte do ciclo cognitivo, que é apresentado nas Figuras 2.1 e 2.2.

– **Reconfigurabilidade:** Depois de realizar a leitura do ambiente radioelétrico, o RC terá conhecimento do seu espaço circundante e irá

adaptar-se e reajustar seus parâmetros de operação (faixa de frequência, potência de transmissão, tipo de modulação) sem precisar de nenhuma modificação na parte de hardware.



Figura 2.1: Ciclo do Rádio Cognitivo.

De acordo com [8], o rádio cognitivo deve utilizar diferentes tecnologias para atender aos requisitos mencionados, sendo muito importante ter em conta a frequência de operação, as técnicas de modulação, a fonte de transmissão e a tecnologia de comunicação. É importante levar em conta que a capacidade cognitiva em tempo real e no seu entorno é realizada por processamento de sinais e técnicas de aprendizagem de máquina, e a reconfigurabilidade é realizada brindada pelo software do rádio cognitivo, como ilustrado na Figura 2.2.



Figura 2.2: Ciclo da capacidade cognitiva.

2.1. Gerenciamento do Espectro.

O espectro de radiofrequências é um recurso natural limitado e que tem alta demanda. Normalmente as prestadoras de serviços que precisavam utilizar o espectro requerem uma licença de uso de faixas de frequência, que é concedida pelo ente regulador das telecomunicações de cada país. No caso do Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é o ente encarregado de administrar, fiscalizar e garantir que o espectro de radiofrequências seja empregado de maneira eficiente, sendo que seu uso esteja sujeito, além das legislações locais, às normas internacionais. Devido ao crescente aumento do número de usuários e diversificação de serviços de comunicação sem fio que precisam acessar o espectro de radiofrequência, apresenta-se hoje um cenário de acentuada escassez do recurso.

Em [15] se mostra o quadro de distribuição das faixas de frequências no Brasil. Nele pode-se consultar as diferentes faixas de frequências, regulamentações e serviços. A Figura 2.3 mostra, de forma compacta, a atribuição de faixas de frequência no Brasil.

Em [20] a arquitetura de rede para RC e tópicos com relação a detecção, compartilhamento, decisão e mobilidade do espectro são investigados. Finalmente em [21], os critérios para alocação de espectro são abordados.

No mundo atual a solicitação de acesso ao meio aumenta constantemente, já que os novos serviços e aplicativos sem fio precisam de maior largura de banda. A proposta oferecida pelo RC é que um usuário não licenciado acesse o espectro de maneira oportunista, tendo em conta o estado do canal e esteja frequentemente sensoriando a condição da banda solicitada. É importante ressaltar que existe prioridade para os usuários licenciados ou primários, os quais sempre poderão dispor e ter alta prioridade do uso da sua faixa de frequência sem nenhum tipo de interferência relevante causada por outros usuários ou dispositivos.

Neste sentido o RC se apresenta como uma das soluções propostas para resolver o problema da escassez do espectro, oferecendo a possibilidade de melhorar a eficiência de sua utilização e aproveitando as faixas de frequência que não estão sendo usadas num determinado momento em tempo, espaço ou frequência.

2.1.2. Espaços Brancos

Algumas bandas de frequência escaneadas num determinado espaço-tempo são muito utilizadas e outras são inativas. Estes espaços não utilizados são definidos em [22] como espaços brancos (WS). É possível observar essa definição de uma maneira mais clara na Figura 2.4.

Um espaço branco é uma banda de frequências atribuída a um usuário primário, que num momento em particular e numa localização geográfica específica não está sendo utilizada por esse usuário. Estes WS podem existir nos domínios do tempo, frequência e espaço, e podem ser usufruídos por outro tipo de usuário que não tem direito a transmitir nas faixas de frequência licenciadas. Esse cenário foi a principal razão para se começar a pesquisar as possíveis soluções para a

subutilização do espectro Radioelétrico, introduzindo e dando espaço ao conceito de Rádio Cognitivo.

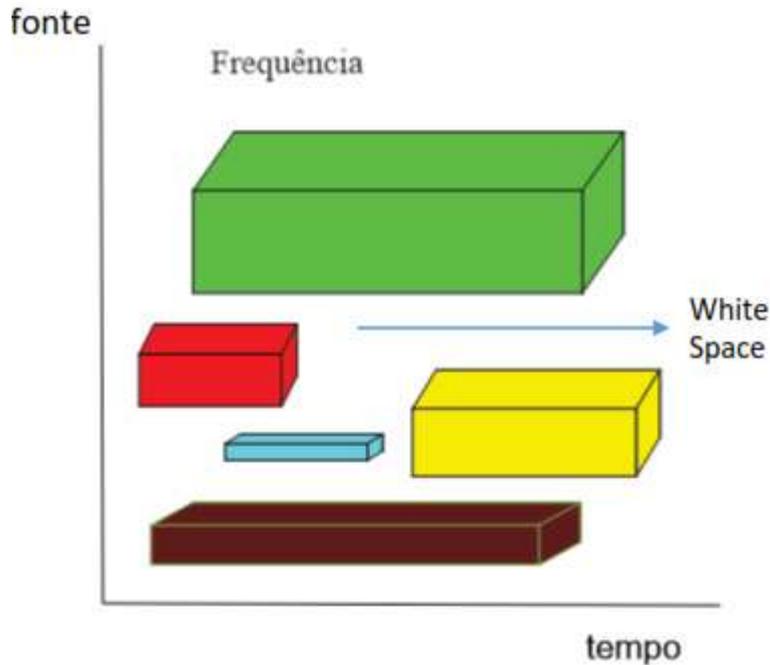


Figura 2.4: Buracos Brancos no Espectro.

Dentre os principais módulos executados pelo RC está a identificação de ocupação do espectro em seu entorno, descobrindo a existência de espaços brancos numa determinada área geográfica. Esta informação pode ser obtida utilizando bases de dados que oferecem a geolocalização e o uso estimado do serviço primário, a partir de indicadores que contem informação da previsão do uso do espectro ou por meio de um sensoriamento de espectro local executado pelos US.

A tecnologia RC permite que os US identifiquem espaços brancos do espectro licenciado e os utilizem oportunisticamente sempre que não gerem interferência prejudicial sobre o UP.

A fim de encontrar esses espaços brancos é relevante ter em conta dois parâmetros temporais:

- O período de sensoriamento.

- O tempo de detecção do canal.

2.2. Acesso dinâmico ao espectro

O acesso dinâmico ao espectro definido em [18] e [19] consiste em deixar de organizar o espectro como um conjunto de frequências rigidamente alocadas e começar a utilizar este recurso sob demanda. E uma das tecnologias utilizadas para identificar os espaços brancos é o rádio cognitivo.

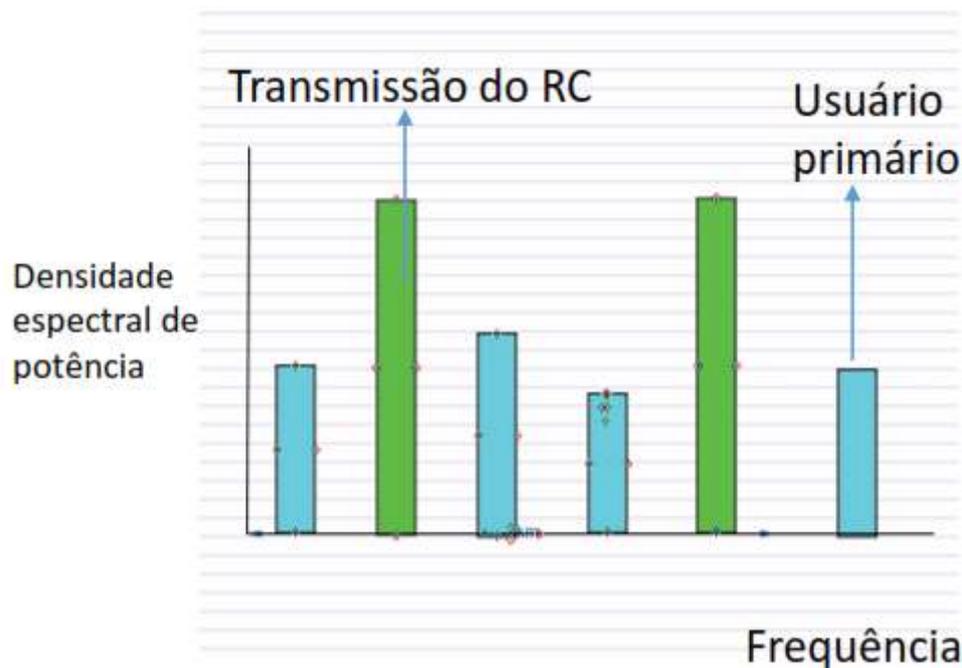


Figura 2.5: Alocação de frequência utilizada em Rádio Cognitivo

Baseia-se na definição de duas categorias de usuários, os usuários primários "UP" que tem licença para fazer uso da banda de frequência do espectro alocada para eles, e os usuários não licenciados que transmitem de forma eventual na mesma faixa que recebem o nome de usuários secundários "US". O maior desafio de um sistema de comunicações baseado em Rádio Cognitivo é obter eficiência em relação ao acesso oportunista da frequência do espectro radioelétrico, detectando de modo inteligente os espaços brancos através de técnicas de sensoriamento de espectro.

2.3. Sensoriamento do Espectro

Uma das tarefas mais importantes e críticas do rádio cognitivo é, sob o ponto de vista do US, definir as taxas de ocupação do espectro radioelétrico, estabelecer quais são as bandas que apresentam inatividade num dado momento para assim poder ter acesso dinâmico e oportunista a essas faixas, não criando colisão ou interferência significativa com a transmissão do UP em momento nenhum.

Os US deverão realizar quatro tarefas na hora de monitorar o espectro:

- Determinar quais porções da faixa de frequência analisada não estão sendo utilizadas.
- Escolher nessas faixas o melhor canal entre os canais livres para fazer sua possível transmissão.
- Se encarregar do compartilhamento do acesso ao meio entre diferentes usuários secundários.
- Disponibilizar a faixa do espectro quando o UP pretenda transmitir.

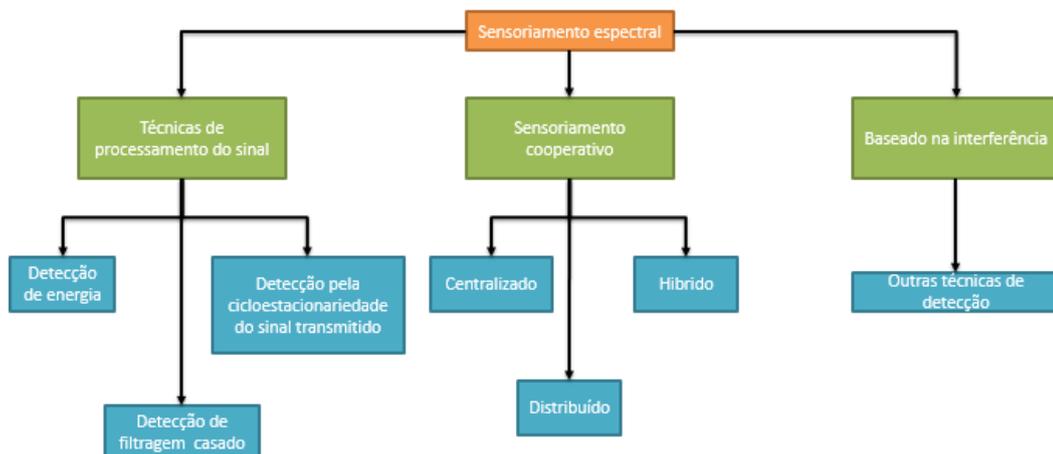


Figura 2.6: Ramificação dos diferentes tipos de sensoriamento Espectral.

O sensoriamento do espectro pode-se dividir em duas classes que podem ser observados na Figura 2.6: a técnica do processamento do sinal ou detecção local e

a técnica de sensoriamento cooperativo que serão abordados nas seguintes subdivisões em profundidade.

Notadamente um usuário secundário efetuando uma transmissão não pode ao mesmo tempo tentar efetuar um sensoriamento do espectro, pois neste caso detectaria sua própria transmissão. Por isso uma das recomendações dadas pelo padrão IEEE 802.22 é que o tempo de detecção seja menor que dois segundos e tenha uma periodicidade de 30 segundos.

Existem diferentes algoritmos de detecção para o sensoriamento de espectro, entre elas o detector de energia e o detector de covariância absoluta.

2.4. Detector de Energia

Este tipo de detector é o mais usado em cenários reais devido a sua baixa complexidade. A partir de amostras do sinal recebido e de um teste de hipóteses binário, o usuário secundário decide o estado de ocupação do canal.

Para a tomada de decisão é utilizado o teste binário de hipóteses que equivale a subdividir o espaço de observação (n-dimensional) em duas regiões definidas por um limiar de decisão, como foi definido em [26] e pode-se observar na expressão 2-1:

$$x(k) = \begin{cases} n(k) & : H_0 \\ hs(k) + n(k) & : H_1 \end{cases} \quad k = 1 \dots N \quad (2 - 1)$$

onde $x(k)$ representa o sinal recebido pelo RC, $n(k)$ representa o ruído gaussiano branco com média zero e variância σ_n^2 , $s(k)$ simboliza a amostra do sinal do usuário primário transmitido e h é o ganho do canal observado. Este tipo de detector pode ser usado no domínio do tempo e da frequência e seu funcionamento é apresentado no diagrama de blocos na Figura 2.7. Na figura o sinal recebido passa pelo bloco FPB que representa o filtro passa banda, a saída do filtro $x(t)$ atravessa um conversor análogo/digital cuja saída $x(k)$ é a entrada do bloco que acumula os

sinais de cada usuário, obtendo o valor u que será avaliado no bloco de decisão para estabelecer a hipótese correspondente.

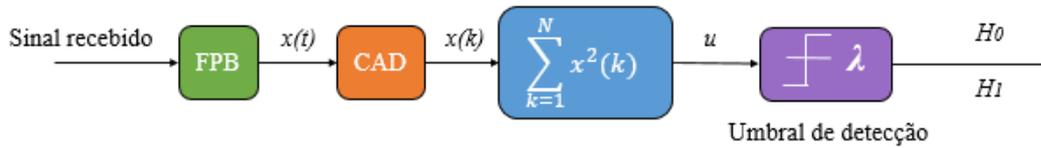


Figura 2.7: Diagrama de blocos detector de energia.

O detector de energia utiliza o teorema de Neyman-Pearson que define a estatística ou métrica do teste como a razão de verossimilhança (LRT) apresentada na expressão (2-2) e em [27].

$$u_{LRT} = \frac{p(\mathbf{x}|H_1)}{p(\mathbf{x}|H_0)} \quad (2 - 2)$$

De acordo com o teorema, a razão LRT é usada para maximizar a probabilidade de detecção para uma determinada taxa de falsa alarme uma vez são conhecidos a priori as distribuições de \mathbf{x} para H_0 e H_1 . Observando-se a expressão (2-1) é possível notar que a distribuição de \mathbf{x} para H_0 depende apenas da distribuição de ruído. Por outro lado a distribuição de \mathbf{x} para H_1 é relacionada ao canal sem fio, ao do sinal transmitido pelo UP e à distribuição de ruído.

Tendo em conta que para a realização deste trabalho foi considerado ruído gaussiano branco, e também considerando que quando o canal estiver ativo H_1 (ocupado) as amostras do sinal transmitido pelo UP serão independentes, e com seu ganho de canal constante (valor de um), desta forma é possível de (2-2) obter a expressão da função de densidade de \mathbf{x} para cada hipótese apresentadas nas expressões (2-3) e (2-4).

$$p(\mathbf{x}|H_0) = \prod_{k=1}^N p(x(k)|H_0) \quad (2 - 3)$$

$$p(\mathbf{x}|H_1) = \prod_{k=1}^N p(x(k)|H_1) \quad (2-4)$$

Considerando que as amostras de ruído são assumidas independentes e identicamente distribuídas com distribuição Gaussiana, o teste de verossimilhança converte-se no estimador correlator (EC), que usa a energia das amostras do sinal recebidos pelo RC para detectar alguma atividade dos UP's.

$$u = \mathbf{x}^T \mathbf{x} = \sum_{k=1}^N x^2(k) \quad (2-5)$$

É importante ressaltar que em geral um detector EC precisa da matriz de covariância entre o sinal fonte e o ruído, mas quando a presença do sinal do UP é desconhecida é impossível conhece-la, e por isso o sinal do UP é modelado como um processo Gaussiano aleatório com variáveis independentes e identicamente distribuídas.

No diagrama de blocos do detector é possível observar como o filtro passa banda remove os sinais que não estão na faixa desejada, que é centrado na frequência f_c e tem largura de banda W . O sinal $x(t)$ recebido depois do filtragem é digitalizado por um conversor análogo-digital e um simples dispositivo que eleva ao quadrado e permite obter a energia media contida nas N amostras de $x(k)$. A métrica de decisão é então comparada com um limiar de detecção λ para decidir se a banda está livre (H_0) ou se está ocupada (H_1)

O desempenho do detector de energia é caracterizado pela probabilidade de falso alarme e pela probabilidade de detecção, respectivamente, que são apresentadas em (2-6) e (2-7). Como o nome indica, o falso alarme é definido como a decisão de que o canal esteja ocupado quando ele na realidade encontra-se inativo. A probabilidade de detecção está associada à correta decisão sobre a ocupação do canal por um usuário primário transmitindo informação.

$$P_{fa} = P_r(\text{sinhal detectado}|H_0) = P_r(u > \lambda|H_0) = \int_{\lambda}^{\infty} f(u|H_0)du \quad (2 - 6)$$

$$P_d = P_r(\text{sinhal detectado}|H_1) = P_r(u > \lambda|H_1) = \int_{\lambda}^{\infty} f(u|H_1)du \quad (2 - 7)$$

3

Técnicas de sensoriamento em Redes cognitivas

O sensoriamento é a etapa mais importante nas redes cognitivas. Nesta etapa é realizada a análise do cenário e a tomada de decisão associada à ocupação do espectro. Uma boa decisão final vai permitir que as comunicações cognitivas consigam reduzir a subutilização do espectro, melhorando velocidade de transmissão de dados na rede e assim a eficiência espectral.

Existem dois tipos de esquemas para executar a decisão final, sendo o mais popular deles o esquema centralizado. Neste esquema tem-se uma unidade central conhecida como ponto de fusão (Fusion Center), que toma uma decisão final com base informações recebidas pelos usuários secundários da rede. Existem também esquemas distribuídos, nos quais não se tem um centro de fusão, e a decisão do estado é realizada a partir das detecções individuais que convergem numa decisão global que é tomada por cada RC com ajuda das informações recebidas que foram compartilhadas entre rádio cognitivos vizinhos.

3.1.

Esquema de decisão centralizado

Neste método conta-se com um nó central conhecido como centro de fusão, no qual são compiladas e processadas as informações a partir das quais será tomada a decisão referente aos níveis de ocupação da banda sensoriada. A vantagem da utilização deste esquema é que independente do número de usuários secundários utilizados, o processamento da informação no nó central pode ser mais rápido em comparação das redes distribuídas nas quais o processamento deve ser feito por cada um dos usuários secundários.

3.2. Esquema de decisão distribuído

Neste tipo de esquema, antes de cada transmissão cada RC deverá efetuar um sensoriamento espectral local (individual) para determinar se a banda de frequência de interesse se encontra disponível. Com ajuda da troca de informação entre usuários cada RC faz uma combinação de seus dados de sensoriamento com a informação de sensoriamento dos outros usuários e a decisão é tomada individualmente pelo mesmo RC como se fosse um centro de fusão individual.

Uma das suas vantagens é seu baixo custo de implementação, já que não precisa de uma infraestrutura com um nó central ao contrário do esquema centralizado. Entre suas desvantagens tem-se que cada usuário secundário deverá procurar outros usuários secundários próximos, o que vai implicar um maior tempo de sensoriamento e num maior número de iterações do algoritmo implementado. Além disso deverá ter um controle na largura de banda com relação ao intercâmbio de informação do estado do canal entre os diferentes usuários secundários.

3.3. Detecção convencional do espectro cooperativo

Para qualquer tipo de esquema, seja distribuído ou centralizado, é imprescindível um canal de controle para o enlace entre os RC e o centro de fusão ou entre os usuários secundários vizinhos, cuja largura de banda pode limitar o volume de dados sensorizados enviados. Se todos os usuários reportassem sua decisão ao centro de fusão ou a enviassem para vizinhos, o desempenho na detecção poderia levar a uma sobrecarga do canal de controle.

Existem dois casos dependendo da natureza da informação que chega ao nó central. O primeiro deles é aquele em que o centro de fusão leva em conta os bits de decisão u_k enviados a ele pelos usuários secundários. O segundo caso é o cenário onde os RC enviam sua decisão ao centro de fusão ou aos RC que tem interesse no estado do canal.

As duas diferentes regras na deliberação do estado do usuário primário e do canal apresentam-se nos esquemas distribuídos e centralizados. Cada uma delas será abordada nas subseções seguintes. Para isso é considerado um cenário com K

usuários secundários cognitivos que detectaram a existência de um usuário primário. Cada um desses usuários obtém N amostras do sinal recebido de maneira independente. Nesse sentido o problema é formulado como é expresso em (2.1).

3.3.1. Hard decision

No esquema hard decision os RC individuais decidem sobre a existência do usuário primário. O bit 1 indica que o usuário primário está utilizando o espectro de canal, e por isso o RC não pode fazer uso dele. Quando o bit é 0 o espectro é disponível e pode ser utilizado pelo rádio.

REGRA DA MAIORIA: A regra mais conhecida é a regra de contagem (counting rule) onde tem-se um número de usuários N que enviam a decisão da detecção local do estado do canal através de um bit de informação u_k ao centro de fusão para que a decisão seja feita através da combinação linear das diferentes decisões tomadas por cada usuário secundário, a regra de decisão é definida em (3-1).

$$D = \sum_{k=1}^K u_k \quad (3 - 1)$$

Se $D \geq M$ o centro de fusão decide por H_1 o que significa que o canal do transmissor primário está ativo, no caso contrário $D < M$ decide-se por H_0 .

A regra da maioria é um caso especial da regra de contagem, onde $M=K/2$.

Cada usuário secundário tem uma probabilidade de detecção e falso alarme, apresentadas para cada usuário nas equações (3-2) e (3-3), respectivamente.

$$Q_{FA} = P(D \geq M) = \prod_{i=1}^N (P_{FA,i})^i (1 - P_{FA,i})^{N-i} \quad (3 - 2)$$

$$Q_D = P(D \geq M) = \prod_{i=1}^N (P_{D,i})^i (1 - P_{D,i})^{N-i} \quad (3-3)$$

A partir da regra de fusão é possível obter duas novas regras que serão apresentadas a continuação.

REGRA AND: A regra funciona tomando em conta o bit de decisão de cada um dos usuários secundários, este bit que faz referência ao estado de canal. O centro de fusão vai escolher a hipóteses H_1 se todos os $k=N$ usuários detectam o sinal, é dizer o bit de decisão do UP vai ser $u_k=1$ na banda de interesse seleccionada para todos os usuários, caso contrário, se o bit de decisão no UP é $u_k=0$ e a hipóteses escolhida é H_0 . As probabilidades são calculadas utilizando as expressões (3-4) e (3-5) para probabilidade de falso alarme e a probabilidade de detecção respectivamente.

$$Q_{FA} = \prod_{n=1}^N P_{FA,n} \quad (3-4)$$

$$Q_D = \prod_{n=1}^N P_{D,n} \quad (3-5)$$

Dado o caso que as probabilidades sejam iguais para todos os usuários é possível definir as probabilidades de falso alarme e de detecção como é exposto nas equações (3-6) e (3-7).

$$Q_{FA} = (P_{FA})^N \quad (3-6)$$

$$Q_D = (P_D)^N \quad (3-7)$$

REGRA OR: A regra é válida se pelo menos um único usuário do conjunto, detecta a presença do sinal do UP na banda de interesse. As probabilidades de falso alarme e detecção são estabelecidas pelas expressões (3-8) e (3-9), respectivamente.

$$Q_{FA} = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{FA,n}) \quad (3-8)$$

$$Q_D = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{D,n}) \quad (3-9)$$

Para o caso que as probabilidades dos usuários sejam iguais, tem-se:

$$Q_{FA} = 1 - (1 - P_{FA})^N \quad (3-10)$$

$$Q_D = 1 - (1 - P_D)^N \quad (3-11)$$

3.3.2. Soft decision

Nesta categoria de regras, os usuários secundários enviam o resultado do teste estatístico U_k ao centro de fusão sem realizar nenhum procedimento ou análise prévia. A informação recebida no centro de fusão será processada e comparada com um limiar estabelecido pelos usuários secundários permitindo a decisão da presença ou ausência da atividade do usuário primário.

Com relação ao procedimento realizado nos dados no centro de fusão existem quatro tipos de procedimentos de Soft decision, que serão abordados a seguir.

SELECTION COMBINING (SC): A abordagem SC estabelece que o centro de fusão seleciona o ramo com maior SNR. Como é representado na equação (3-12), onde γ_k representa o SNR para cada um dos ramos e γ_{SC} é o SNR escolhido [28].

$$\gamma_{SC} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_K) \quad (3-12)$$

Para canais AWGN, as probabilidades de detecção e falsa alarme são definidas respectivamente nas equações (3-13) e (3-14).

$$Q_{D,SC} = Q_m(\sqrt{2\gamma_{SC}}, \sqrt{\lambda}) \quad (3-13)$$

$$Q_{FA,SC} = \frac{\Gamma(m, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(m)} \quad (3-14)$$

Onde $Q_m(.,.)$ representa a função generalizada de Marcum, $\Gamma(.)$ e $\Gamma(.,.)$, representam as funções Gamma completa e incompleta respectivamente, λ é o limiar predefinido pelo usuário e m é o produto do tempo e a largura de banda $m=TW$.

SQUARE LAW SELECTION (SLS): A abordagem SLS estabelece que cada usuário secundário vai selecionar a antena com a maior potência ou energia recebida para determinar o estado de ocupação do canal [28].

$$E_{SLS} = \max(E_1, E_2, \dots, E_K) \quad (3-15)$$

As probabilidades de detecção e falso alarme do método são caracterizadas em (3-16) e (3-17).

$$Q_{D,SLS} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - Q_{D,i}) \quad (3-16)$$

$$Q_{FA,SLS} = 1 - (1 - P_{FA,i})^N \quad (3-17)$$

Tendo em conta que:

$$Q_{D,i} = Q_m(\sqrt{2m\gamma_i}, \frac{\sqrt{\lambda}}{\sigma_w}) \quad (3-18)$$

$$Q_{FA,i} = \frac{\Gamma(m, \frac{\lambda}{2\sigma_w^2})}{\Gamma(m)} \quad (3-19)$$

E γ_i é o SNR do usuário com maior energia.

SQUARE LAW COMBINING (SLC): Nesta regra de fusão cada rádio cognitivo estima a potência ou energia individual recebida em cada usuário secundário e esta informação será enviada ao centro que fusão que realizará a soma definida na expressão (3-12) e em [28]. Posteriormente o resultado obtido será comparado com o limiar de detecção e o resultado permitirá concluir a ocupação do canal sensoriado.

$$E_{SLC} = \sum_{k=1}^K E_k \quad (3 - 20)$$

onde E_{SLC} é a combinação das energias dos diferentes k radio cognitivos.

A probabilidade de detecção e de falso alarme para SLC é apresentado nas expressões (3-13) e (3-14) respectivamente.

$$Q_{D,SLC} = Q_m(\sqrt{2\gamma_{SLC}}, \sqrt{\lambda}) \quad (3 - 21)$$

$$Q_{FA,SLC} = \frac{\Gamma\left(mK, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(mK)} \quad (3 - 22)$$

O SNR combinado por todos os usuários é definido em (3-15).

$$\gamma_{SLC} = \sum_{k=1}^K \gamma_k \quad (3 - 23)$$

Onde γ_k representa o SNR de cada um dos usuários.

MAXIMUM RATIO COMBINING (MRC): Neste tipo de regra em cada estimativa de potência ou energia do sinal recebido de cada usuário secundário é

atribuído um peso $w_k = \frac{\gamma_k}{1+\gamma_k}$ onde γ_k é o SNR de cada um dos usuários. Os rádios cognitivos que contam com maior SNR, portanto, recebem um maior peso. No centro de fusão é realizada a combinação dos pesos e as energias dos usuários para obter o teste estatístico que será utilizado na comparação com o limiar de detecção, aquela combinação é apresentada na expressão (3-16) e em [28].

$$E_{MRC} = \sum_{k=1}^K w_k E_k \quad (3 - 24)$$

As probabilidades de detecção e falso alarme para MRC são apresentadas nas expressões (3-17) e (3-18).

$$Q_{D,MRC} = Q_m(\sqrt{2\gamma_{MRC}}, \sqrt{\lambda}) \quad (3 - 25)$$

$$Q_{FA,MRC} = \frac{\Gamma\left(mK, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(m)} \quad (3 - 26)$$

A relação sinal ruído do método é definida em (3-19).

$$\gamma_{MRC} = \sum_{k=1}^K \gamma_k \quad (3 - 27)$$

4

Avaliação das regras de sensoriamento cooperativo em cenários reais

Neste capítulo são apresentados e comparados os resultados teóricos e simulados obtidos na avaliação de desempenho das diferentes regras de sensoriamento cooperativo, isto é, regras de fusão do tipo *Hard* e do tipo *Soft* descritas no Capítulo 3.

O cenário proposto está ilustrado na Figura 4.1, onde se tem uma distribuição uniforme de US numa área de $4000 \times 4000 \text{ m}^2$ atendida por um UP cuja antena opera com 42 metros na frequência de 3.5 GHz. Outros parâmetros necessários na obtenção dos resultados apresentados neste capítulo são listados na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2.

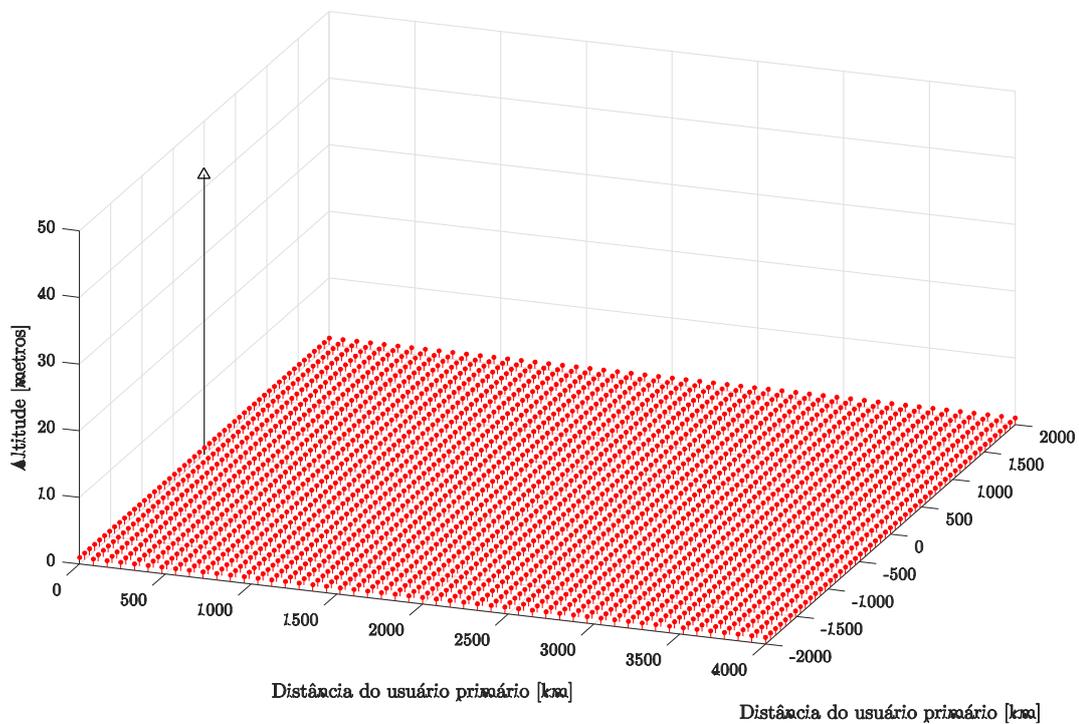


Figura 4.1: Cenário de sensoriamento de Rádio Cognitivo.

4.1. Parâmetros utilizados

Nesta seção descreve-se os parâmetros técnicos necessários para obter os resultados numéricos apresentados neste capítulo.

4.1.1. Parâmetros do usuário primário

Tabela 4.1: Parâmetros de enlace da Estação Rádio Base do usuário primário

Parâmetro	Valor
Potência de transmissão [dBW]	-13.8
Ganho máximo da antena [dBi]	15
Frequência de transmissão [GHz]	3.5
Largura de Banda [MHz]	1.7
Altura da antena [metros]	42
Elevação da antena [graus]	-2
Padrão de Radiação, azimute (90°)	Rec. ITU-R F.1336
Padrão de Radiação, elevação	Rec. ITU-R F.1336
Perda de alimentador [dB]	0

O diagrama de radiação considerado nas simulações é o padrão de radiação na Recomendação ITU-R F.1336, mais especificamente, o diagrama setorial com 90° de abertura no azimute (ver Figura 4.2) e 7° na elevação (ver Figura 4.3), respectivamente.

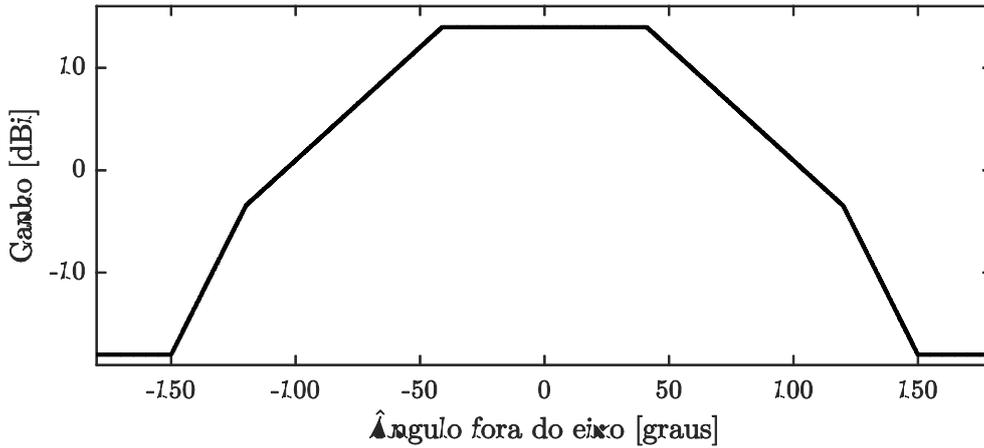


Figura 4.2: Diagrama de radiação em Azimuth do usuário primário.

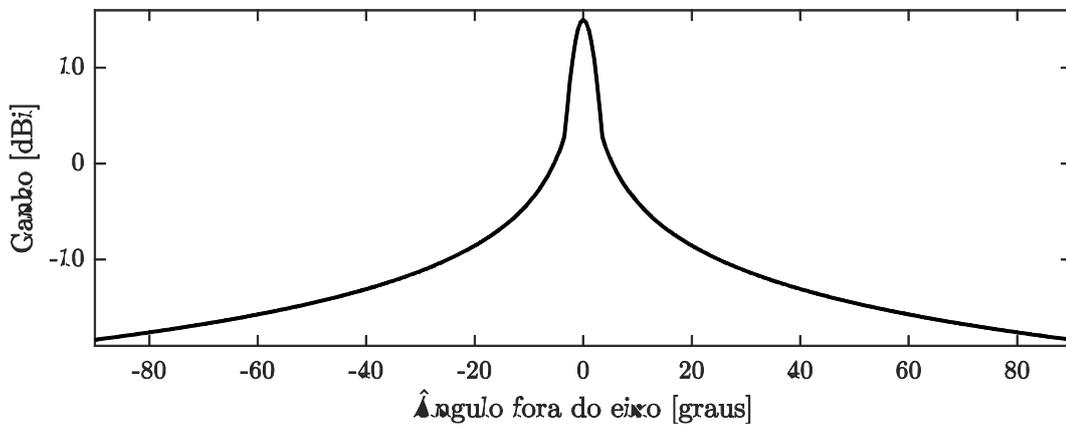


Figura 4.3: Diagrama de radiação em Elevação do usuário primário.

4.1.2. Parâmetros dos usuários secundários

Os parâmetros técnicos dos sensores dos usuários secundários são os descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros técnicos dos sensores

Parâmetro	Valor
Densidade espectral de ruído [dB(W/MHz)]	-150
Ganho máximo da antena [dBi]	25
Frequência de recepção [GHz]	3.5
Largura de Banda [MHz]	1.7
Altura da antena [metros]	1
Padrão de Radiação	Isotrópica
Perda de alimentador [dB]	0

4.2. Cálculo do SNR e mapa de valores de referência

Baseado nos parâmetros listados na Seção 4.1, o cálculo de SNR é feito considerando a relação (4-1).

$$SNR_{dB} = P_{T_x} + G_{T_x} + L_{FSL} + G_{R_x} - N_{0,dB} \quad (4 - 1)$$

onde P_{T_x} é a densidade de potência transmitida pelo usuário primário em dBW/MHz, G_{T_x} o ganho de sua antena em dBi, L_{FSL} a perda no espaço livre no percurso da antena do usuário primário até o receptor do usuário secundário em dB, G_{R_x} é o ganho da antena receptora do usuário secundário em dBi e finalmente $N_{0,dB}$ é a densidade espectral de potência de ruído do receptor.

Na Figura 4.4 observa-se o valor da razão sinal-ruído térmico (SNR) correspondente para cada US da Figura 4.1. sem considerar o efeito do ruído do canal.

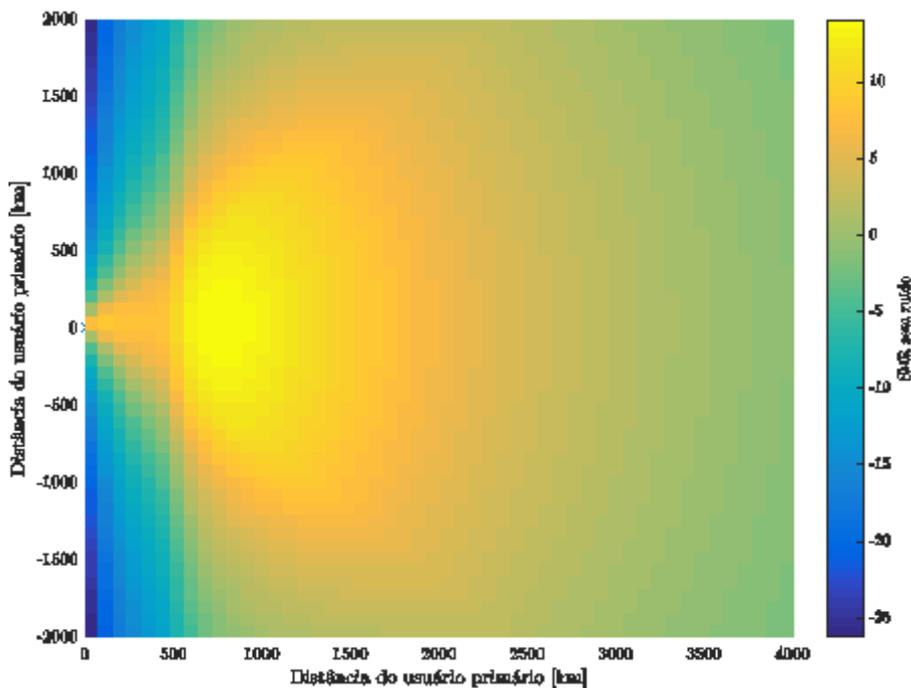


Figura 4.4: Razão SNR para cada US.

A Figura 4.5, ilustra (em amarelo) os US com densidade de potência detectável para os sensores dos usuários secundários, sem considerar o efeito do ruído do canal.

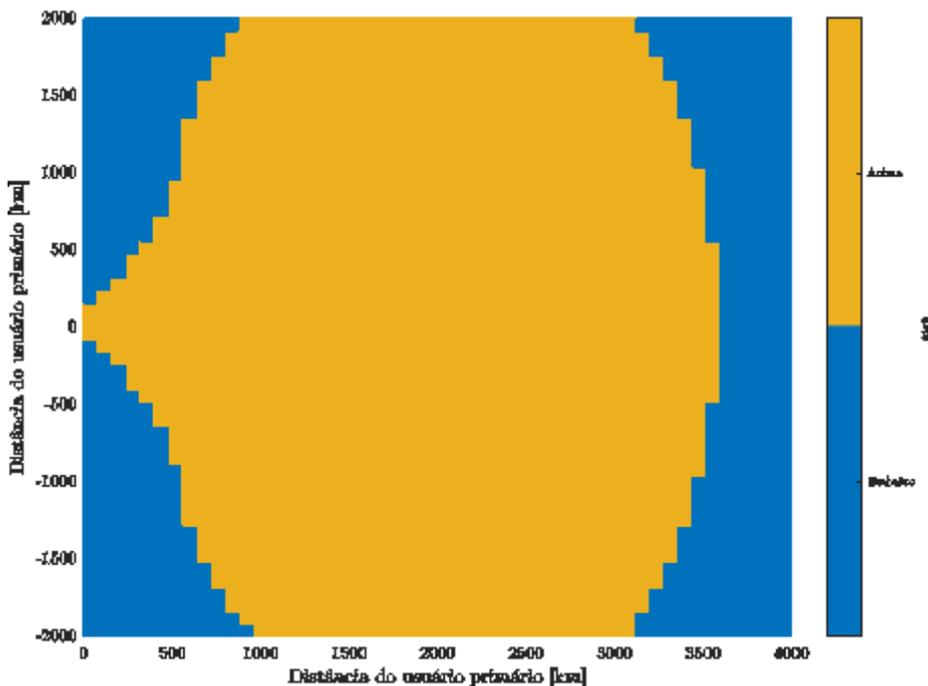


Figura 4.5: US com níveis detectáveis ideais.

Uma vez considerado o efeito do ruído no canal de transmissão (canal AWGN com media nula e variância σ_n^2 , $N(0,1)$) as Figuras 4.4 e 4.5 não são mais determinísticas, tornando-se valores aleatórios. Uma ilustração desta aleatoriedade é mostrada nas Figuras 4.6 e 4.7.

A Figura 4.7 ilustra ainda como os sensores dos usuários secundários são afetados. Em vermelho os sensores de US, que detectam um nível maior de SNR, ou seja, *falso alarme* e em azul claro aqueles que deveriam, mas não conseguem detectar o sinal, ou seja *miss-detection*.

Os resultados teóricos em [23], [24] e [25], mostram resultados com valores de SNR semelhantes aos resultados aqui apresentados, considerando as mesmas suposições.

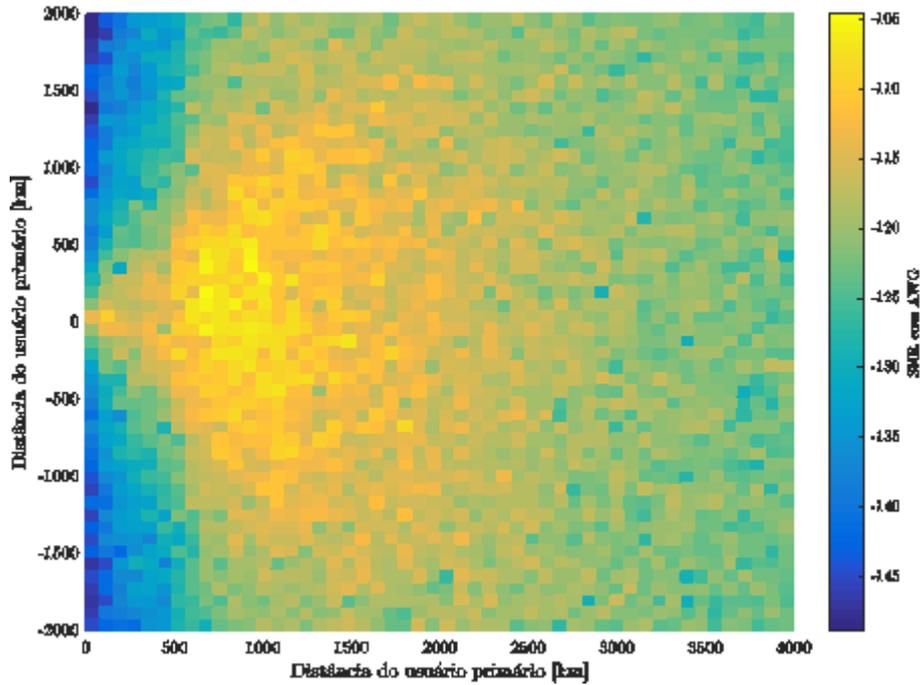


Figura 4.6: Efeito da aleatoriedade do canal.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1513127/CA

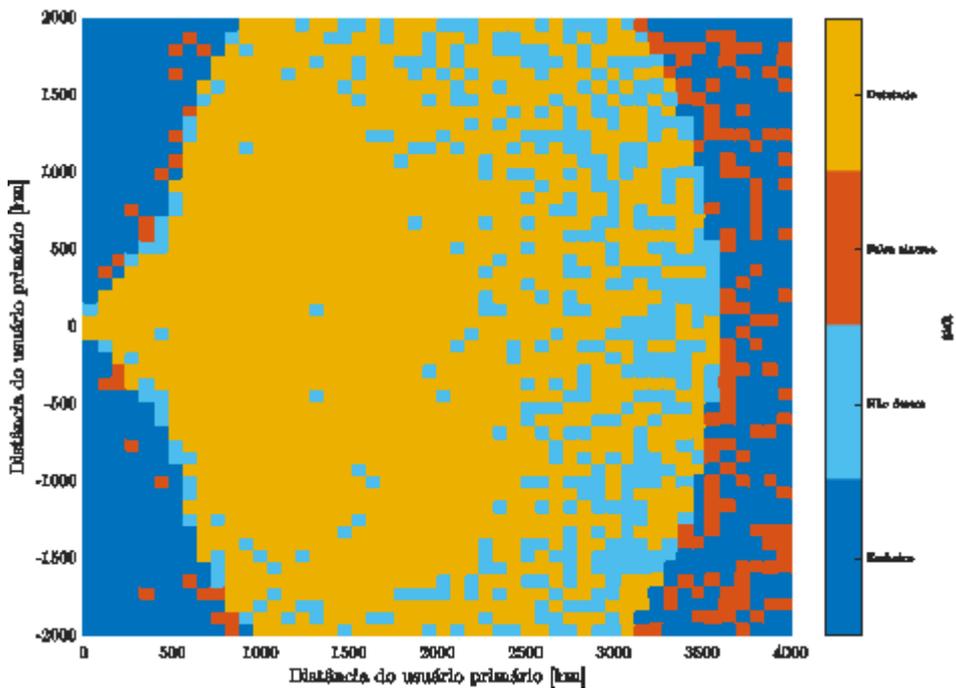


Figura 4.7: Níveis detectáveis considerando-se o efeito do canal.

A Figura 4.8 ilustra a posição de 6 usuários com valores de SNR=0 dB, a Figura 4.9 ilustra 6 usuários com valores próximos de SNR=5 dB e finalmente a Figura 4.10 ilustra 6 usuários com valores aproximados de SNR=10 dB.

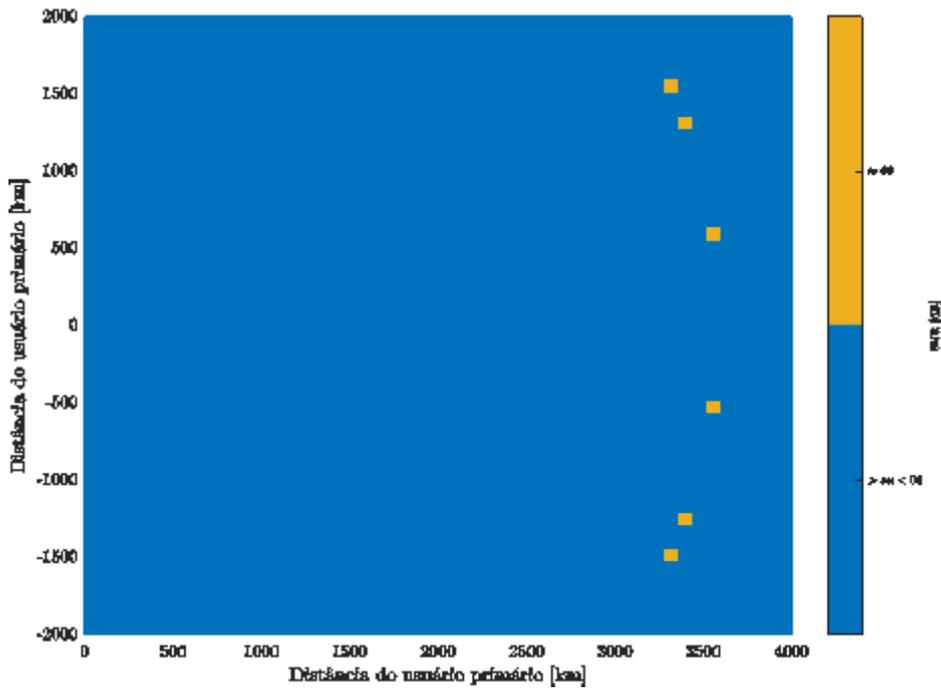


Figura 4.8: US com SNR aproximado de 0dB.

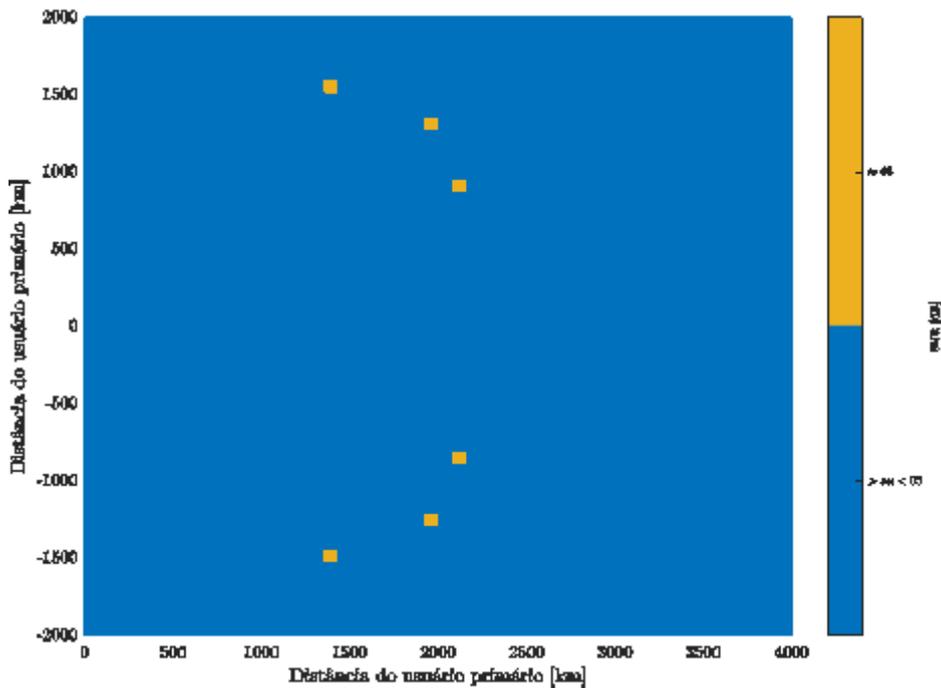


Figura 4.9: US com SNR aproximado de 5dB.

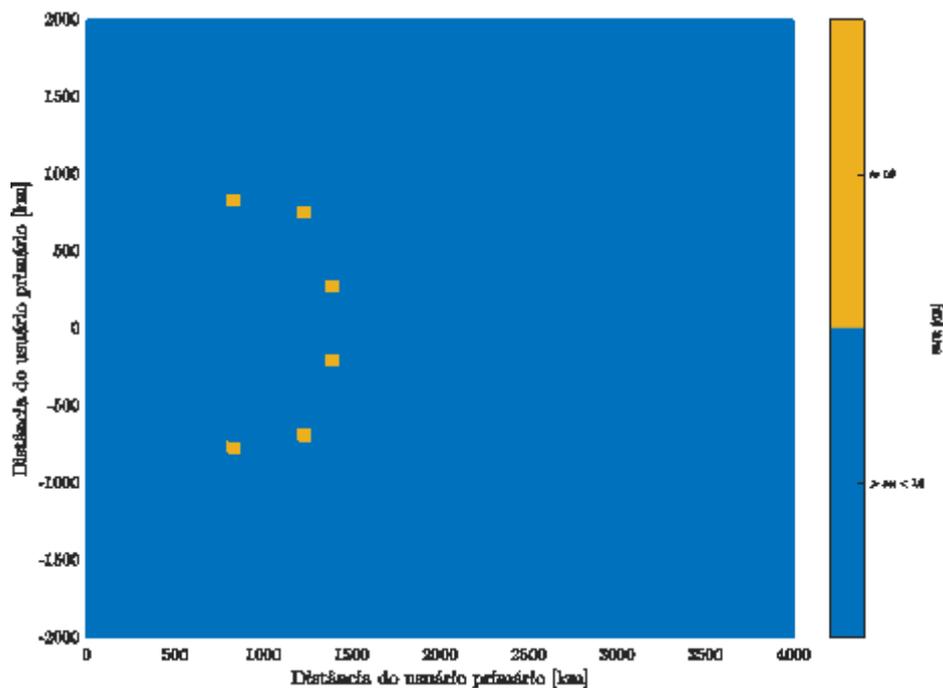


Figura 4.10: US com SNR aproximado de 10dB.

Em um outro cenário mais realista, é considerado que os sensores dos usuários secundários estão submetidos a diferentes níveis de valores de SNR, primeiramente considera-se uma variação de 2dB, e depois uma variação de 5dB.

As distribuições dos níveis de SNR são considerados iguais àqueles resultantes da Figura 4.4. As distribuições de probabilidade para as variações de 2dB são ilustradas nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

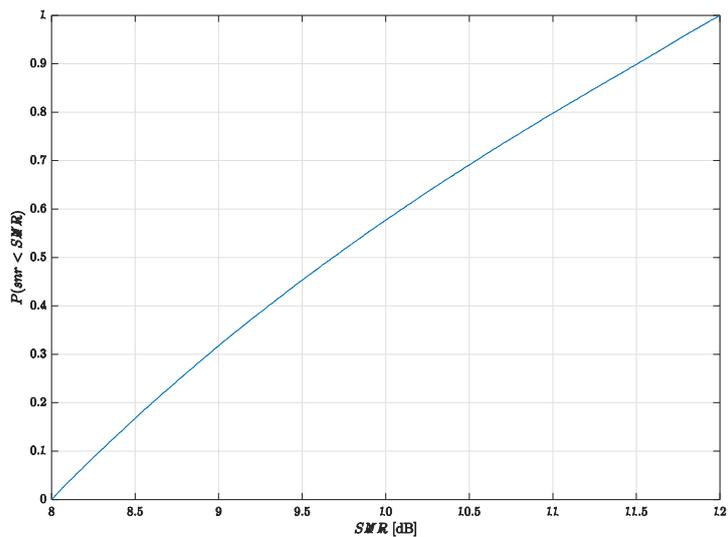


Figura 4.11: US com SNR aproximado de 10dB (variações de 2dB).

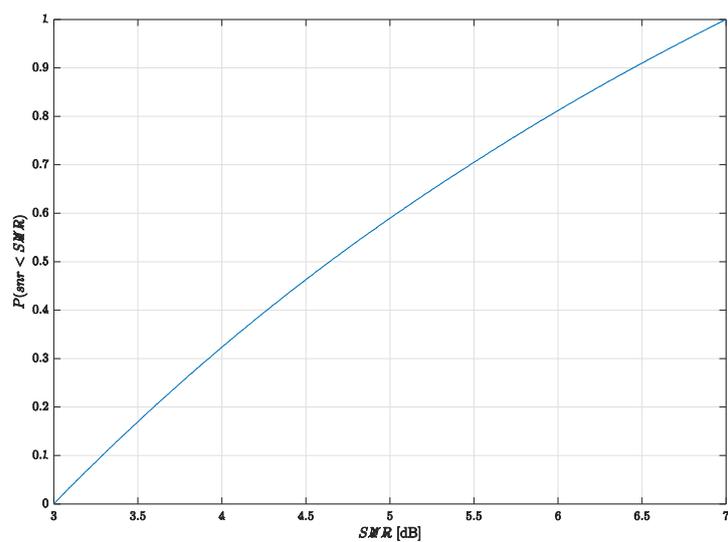


Figura 4.12: US com SNR aproximado de 5dB (variações de 2dB).

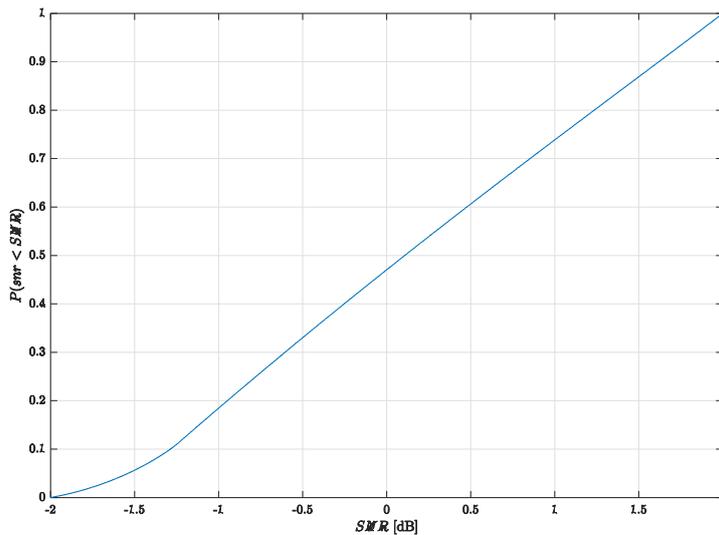


Figura 4.13: US com SNR aproximado de 0dB (variações de 2dB).

Quando são consideradas as variações de 5dB as distribuições são aquelas ilustradas nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

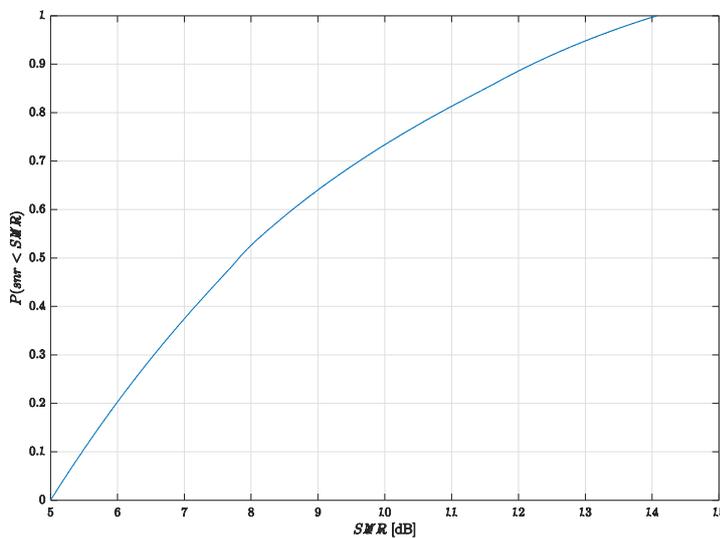


Figura 4.14: US com SNR aproximado de 10dB (variações de 5dB).

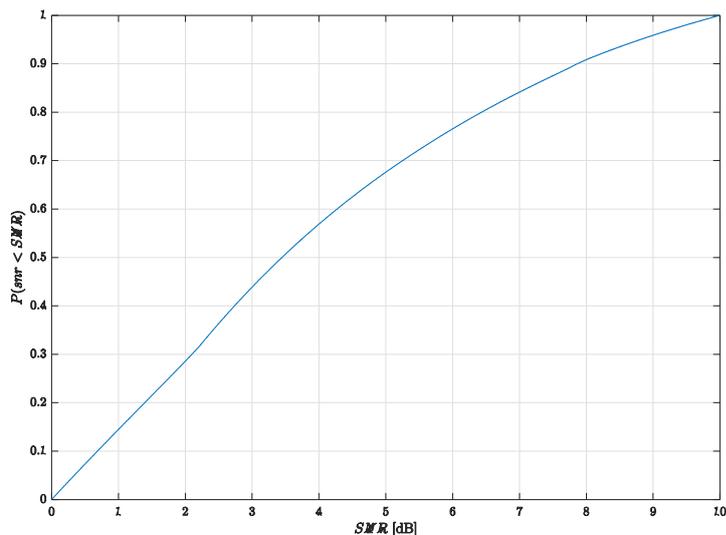


Figura 4.15: US com SNR aproximado de 5dB (variações de 5dB).

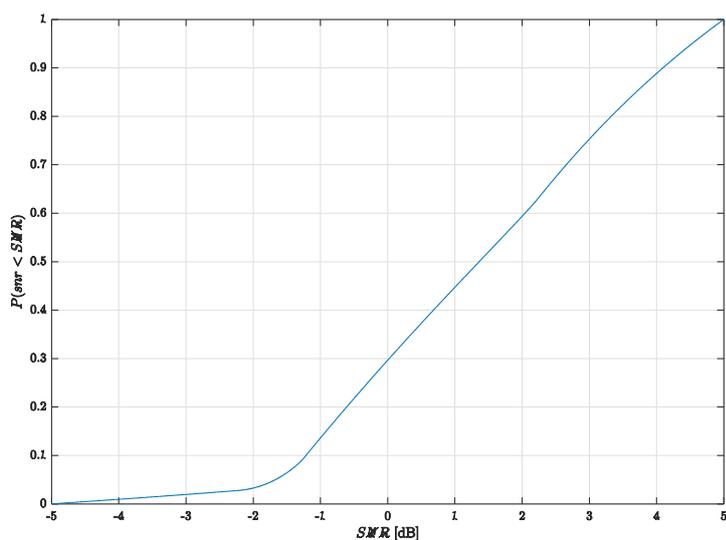


Figura 4.16: US com SNR aproximado de 0dB (variações de 5dB).

Na Seção 4.3 apresentam-se resultados com as distribuições de SNR para os US anteriormente descritas, tanto para simulações quanto os resultados teóricos, quando são considerados os decisores cooperativos do tipo *HARD*. Na Seção 4.4 estão comparados os resultados com o decisor do tipo *SOFT*.

4.3. Resultados *Hard*

Nesta seção são comparados os resultados com decisores do tipo *HARD* teóricos e simulados, quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB.

Nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 pode observar-se a comparação do desempenho do decisor *HARD-AND* quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB, respectivamente.

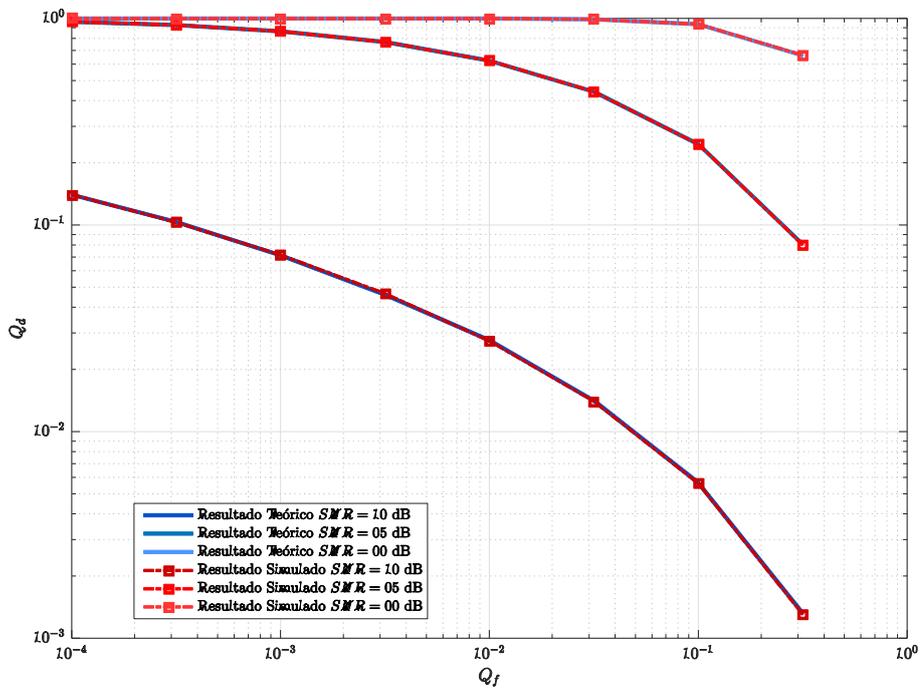


Figura 4.17: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR=0,5,10 dB com decisor HARD AND

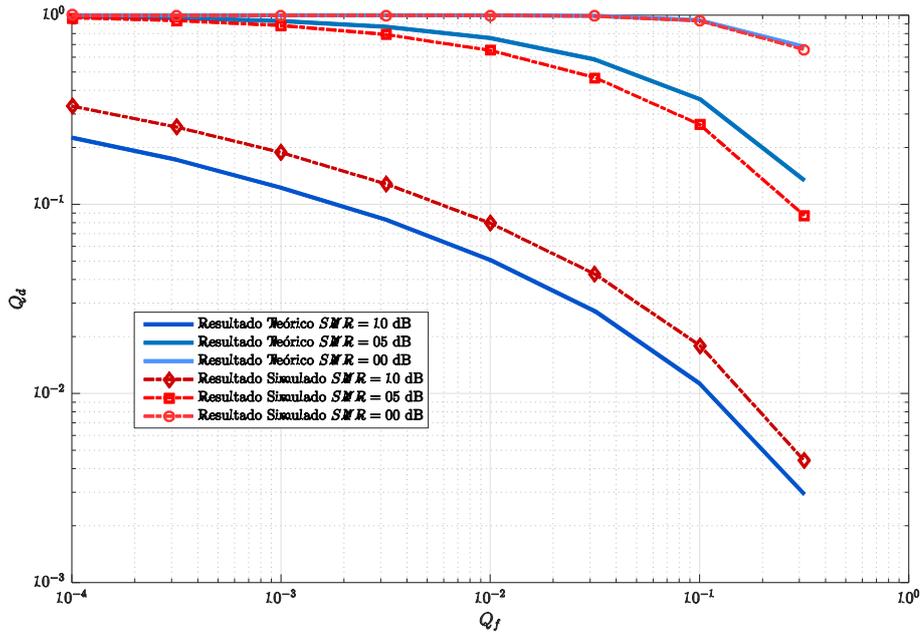


Figura 4.18: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR variável e com decisor HARD AND considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2Db.

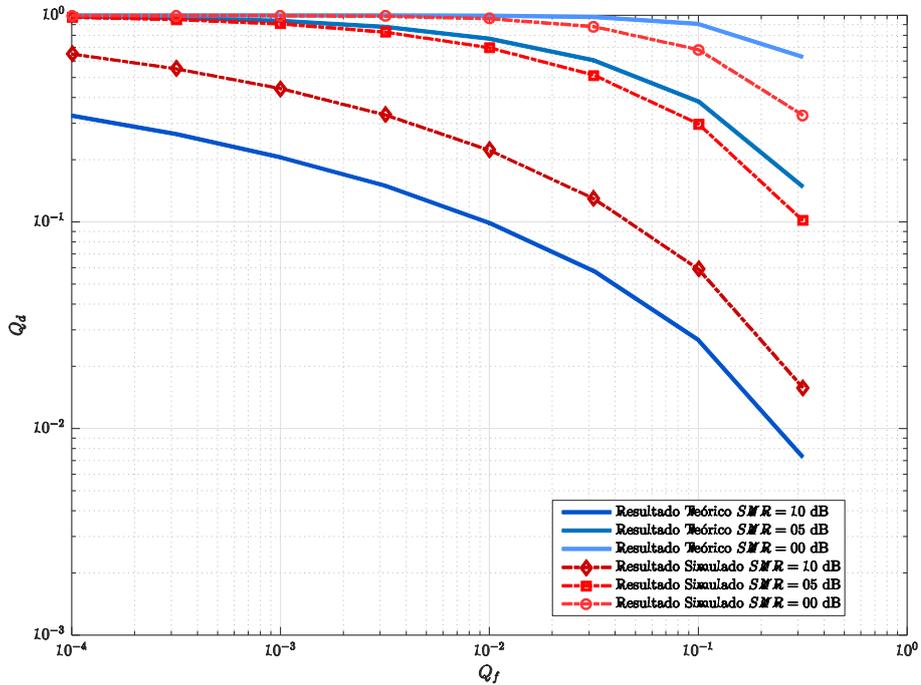


Figura 4.19: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR variável e com decisor HARD AND considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.

Nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 pode observar-se a comparação do decisor *HARD-OR* quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB, respectivamente.

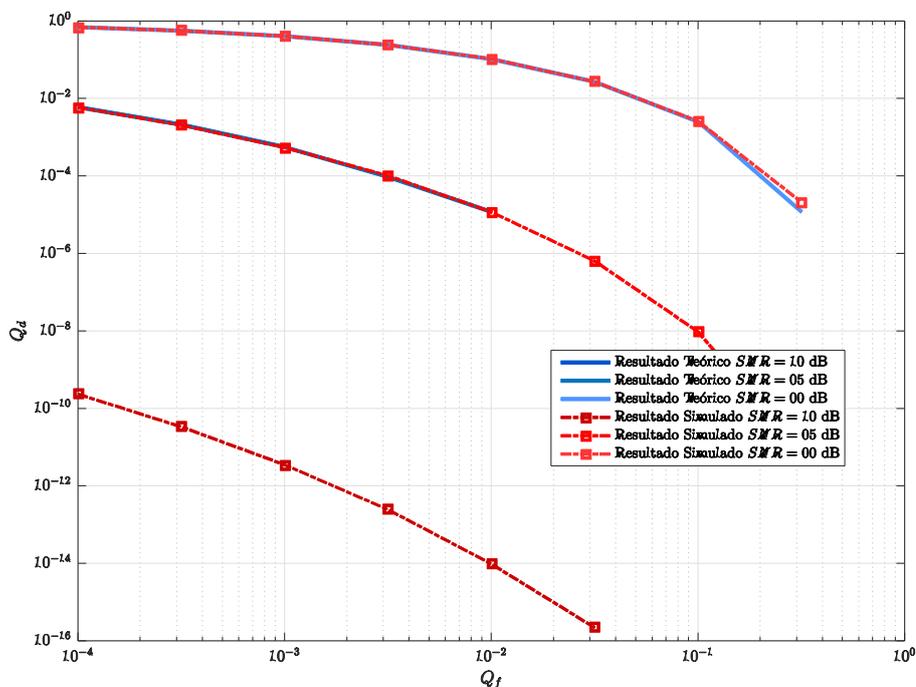


Figura 4.20: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor HARD OR.

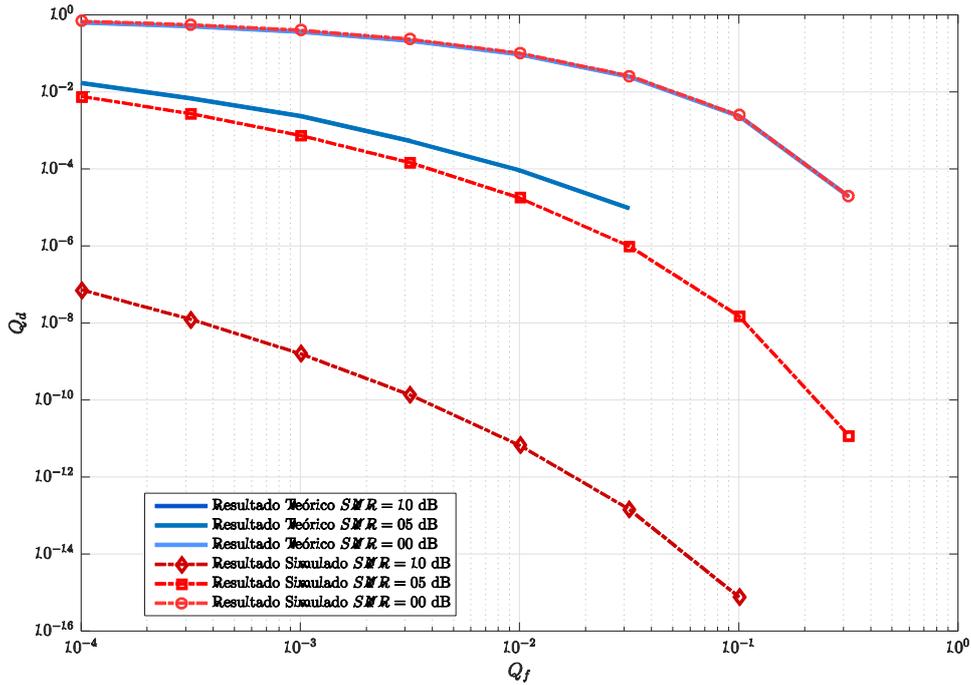


Figura 4.21: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor HARD OR considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.

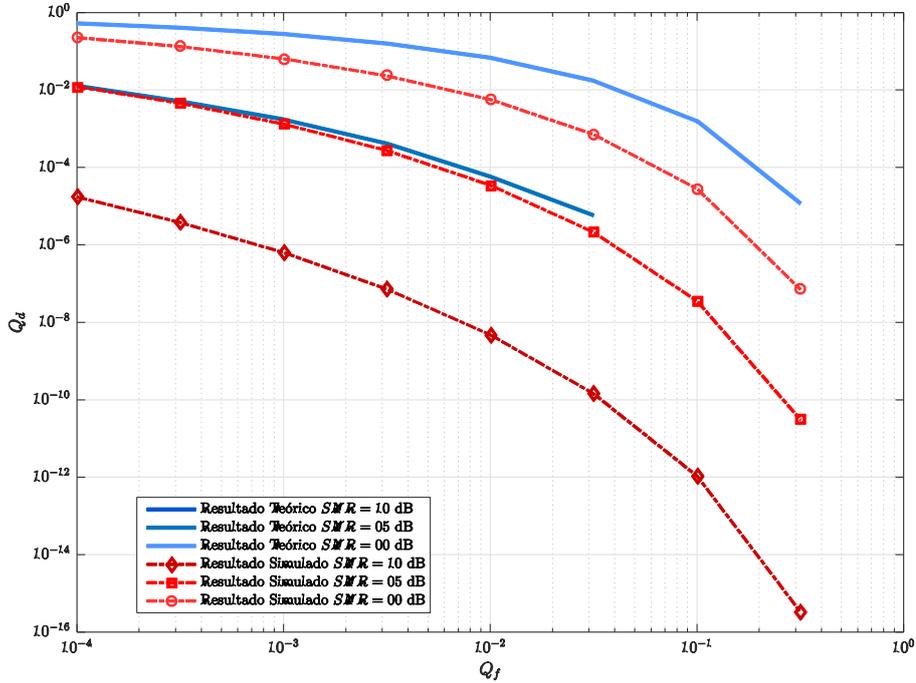


Figura 4.22: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor HARD OR considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.

Nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 pode observar-se a comparação do decisor *HARD-Majority* quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB, respectivamente.

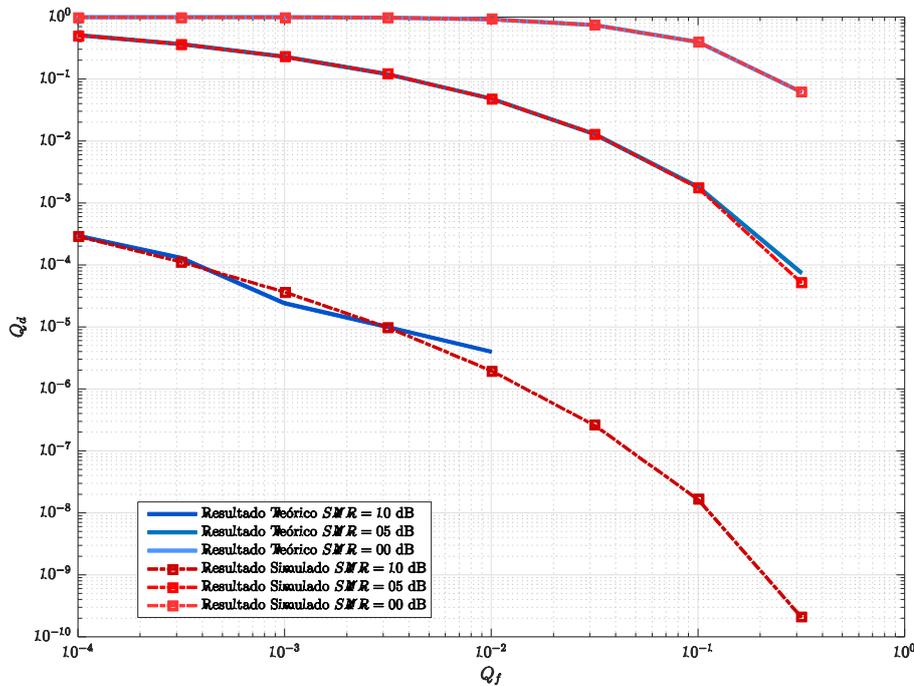


Figura 4.23: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Majority*.

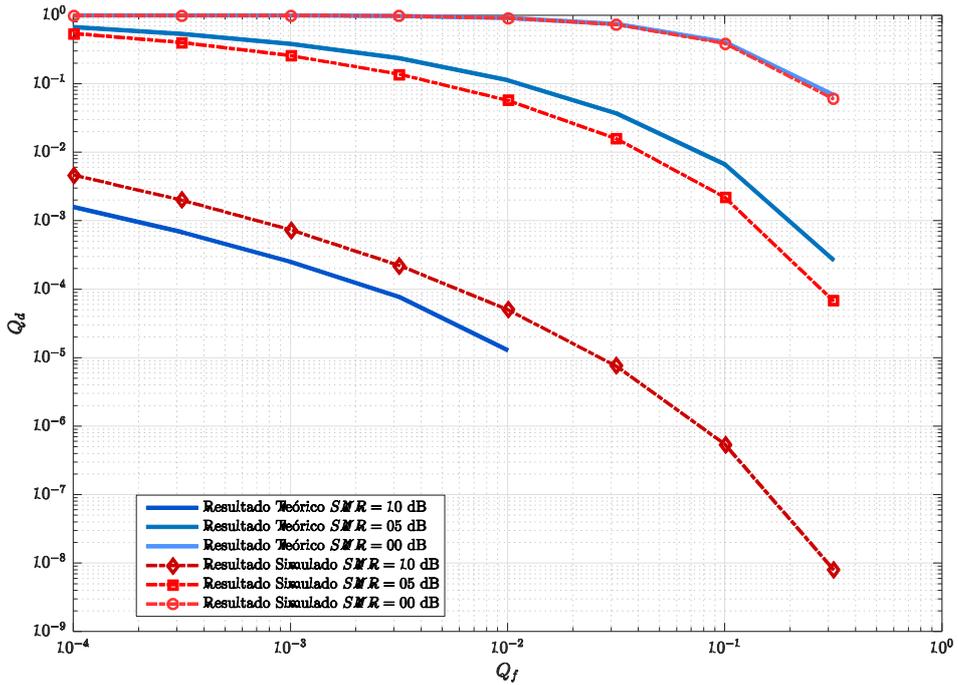


Figura 4.24: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Majority* considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1513127/CA

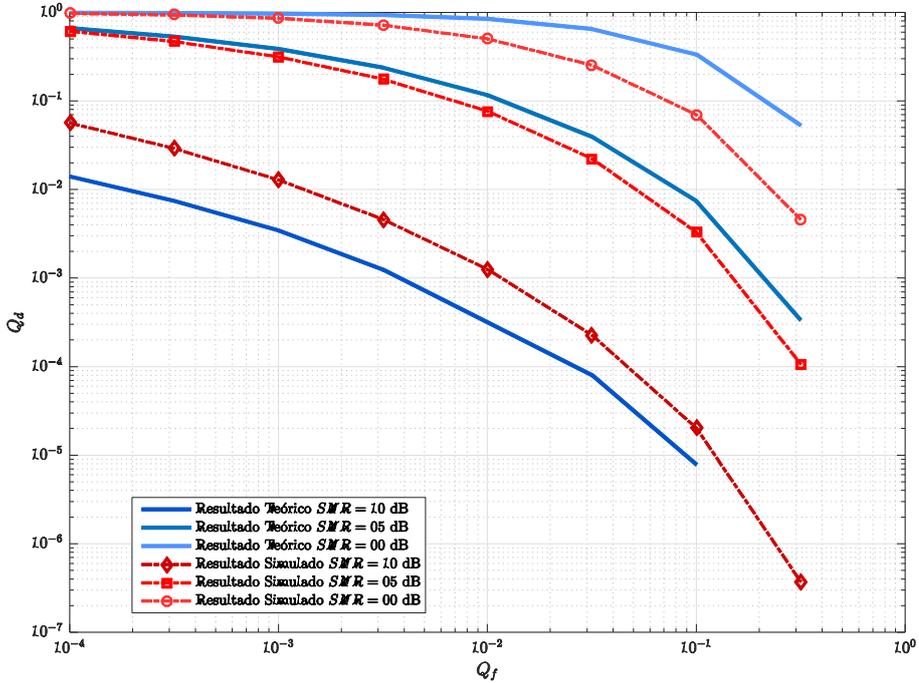


Figura 4.25: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Majority* considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.

4.4. Resultados Soft

Nesta seção são comparados os resultados com decisores do tipo *SOFT* teóricos e simulados, quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB, respectivamente.

Nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28 pode observar-se a comparação do decisor *SOFT-SLC* quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB, respectivamente.

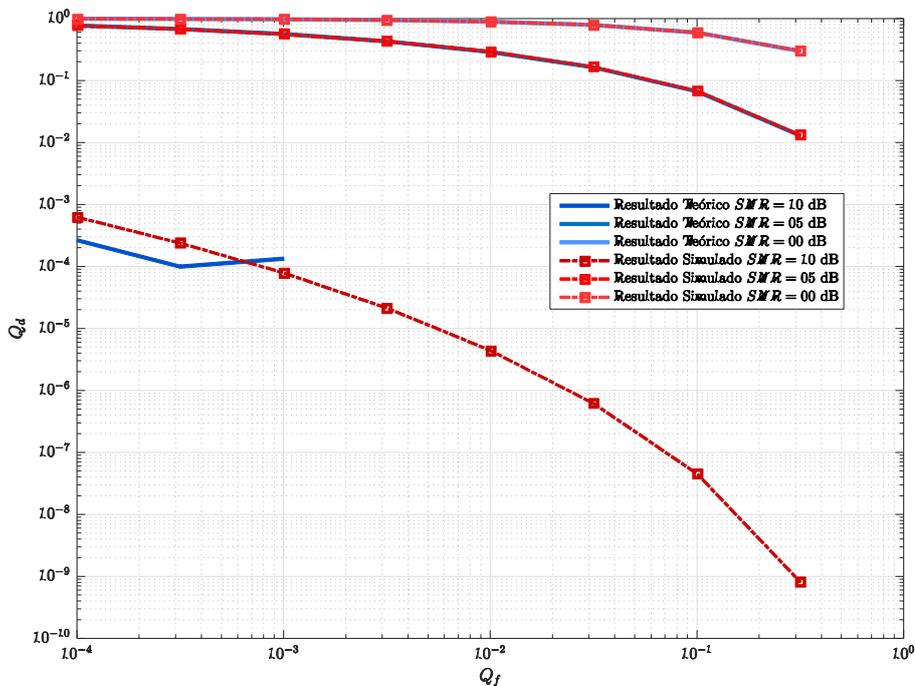


Figura 4.26: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Soft SLC*.

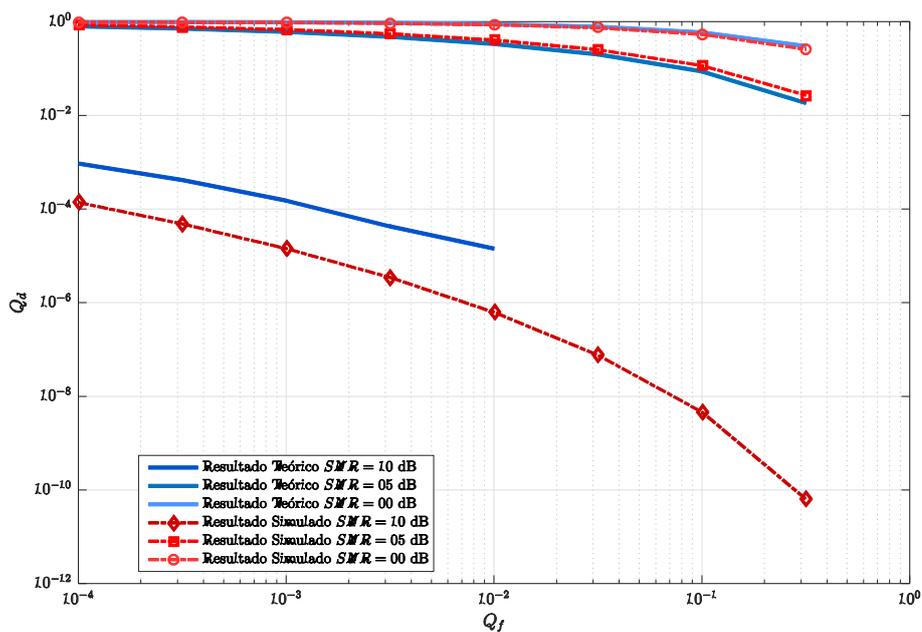


Figura 4.27: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor Soft SLC considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.

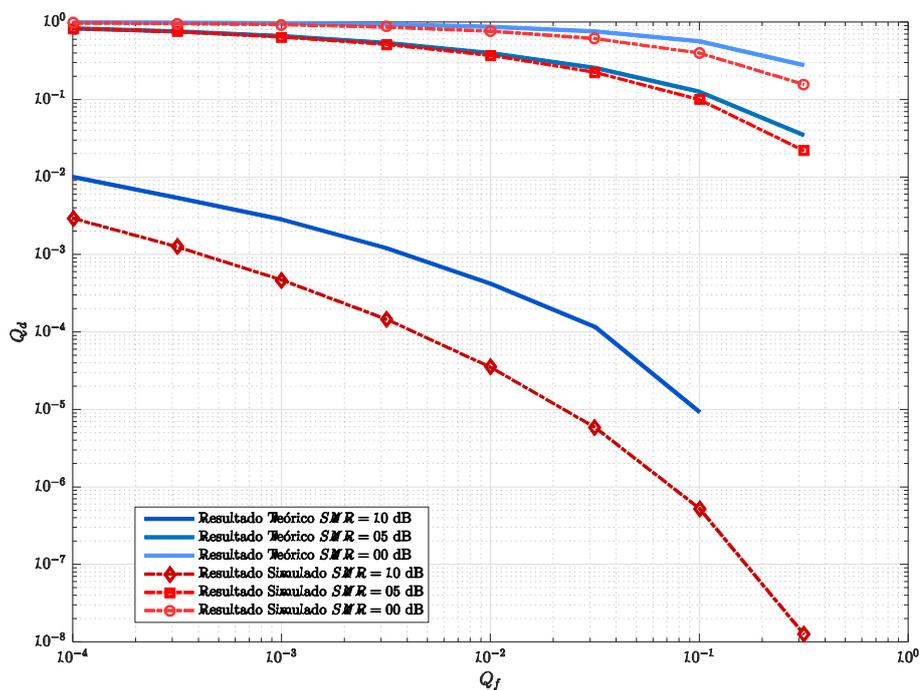


Figura 4.28: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor Soft SLC considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.

Nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 pode observar-se a comparação do decisor *SOFT-SC* quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB, respectivamente.

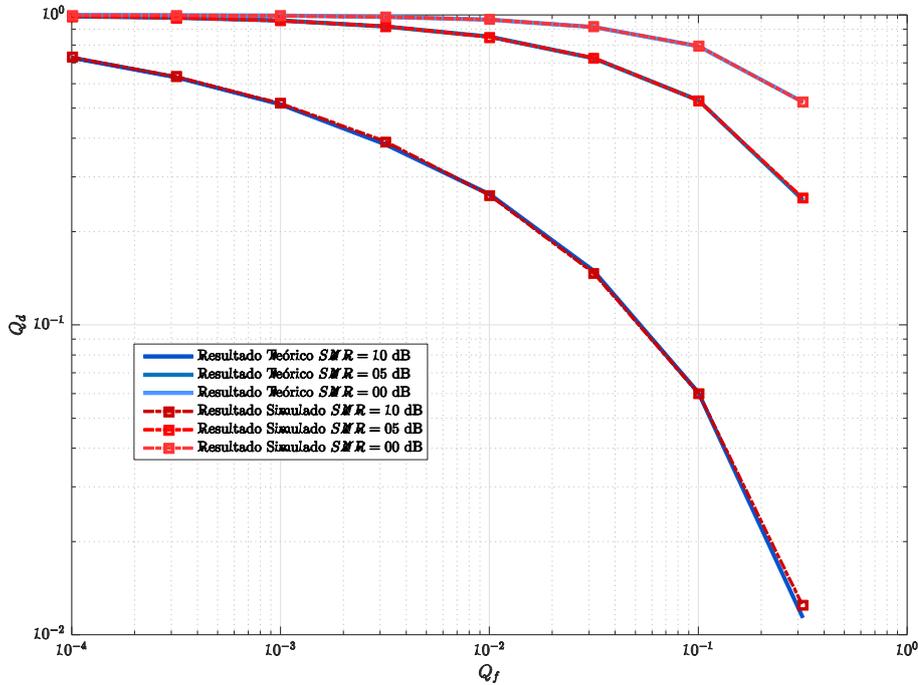


Figura 4.29: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Soft SC*.

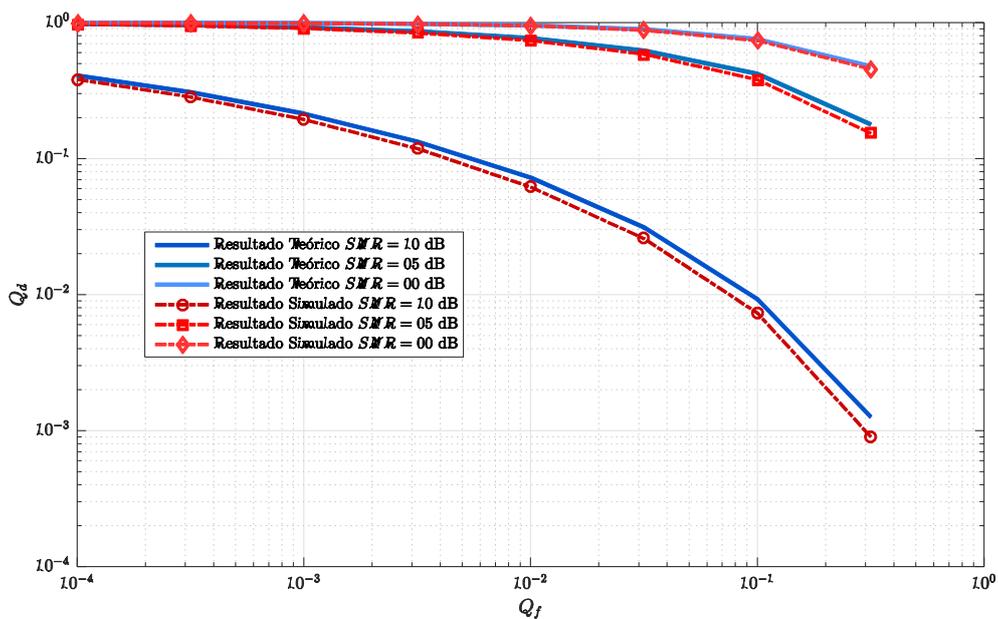


Figura 4.30: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Soft SC* considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.

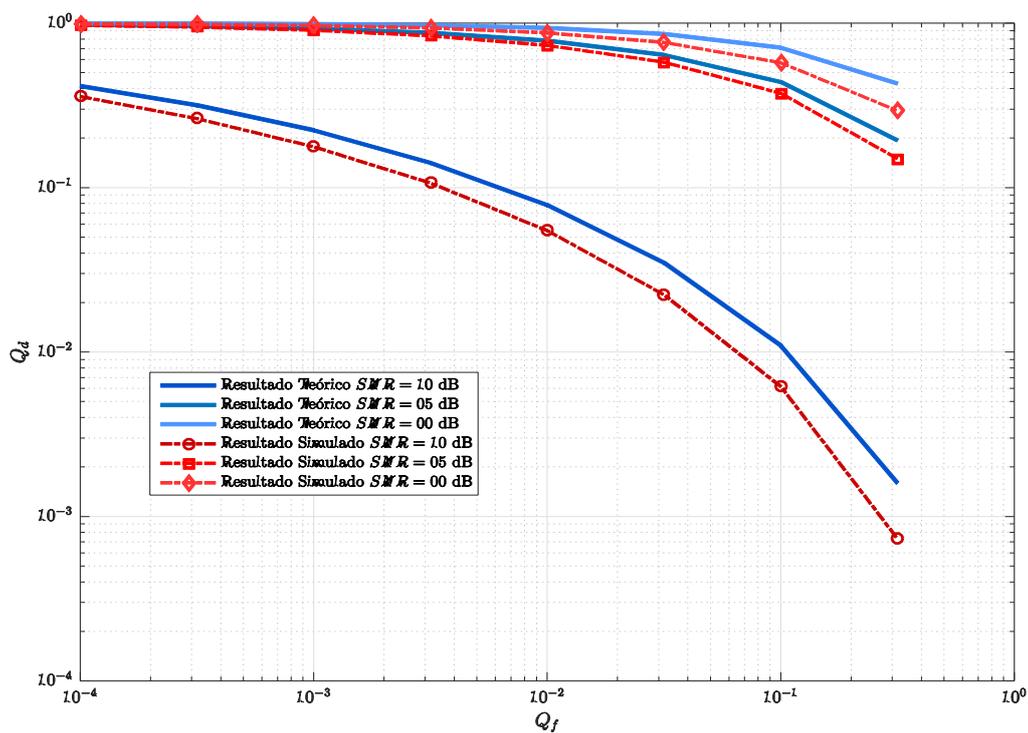


Figura 4.31: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Soft SC* considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.

Nas Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 pode observar-se a comparação do decisor *SOFT-MRC* quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB, respectivamente.

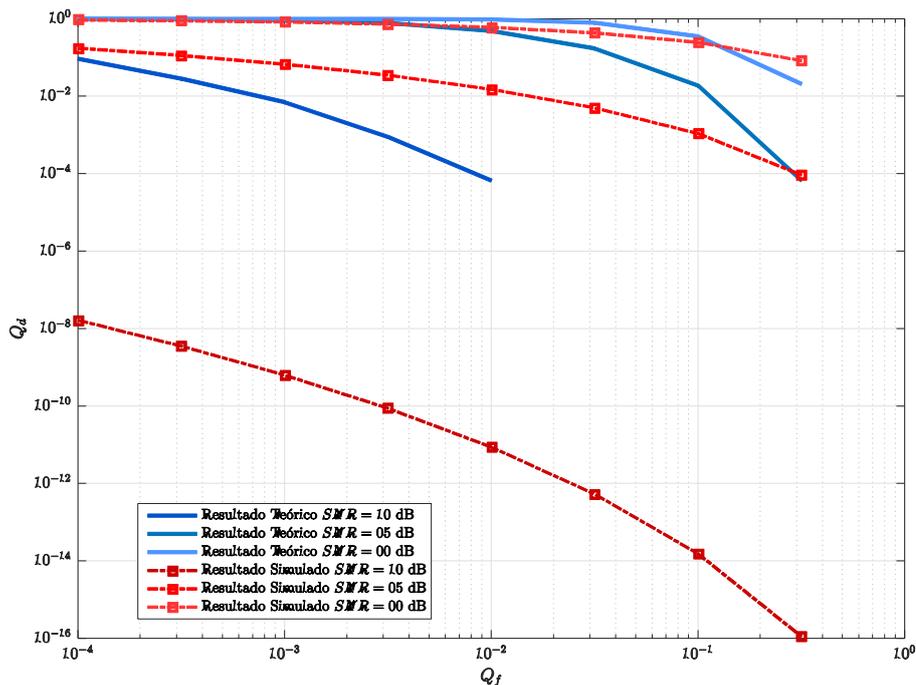


Figura 4.32: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor Soft MRC.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1513127/CA

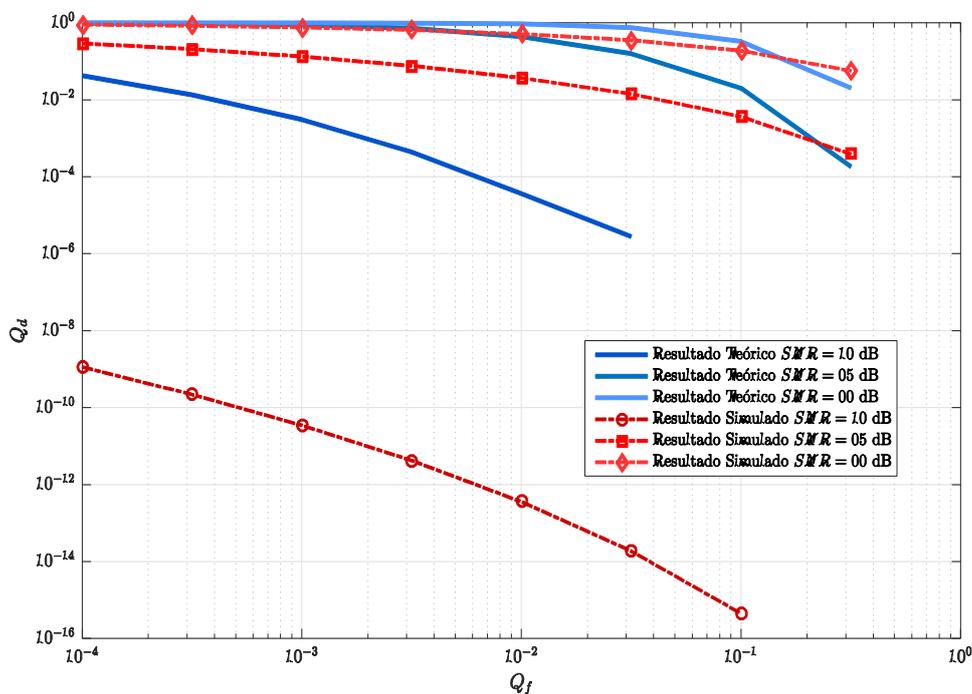


Figura 4.33: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor Soft MRC considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.

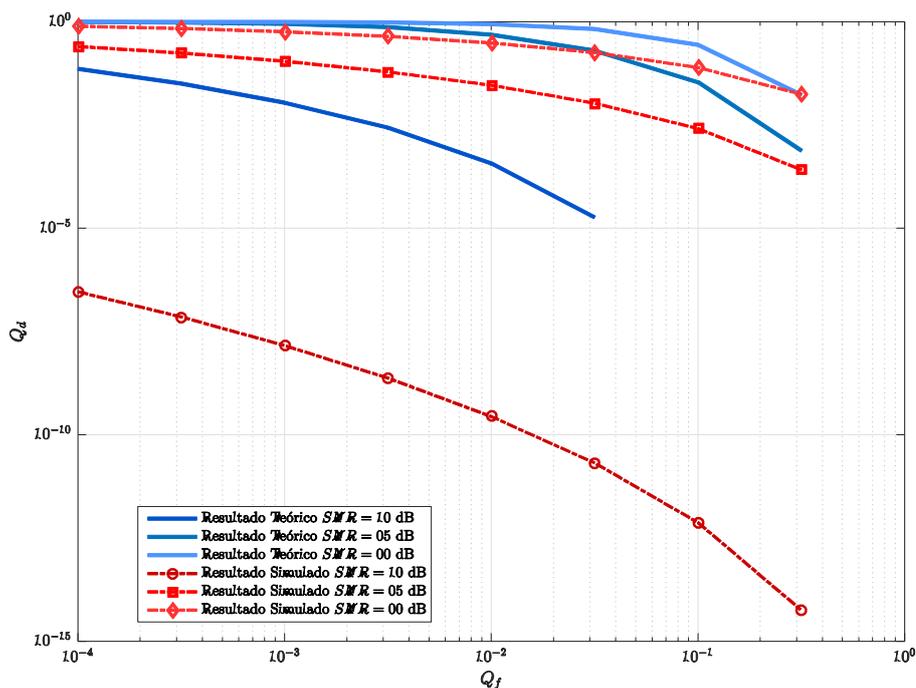


Figura 4.34: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Soft MRC* considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5dB.

Nas Figuras 4.35, 4.36 e 4.37 pode observar-se a comparação do decisor *SOFT-SLS* quando são considerados valores de SNR similares e com variações de 2 dB e 5dB, respectivamente.

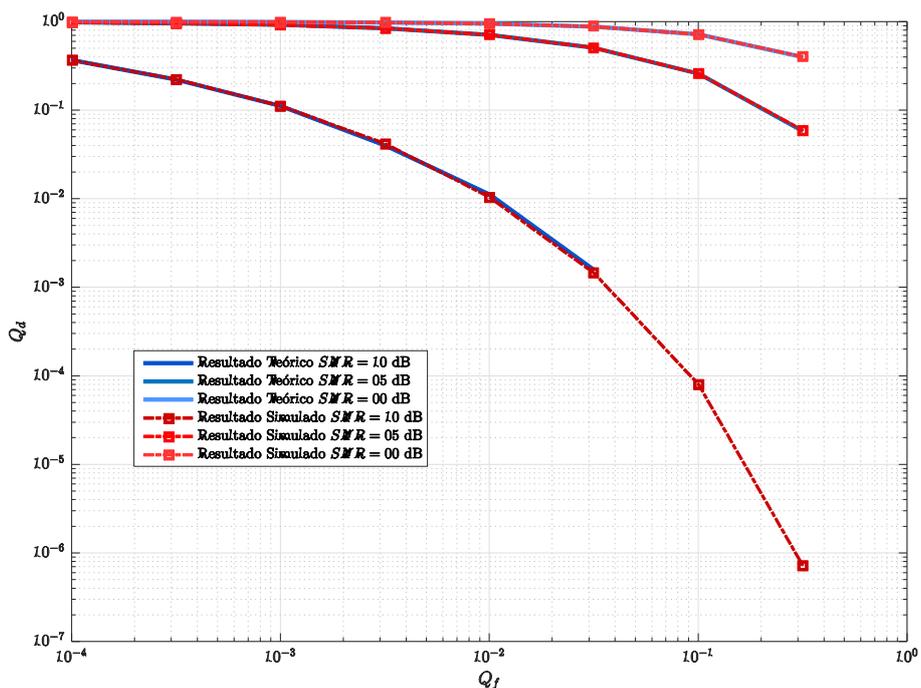


Figura 4.35: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Soft SLS*.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1513127/CA

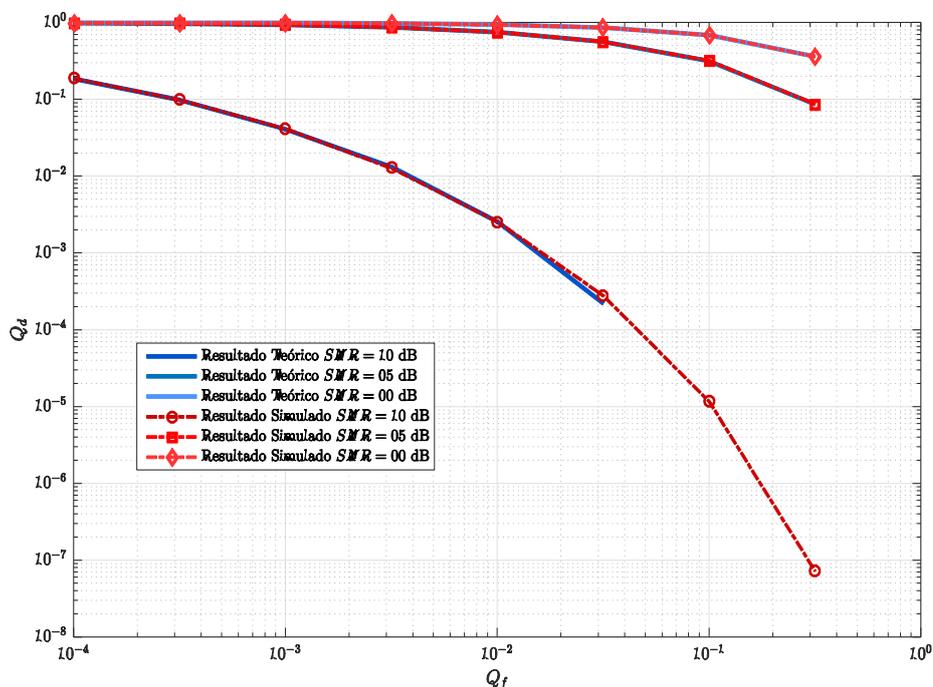


Figura 4.36: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Soft SLS* considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 2dB.

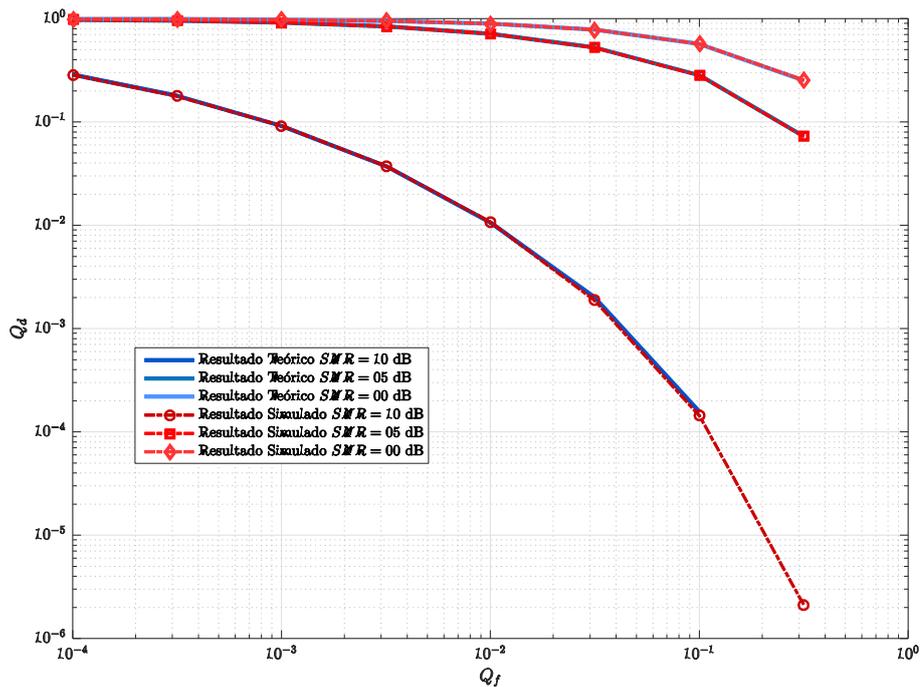


Figura 4.37: Resultados de sensoriamento cooperativo, teórico e simulado para SNR = 0,5,10 dB e com decisor *Soft SLS* considerando-se uma variação no nível de SNR dos US de 5 dB.

5 Conclusões

A tecnologia de rádios cognitivos está surgindo como uma eficaz alternativa para aumentar o número de usuários em diversas faixas de frequências. O conceito pretende resolver a escassez do espectro a partir de duas características básicas: a capacidade cognitiva e a capacidade de reconfiguração. A capacidade cognitiva refere-se à habilidade do rádio de conhecer o meio no qual está operando, identificar de forma oportunista os espaços espectrais não utilizados na sua totalidade ou em alguns intervalos de tempo e, a partir da sua reconfiguração transmitir informação sem provocar interferência no usuário principal da porção do espectro utilizado.

Esta dissertação de mestrado apresenta os resultados obtidos da análise do desempenho de regras de fusão para sensoriamento remoto cooperativo. Alguns estudos em Radio Cognitivo consideram hipóteses que muitas vezes não são compatíveis com um cenário mais realista. Um deles é considerar que os US recebem sempre o mesmo nível de SNR, cenário que na realidade é muito difícil de ter devido à aleatoriedade da posição geográfica de cada usuário.

Foram avaliados tanto os detectores do tipo HARD (com regras de decisão AND, OR e MAJORITY) quanto os detectores do tipo SOFT (com regras de decisão SLC, MRC, SC e SLS), num cenário onde os US tem diferentes níveis de SNR, que são consequência direta da posição dos US respeito o UP, cuja posição é desconhecida na maioria das vezes.

Uma vez avaliado o desempenho dos detectores em condições ideais, ou seja, quando é considerado um número N de US com o mesmo nível de SNR (neste caso $N=6$), os detectores foram avaliados com US com níveis de SNR com variações de SNR de 2 e 5 dB. A distribuição dos US é como ilustrada nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 para os níveis de 2 dB e nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16 para os níveis de 5 dB. É

importante notar que as figuras ou os gráficos correspondem a intervalos da distribuição de valores de SNR para os US apresentados na Figura 4.4.

No caso dos detectores HARD, tanto para os do tipo AND (Figuras 4.17, 4.18 e 4.19), OR (Figuras 4.20, 4.21 e 4.22) quanto para o do tipo MAJORITY (Figuras 4.23, 4.24 E 4.25), os detectores tem comportamentos mais longe dos esperados quando os níveis de SNR são considerados variáveis.

No caso dos detectores SOFT, tanto para os do tipo SLC (Figuras 4.26, 4.27 e 4.28), SC (Figuras 4.29, 4.30 e 4.31) quanto para o do tipo MRC (Figuras 4.32, 4.33 E 4.34), os detectores tem, também, comportamentos mais longe dos esperados uma vez que os níveis de SNR são considerados variáveis.

O detector SOFT do tipo SLS é o único que apresenta um desempenho como esperado no seu desenvolvimento teórico, mesmo quando são considerados níveis de SNR variáveis, observe as Figuras 4.35, 4.36 e 4.37, permitindo concluir que é o detector o mais robusto.

Trabalhos futuros sugeridos são a avaliação de outros cenários, com variações de alturas de antenas, área de serviço e número de usuários. Outra importante avaliação é a consideração de múltiplos usuários primários convivendo com os usuários secundários na mesma área de serviço e a estimativa da capacidade de transmissão dos usuários secundários. Finalmente é interessante avaliar o desempenho de outras técnicas de detecção, como a de cicloestacionariedade.

Referências bibliográficas

- [1] **The history of telecommunication.** 2013. by MITEL USER GROUP.
- [2] **Introducing spectrum management.** 2017. by GSMA ASSOCIATION.
- [3] HAYKIN, S. **Cognitive radio: brain-empowered wireless communications.** IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 23(2):201–220, Feb 2005.
- [4] JONDRAL, F. K. **Software-defined radio: Basics and evolution to cognitive radio.** EURASIP J. Wirel. Commun. Netw., 2005(3):275–283, Aug. 2005.
- [5] THOMAS, G. **Fast detection of spectral white spaces for cognitive radio networks.** In: MILCOM 2009 - 2009 IEEE MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, p. 1–6, Oct 2009.
- [6] KIM, J; ANDREWS, J. G. **Sensitive white space detection with spectral covariance sensing.** IEEE Transactions on Wireless Communications, 9(9):2945–2955, Sep. 2010.
- [7] UMAR, R; SHEIKH, A. U. H; DERICHE, M. **Unveiling the hidden assumptions of energy detector based spectrum sensing for cognitive radios.** IEEE Communications Surveys Tutorials, 16(2):713–728, Second 2014.
- [8] SHARMA, V; JAYAPRAKASAM, A. **An efficient algorithm for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks.** CoRR, 2008.
- [9] JAYAPRAKASAM, A; SHARMA, V. **Cooperative robust sequential detection algorithms for spectrum sensing in cognitive radio.** In: 2009

INTERNATIONAL CONFERENCE ON ULTRA MODERN TELECOMMUNICATIONS WORKSHOPS, p. 1–8, Oct. 2009.

[10] WU, Y; LIU, Y; FAN, W; LI, F; JI, S. **Is the or rule a good choice for cooperative sensing in cognitive radio networks?** In: 2011 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, NETWORKING AND MOBILE COMPUTING, p. 1–4, Sep. 2011.

[11] AL HAMMADI, A; ALHUSSEIN, O; SOFOTASIOS, P. C; MUHAIDAT, S; AL-QUTAYRI, M; AL-ARAJI, S; KARAGIANNIDIS, G. K; LIANG, J. **Unified analysis of cooperative spectrum sensing over composite and generalized fading channels.** IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(9):6949–6961, Sep. 2016.

[12] MITOLA III, J. **Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. 2000. 313 f.** PhD thesis, Dissertation (Doctor of Technology)–Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2000.

[13] LIU, H; LIU, Y; HUO, Y. **Cyclic stepping spectrum sensing based on energy detection.** In: 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONIC SCIENCE, ELECTRIC ENGINEERING AND COMPUTER (MEC), p. 486–489, Aug 2011.

[14] AND, D. M. A. **Cognitive radio networks: A survey.** In: 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, SIGNAL PROCESSING AND NETWORKING (WISPNET), p. 1981–1986, March 2016.

[15] **Plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no brasil.** 2018. by Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão "ORER"(ORER) da Agência Nacional de Telecomunicações "ANATEL".

[16] TSIROPOULOS, G. I; DOBRE, O. A; AHMED, M. H; BADDOUR, K. E. **Radio resource allocation techniques for efficient spectrum access in**

cognitive radio networks. IEEE Communications Surveys Tutorials, 18(1):824–847, Firstquarter 2016.

[17] I. AKYILDIZ, W.Y. LEE, M. V; MOHANTY, S. **Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey.** 50(13):2127–2159.

[18] ZHAO, Q; SWAMI, A. **A survey of dynamic spectrum access: Signal processing and networking perspectives.** In: 2007 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING - ICASSP '07, volumen 4, p. IV–1349–IV–1352, April 2007.

[19] ZHAO, Q; SADLER, B. M. **A survey of dynamic spectrum access.** IEEE Signal Processing Magazine, 24(3):79–89, May 2007.

[20] I. AKYILDIZ, W.Y. LEE, M. V; MOHANTY, S. **A survey on spectrum management in cognitive radio networks.** IEEE Commun. Magazine, 46(4):40–48, 2008.

[21] TRAGOS, E. Z; ZEDADALLY, S; FRAGKIADAKIS, A. G; SIRIS, V. A. **Spectrum assignment in cognitive radio networks: A comprehensive survey.** IEEE Communications Surveys Tutorials, 15(3):1108–1135, Third 2013.

[22] **What is white space.** 2010. by Centre for White Space Communications.

[23] S. HOSSAIN, M. RAHMAN, I. A; ALAMGIR HOSSAIN, M. **Hard combination data fusion for cooperative spectrum sensing in cognitive radio.** International Journal of Elektrical and Computer Engineering, 2(6):811–818, 2012.

[24] C. SUDHAMANI, K. REDDY, D. S. P. P; UDAY KUMAR, T. **Total error rate in cooperative spectrum sensing with and, or and majority fusion**

rules. International Conference on Communication and Signal Processing, 2016.

[25] BOURAOUI, R; BESBES, H. **Cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks: Fusion rules performance analysis.** In: 2016 INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING CONFERENCE (IWCMC), p. 493–498, Sep. 2016.

[26] CHU, Y; LIU, S. **Hard decision Fusion based Cooperative spectrum sensing over Nakagami-m Fading Channels.** 2012. 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile computing.

[27] NALLAGONDA, S; BANDARI, K; DHAR ROY, S and KUNDU S. **Performance of cooperative spectrum sensing with soft data fusion schemes in fading channels.** 2013. Annual IEEE India Conference (INDICON).

[28] TEGUIG D.; SCHEERS B. and LE NIR V. **DATA FUSION SCHEMES FOR COOPERATIVE SPECTRUM SENSING IN COGNITIVE RADIO NETWORKS.** 2012. Military Communications and Information Systems Conference (MCC), Gdansk, pp 1-7.

A Códigos de Matlab

A.1 Hard

```

1. clear
2. clc
3. db = @(x) 10.*log10(x);      % dB
4. ndb = @(x) 10.^(x/10);      % dB^-1
5. %% Deployment area
6. D = 4000;                    %3568; %metros de cobertura (Tesis
    Carlos)
7. ftx = 3.5;                  % GHz
8. xlmt = [-0 D]; % maximum limits in X
9. ylmt = [-D/2 D/2]; % maximum limits in Y
10. dxlmt = xlmt(2)-xlmt(1); % distances in X
11. mxlmt = (xlmt(2)+xlmt(1))/2;
12. dylmt = ylmt(2)-ylmt(1); % distances in Y
13. mylmt = (ylmt(2)+ylmt(1))/2;
14. %% Users
15. %%% Primary users
16. pBsPu = [0 0]; % positions [meters]
17. hBsPu = 42; % height [meters]
18. eBsPu = -2; % elevation-depression angle [grades]
19. BSrx = [hBsPu/tand(-eBsPu) 0 0];
20. pTxPu = -13.8; % transmitting power density
    [dBw/Mhz]
21. cBsPu = [pBsPu hBsPu];
22. %%% Secondary users
23. meanSu = 1.5625e-04; % users per kilometers^2
    [users/km^2]
24. hSsSu = 1; % Secondary users heigth [meters]
25. gSsmx = 25; % maximun reception antenna gain
26. No_db = -150; % spectral power noise density
    [dBW/MHz];
27. No = ndb(No_db); % spectral power noise density
    [W/MHz];
28. %%% Cognitive paramters
29. BW = 1.7;
30. u = 5;
31. %% Primary user coverage
32. aBsPu = BSrx-cBsPu;
33. xncell = 200;
34. yncell = 200;
35. xlcell = dxlmt/xncell;
36. xcelc = xlmt(1):xlcell:xlmt(2);
37. ylcell = dylmt/yncell;
38. ycelc = ylmt(1):ylcell:ylmt(2);

```

```

39.     zz = hSsSu.*ones(numel(xcelc),numel(ycelc)); % ground
      or user height???
40.     [xx,yy] = meshgrid(xcelc,ycelc);
41.     figure(1);clf
42.     plot3(xx,yy,zz, '.');hold on
43.     Nycell = numel(ycelc);
44.     Nxcell = numel(xcelc);
45.     vpos = [(xx(1:end))' (yy(1:end))' (zz(1:end))'];
46.     pathl = vpos - ones(Nxcell*Nycell,1)*cBsPu;
47.     dist = sqrt(sum(pathl.*pathl,2));
48.     Ls = 20*log10(4*pi*dist*1000/(0.3/ftx));
49.     gBsPu = gainBS(cBsPu,BSrx,pathl, 's'); % 's' or 'o'
50.     gSsSu = gainSS(cBsPu,vpos,gSsmx, 'i'); % 'o' or 'i'
51.     pdRx = pTxPu+gBsPu+gSsSu-Ls;
52.     snr_db = pdRx - No_db;
53.     snr = ndb(snr_db);
54.     figure(2);clf
55.     scatter3(vpos(:,1),vpos(:,2),snr_db, '.')
56.     vardb = 2;
57.     file16_2 = 'hard_N6var200db.mat';
58.     idx10 = datasample(find((snr_db>10-
      vardb)&(snr_db<10+vardb)),6);
59.     nus10 = numel(idx10);
60.     dis10 = sort(snr_db((snr_db>10-
      vardb)&(snr_db<10+vardb)));
61.     cdf10 = (1:numel(dis10))./numel(dis10);
62.     figure(123);clf; hold on
63.     plot(dis10-10,cdf10)
64.     cdf = (1:numel(snr_db))./numel(snr_db);
65.     dis = sort(snr_db);
66.     figure(1231);clf
67.     semilogy(dis,cdf)
68.     idx05 = datasample(find((snr_db>5-
      vardb)&(snr_db<5+vardb)),6);
69.     nus05 = numel(idx05);
70.     dis05 = sort(snr_db((snr_db>5-
      vardb)&(snr_db<5+vardb)));
71.     cdf05 = (1:numel(dis05))./numel(dis05);
72.     figure(123)
73.     plot(dis05-5,cdf05)
74.     idx00 = datasample(find((snr_db>0-
      vardb)&(snr_db<0+vardb)),6);
75.     nus00 = numel(idx00);
76.     dis00 = sort(snr_db((snr_db>0-
      vardb)&(snr_db<0+vardb)));
77.     cdf00 = (1:numel(dis00))./numel(dis00);
78.     figure(123)
79.     plot(dis00,cdf00)
80.     idx = [idx10;idx05;idx00];
81.     var_s = ndb(pdRx).*BW;
82.     var_n = No*BW;
83.     Pfa = 10.^(-4:0.5:0);
84.     nfa = numel(Pfa);
85.     pd_an10 = zeros(1,nfa); pd_or10 = pd_an10; pd_mj10 =
      pd_an10;

```

```

86.     pd_an05 = zeros(1,nfa); pd_or05 = pd_an05; pd_mj05 =
      pd_an05;
87.     pd_an00 = zeros(1,nfa); pd_or00 = pd_an00; pd_mj00 =
      pd_an00;
88.     nrep = 5e4;
89.     for j = 1:nfa
90.         % HD Lambda
91.         lmb_hard = 2*gammaincinv(1-Pfa(j),u);           % threshold
92.         nuus = numel(idx);
93.         H_vec = zeros(nuus,nrep);
94.         S_vec = zeros(nuus,nrep);
95.         for i = 1:nrep
          a. s_aux =
              normrnd(0,sqrt(var_s(idx))*ones(1,2*u),nuus,2*u);
          b. n_aux = normrnd(0,sqrt(var_n),nuus,2*u);
          c. S_vec(:,i) = sum((s_aux+n_aux).^2,2)./var_n;
          d. H_vec(:,i) = S_vec(:,i)>lmb_hard;
96.     end
97.     %%% HARD Teorico
98.     pdn =
          gammainc(mean(lmb_hard.*var_n./(2.*(var_s(idx10)+ones(numel(
            idx10),1)*var_n))),u,'upper');
99.     Qdn10(j) = pdn.^nus10;
100.    Qdo10(j) = 1-(1-pdn).^nus10;
101.    k = ceil(nus10/2)+1-rem(nus10,2); kn = k:nus10; coef =
          diag(fliplr(pascal(nus10+1,0)));
102.    Qdm10(j) = sum(coef(kn+1)'.*(pdn.^kn).*((1-
            pdn).^(nus10-kn)));
103.    pdn =
          gammainc(mean(lmb_hard.*var_n./(2.*(var_s(idx05)+ones(numel(
            idx05),1)*var_n))),u,'upper');
104.    Qdn05(j) = pdn.^nus05;
105.    Qdo05(j) = 1-(1-pdn).^nus05;
106.    k = ceil(nus05/2)+1-rem(nus05,2); kn = k:nus05; coef =
          diag(fliplr(pascal(nus05+1,0)));
107.    Qdm05(j) = sum(coef(kn+1)'.*(pdn.^kn).*((1-
            pdn).^(nus05-kn)));
108.    pdn =
          gammainc(mean(lmb_hard.*var_n./(2.*(var_s(idx00)+ones(numel(
            idx00),1)*var_n))),u,'upper');
109.    Qdn00(j) = pdn.^nus00;
110.    Qdo00(j) = 1-(1-pdn).^nus00;
111.    k = ceil(nus00/2)+1-rem(nus00,2); kn = k:nus00; coef =
          diag(fliplr(pascal(nus00+1,0)));
112.    Qdm00(j) = sum(coef(kn+1)'.*(pdn.^kn).*((1-
            pdn).^(nus00-kn)));
113.    hard10 = sum(H_vec(1:nus10,:),1);
114.    hard05 = sum(H_vec(nus10+1:nus10+nus05,:),1);
115.    hard00 = sum(H_vec(nus10+nus05+1:end,:),1);
116.    % AND Detector
117.    pd_an10(j) = 1-sum(hard10>=nus10)./nrep;
118.    pd_an05(j) = 1-sum(hard05>=nus05)./nrep;
119.    pd_an00(j) = 1-sum(hard00>=nus00)./nrep;
120.    % OR Detector
121.    pd_or10(j) = 1-sum(hard10>=1)./nrep;
122.    pd_or05(j) = 1-sum(hard05>=1)./nrep;
123.    pd_or00(j) = 1-sum(hard00>=1)./nrep;

```

```

124.     % MJ Detector
125.     pd_mj10(j) = 1-sum(hard10>nus10./2) ./nrep;
126.     pd_mj05(j) = 1-sum(hard05>nus05./2) ./nrep;
127.     pd_mj00(j) = 1-sum(hard00>nus00./2) ./nrep;
128.     end

129.     %% HARD

130.     figure(3); clf
131.     loglog(Pfa,pd_an10,'s--',Pfa,pd_an05,'s--
132.     ',Pfa,pd_an00,'s--')
133.     hold on
134.     plot(Pfa,1-Qdn10,'-.d',Pfa,1-Qdn05,'-.s',Pfa,1-
135.     Qdn00,'-.o')
136.     xlabel('$Q_f$', 'Interpreter', 'LaTeX') % x-axis label
137.     ylabel('$Q_d$', 'Interpreter', 'LaTeX') % y-axis label
138.     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
139.     h=legend('Resultado Te\''orico $SNR=10$ dB', 'Resultado
140.     Te\''orico $SNR=05$ dB',...
141.     'Resultado Te\''orico $SNR=00$ dB',...
142.     'Resultado Simulado $SNR=10$ dB', 'Resultado Simulado
143.     $SNR=05$ dB',...
144.     'Resultado Simulado $SNR=00$ dB', 'location', 'best');
145.     set(h, 'Interpreter', 'latex')
146.     box on;axis auto;grid on
147.     saveas(gcf, 'hard_and', 'eps')

148.     figure(4); clf
149.     loglog(Pfa,pd_or10,'p-',Pfa,pd_or05,'p-
150.     ',Pfa,pd_or00,'p-')
151.     hold on
152.     plot(Pfa,1-Qdo10,Pfa,1-Qdo05,Pfa,1-Qdo00)
153.     xlabel('$Q_f$', 'Interpreter', 'LaTeX') % x-axis label
154.     ylabel('$Q_d$', 'Interpreter', 'LaTeX') % y-axis label
155.     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
156.     h=legend('Resultado Te\''orico $SNR=10$ dB', 'Resultado
157.     Te\''orico $SNR=05$ dB',...
158.     'Resultado Te\''orico $SNR=00$ dB',...
159.     'Resultado Simulado $SNR=10$ dB', 'Resultado Simulado
160.     $SNR=05$ dB',...
161.     'Resultado Simulado $SNR=00$ dB', 'location', 'best');
162.     set(h, 'Interpreter', 'latex')
163.     box on;axis auto;grid on
164.     saveas(gcf, 'hard_or', 'eps')

165.     figure(5); clf
166.     loglog(Pfa,pd_mj10,'^-',Pfa,pd_mj05,'^-
167.     ',Pfa,pd_mj00,'^-' )
168.     hold on
169.     plot(Pfa,1-Qdm10,Pfa,1-Qdm05,Pfa,1-Qdm00)
170.     xlabel('$Q_f$', 'Interpreter', 'LaTeX') % x-axis label

```

```

163. ylabel('$Q_d$', 'Interpreter', 'LaTeX') % y-axis label
164. set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
165. h=legend('Resultado Te\''orico $SNR=10$ dB', 'Resultado
    Te\''orico $SNR=05$ dB', ...
166. 'Resultado Te\''orico $SNR=00$ dB', ...
167. 'Resultado Simulado $SNR=10$ dB', 'Resultado Simulado
    $SNR=05$ dB', ...
168. 'Resultado Simulado $SNR=00$ dB', 'location', 'best');
169. set(h, 'Interpreter', 'latex')
170. box on; axis auto; grid on
171. saveas(gcf, 'hard_mj', 'eps')

```

A.2 Soft

```

1. clear
2. clc

3. db = @(x) 10.*log10(x); % dB
4. ndb = @(x) 10.^(x/10); % dB^-1
5. %% Deployment area
6. D = 4000; %3568; %metros de cobertura (Tesis
    Carlos)
7. ftx = 3.5; % GHz

8. xlmnt = [-0 D]; % maximum limits in X
9. ylmnt = [-D/2 D/2]; % maximum limits in Y
10. dxlmnt = xlmnt(2)-xlmnt(1); % distances in X
11. mxlmnt = (xlmnt(2)+xlmnt(1))/2;
12. dylmnt = ylmnt(2)-ylmnt(1); % distances in Y
13. mylmnt = (ylmnt(2)+ylmnt(1))/2;
14. %% Users
15. %%% Primary users
16. pBsPu = [0 0]; % positions [meters]
17. hBsPu = 42; % height [meters]
18. eBsPu = -2; % elevation-depression angle [grades]
19. BSrx = [hBsPu/tand(-eBsPu) 0 0];
20. pTxPu = -13.8; % transmitting power density
    [dBw/Mhz]
21. cBsPu = [pBsPu hBsPu];
22. %%% Secondary users
23. meanSu = 1.5625e-04; % users per kilometers^2
    [users/km^2]
24. hSsSu = 1; % Secondary users heigth [meters]
25. gSsmx = 25; % maximun reception antenna gain
26. No_db = -150; % spectral power noise density
    [dBW/MHz];
27. No = ndb(No_db); % spectral power noise density
    [W/MHz];
28. %%% Cognitive paramters
29. BW = 1.7;

```

```

30.     u = 5;
31.     %% Primary user coverage
32.     aBsPu = BSrx-cBsPu;
33.     xncell = 50;
34.     yncell = 50;
35.     xlcell = dxlmt/xncell;
36.     xcelc = xlmt(1):xlcell:xlmt(2);
37.     ylcell = dylmt/yncell;
38.     ycelc = ylmt(1):ylcell:ylmt(2);
39.     zz = hSsSu.*ones(numel(xcelc),numel(ycelc));
40.     [xx,yy] = meshgrid(xcelc,ycelc);
41.     figure(1);clf
42.     plot3(xx,yy,zz, '.');hold on

43.     Nycell = numel(ycelc);
44.     Nxcell = numel(xcelc);

45.     vpos = [(xx(1:end))' (yy(1:end))' (zz(1:end))'];
46.     path1 = vpos - ones(Nxcell*Nycell,1)*cBsPu;
47.     dist = sqrt(sum(path1.*path1,2));
48.     Ls = 20*log10(4*pi*dist*1000/(0.3/ftx));
49.     gBsPu = gainBS(cBsPu,BSrx,path1,'s'); % 's' or 'o'
50.     gSsSu = gainSS(cBsPu,vpos,gSsmx,'i'); % 'o' or 'i'
51.     pdRx = pTxPu+gBsPu+gSsSu-Ls;
52.     snr_db = pdRx - No_db;
53.     snr = ndb(snr_db);
54.     figure(2);clf
55.     scatter3(vpos(:,1),vpos(:,2),snr_db, '.')
56.     idx10 = find((snr_db>9.95) & (pdRx-No_db<10.03));

57.     vardb = 2;
58.     file16_2 = 'soft_N6var200db.mat';
59.     idx10 = datasample(find((snr_db>10-
    vardb) & (snr_db<10+vardb)),6);
60.     nus10 = numel(idx10);
61.     idx05 = datasample(find((snr_db>5-
    vardb) & (snr_db<5+vardb)),6);
62.     nus05 = numel(idx05);
63.     idx00 = datasample(find((snr_db>0-
    vardb) & (snr_db<0+vardb)),6);
64.     nus00 = numel(idx00);
65.     idx = [idx10;idx05;idx00];

66.     var_s = ndb(pdRx).*BW;
67.     var_n = No*BW;

68.     Pfa = 10.^(-4:0.5:0);
69.     nfa = numel(Pfa);
70.     pd_slc10 = zeros(1,nfa); pd_slc05 = pd_slc10; pd_slc00
    = pd_slc10;

```

```

71.     pd_sc10 = zeros(1,nfa); pd_sc05 = pd_sc10; pd_sc00 =
       pd_sc10;
72.     pd_mrc10 = zeros(1,nfa); pd_mrc05 = pd_mrc10; pd_mrc00
       = pd_mrc10;
73.     pd_sls10 = zeros(1,nfa); pd_sls05 = pd_sls10; pd_sls00
       = pd_sls10;
74.     nrep = 5e4;
75.     for j = 1:nfa
76.         % SLC Lambda
77.         lmb_slc = gammaincinv(1-Pfa(j),nus10*u)*2; % threshold
78.         % SC Lambda
79.         lmb_sc = gammaincinv(1-Pfa(j),u)*2; % threshold
80.         % MRC Lambda
81.         lmb_mrc = gammaincinv(1-Pfa(j),u)*2; % threshold
82.         % SLS Lambda
83.         lmb_sls = inver_Qf_SLS(Pfa(j),nus10,u); % threshold

84.     nuus = numel(idx);
85.     S_vec = zeros(nuus,nrep);
86.     for i = 1:nrep
87.         a. n_aux = normrnd(0,1,nuus,2*u);
           b. s_aux = sqrt(2.*snr(idx)./(2*u))*ones(1,2*u);
           c. S_vec(:,i) = sum((s_aux+n_aux).^2,2);
88.     end

89.     soft10 = S_vec(1:nus10,:);
90.     soft05 = S_vec(nus10+1:nus10+nus05,:);
91.     soft00 = S_vec(nus10+nus05+1:end,:);

92.     %% SOFT Teorico
93.     Qd_slc10(j) =
       marcumq(sqrt(2*sum(snr(idx10))),sqrt(lmb_slc),nus10*u);
94.     Qd_slc05(j) =
       marcumq(sqrt(2*sum(snr(idx05))),sqrt(lmb_slc),nus05*u);
95.     Qd_slc00(j) =
       marcumq(sqrt(2*sum(snr(idx00))),sqrt(lmb_slc),nus00*u);

96.     gamasc = max(snr(idx10));
97.     Qd_sc10(j) = marcumq(sqrt(2*gamasc),sqrt(lmb_sc),u);
98.     gamasc = max(snr(idx05));
99.     Qd_sc05(j) = marcumq(sqrt(2*gamasc),sqrt(lmb_sc),u);
100.    gamasc = max(snr(idx00));
101.    Qd_sc00(j) = marcumq(sqrt(2*gamasc),sqrt(lmb_sc),u);

102.    gamamrc = sum(snr(idx10));
103.    Qd_mrc10(j) =
       marcumq(sqrt(2*gamamrc),sqrt(lmb_mrc),u);
104.    gamamrc = sum(snr(idx05));
105.    Qd_mrc05(j) =
       marcumq(sqrt(2*gamamrc),sqrt(lmb_mrc),u);

```

```

105.     gamamrc = sum(snr(idx00));
106.     Qd_mrc00(j) =
        marcumq(sqrt(2*gamamrc),sqrt(lmb_mrc),u);

107.     Qd_sls10(j) = 1-prod(1-
        marcumq(sqrt(2*snr(idx10)),sqrt(lmb_sls),u));
108.     Qd_sls05(j) = 1-prod(1-
        marcumq(sqrt(2*snr(idx05)),sqrt(lmb_sls),u));
109.     Qd_sls00(j) = 1-prod(1-
        marcumq(sqrt(2*snr(idx00)),sqrt(lmb_sls),u));

110.     % SLC Detector
111.     pd_slc10(j) = 1-
        sum(sum(S_vec(1:nus10,:),1)>lmb_slc)./nrep;
112.     pd_slc05(j) = 1-
        sum(sum(S_vec(nus10+1:nus10+nus05,:),1)>lmb_slc)./nrep;
113.     pd_slc00(j) = 1-
        sum(sum(S_vec(nus10+nus05+1:end,:),1)>lmb_slc)./nrep;
114.     % SC Detector
115.     [~,indmax] = max(snr(idx10)); % selecting the maximum
        SNR
116.     pd_sc10(j) = 1-sum(soft10(indmax,*)>lmb_sc)./nrep;
117.     [~,indmax] = max(snr(idx05)); % selecting the maximum
        SNR
118.     pd_sc05(j) = 1-sum(soft05(indmax,*)>lmb_sc)./nrep;
119.     [~,indmax] = max(snr(idx00)); % selecting the maximum
        SNR
120.     pd_sc00(j) = 1-sum(soft00(indmax,*)>lmb_sc)./nrep;
121.     % MRC Detector
122.     W = 1.2*(snr(idx10)./(sum(snr(idx10))-
        snr(idx10)))*ones(1,nrep); %snr
123.     pd_mrc10(j) = 1-
        sum(sum(soft10.*W,1)>lmb_mrc)./nrep;%sum(S_vec.*W);
124.     W = 1.2*(snr(idx05)./(sum(snr(idx05))-
        snr(idx05)))*ones(1,nrep); %snr
125.     pd_mrc05(j) = 1-sum(sum(soft05.*W,1)>lmb_mrc)./nrep;
126.     W = 1.2*(snr(idx00)./(sum(snr(idx00))-
        snr(idx00)))*ones(1,nrep); %snr
127.     pd_mrc00(j) = 1-sum(sum(soft00.*W,1)>lmb_mrc)./nrep;
128.     % SLS Detector
129.     pd_sls10(j) = 1-
        sum(max(S_vec(1:nus10,*)>lmb_sls)./nrep;
130.     pd_sls05(j) = 1-
        sum(max(S_vec(nus10+1:nus10+nus05,*)>lmb_sls)./nrep;
131.     pd_sls00(j) = 1-
        sum(max(S_vec(nus10+nus05+1:end,*)>lmb_sls)./nrep;
132.     end

133.     figure(6); clf
134.     loglog(Pfa,pd_slc10,'^-',Pfa,pd_slc05,'^-
        ',Pfa,pd_slc00,'^-')
135.     hold on
136.     plot(Pfa,1-Qd_slc10,Pfa,1-Qd_slc05,Pfa,1-Qd_slc00)

```

```

137. xlabel('$Q_f$', 'Interpreter', 'LaTeX') % x-axis label
138. ylabel('$Q_d$', 'Interpreter', 'LaTeX') % y-axis label
139. set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
140. h=legend('Resultado Te\''orico $SNR=10$ dB', 'Resultado
    Te\''orico $SNR=05$ dB', ...
141. 'Resultado Te\''orico $SNR=00$ dB', ...
142. 'Resultado Simulado $SNR=10$ dB', 'Resultado Simulado
    $SNR=05$ dB', ...
143. 'Resultado Simulado $SNR=00$ dB', 'location', 'best');
144. set(h, 'Interpreter', 'latex')
145. fancy; box on; axis auto; grid on
146. saveas(gcf, 'soft_slc', 'eps')

147. figure(7); clf
148. loglog(Pfa, pd_sc10, 'o--', Pfa, pd_sc05, 'o--
    ', Pfa, pd_sc00, 'o--')
149. hold on
150. plot(Pfa, 1-Qd_sc10, Pfa, 1-Qd_sc05, Pfa, 1-Qd_sc00)
151. xlabel('$Q_f$', 'Interpreter', 'LaTeX') % x-axis label
152. ylabel('$Q_d$', 'Interpreter', 'LaTeX') % y-axis label
153. set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
154. h=legend('Resultado Te\''orico $SNR=10$ dB', 'Resultado
    Te\''orico $SNR=05$ dB', ...
155. 'Resultado Te\''orico $SNR=00$ dB', ...
156. 'Resultado Simulado $SNR=10$ dB', 'Resultado Simulado
    $SNR=05$ dB', ...
157. 'Resultado Simulado $SNR=00$ dB', 'location', 'best');
158. set(h, 'Interpreter', 'latex')
159. fancy; box on; axis auto; grid on
160. saveas(gcf, 'soft_sc', 'eps')

161. figure(8); clf
162. loglog(Pfa, pd_mrc10, 'o--', Pfa, pd_mrc05, 'o--
    ', Pfa, pd_mrc00, 'o--')
163. hold on
164. plot(Pfa, 1-Qd_mrc10, Pfa, 1-Qd_mrc05, Pfa, 1-Qd_mrc00)
165. xlabel('$Q_f$', 'Interpreter', 'LaTeX') % x-axis label
166. ylabel('$Q_d$', 'Interpreter', 'LaTeX') % y-axis label
167. set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
168. h=legend('Resultado Te\''orico $SNR=10$ dB', 'Resultado
    Te\''orico $SNR=05$ dB', ...
169. 'Resultado Te\''orico $SNR=00$ dB', ...
170. 'Resultado Simulado $SNR=10$ dB', 'Resultado Simulado
    $SNR=05$ dB', ...
171. 'Resultado Simulado $SNR=00$ dB', 'location', 'best');
172. set(h, 'Interpreter', 'latex')
173. fancy; box on; axis auto; grid on
174. saveas(gcf, 'soft_mrc', 'eps')

175. figure(9); clf
176. loglog(Pfa, pd_sls10, 'o--', Pfa, pd_sls05, 'o--
    ', Pfa, pd_sls00, 'o--')

```

```
177. hold on
178. plot(Pfa,1-Qd_sls10,Pfa,1-Qd_sls05,Pfa,1-Qd_sls00)
179. xlabel('$Q_f$', 'Interpreter', 'LaTeX') % x-axis label
180. ylabel('$Q_d$', 'Interpreter', 'LaTeX') % y-axis label
181. set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
182. h=legend('Resultado Te\''orico $SNR=10$ dB', 'Resultado
    Te\''orico $SNR=05$ dB',...
183. 'Resultado Te\''orico $SNR=00$ dB',...
184. 'Resultado Simulado $SNR=10$ dB', 'Resultado Simulado
    $SNR=05$ dB',...
185. 'Resultado Simulado $SNR=00$ dB', 'location', 'best');
186. set(h, 'Interpreter', 'latex')
187. fancyp;box on;axis auto;grid on
188. saveas(gcf, 'soft_sls', 'eps')
```