



**COPPE/UFRJ**

DETECÇÃO COOPERATIVA EM REDES COGNITIVAS PARA O  
CONTROLE DA INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS LICENCIADOS

André Chaves Mendes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Rio de Janeiro

Junho de 2010

DETECÇÃO COOPERATIVA EM REDES COGNITIVAS PARA O  
CONTROLE DA INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS LICENCIADOS

André Chaves Mendes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

---

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D.

---

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2010

Mendes, André Chaves

Detecção Cooperativa em Redes Cognitivas para o Controle da Interferência em Sistemas Licenciados/André Chaves Mendes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIV, 115 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 105 – 115.

1. Redes Cognitivas.    2. Controle da Interferência.
3. Detecção Cooperativa.    I. Rezende, José Ferreira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

# Agradecimentos

A Deus, por essa fantástica aventura chamada vida.

Aos meus pais Alberto e Elcy, pelo amor e apoio durante toda a vida.

À minha companheira Paula, pelo amor e carinho.

À minha irmã Eliane, pela amizade.

Ao Professor José Rezende, por sua orientação e amizade.

Aos Professores Célio Albuquerque e Aloysio Pedroza, pela presença na banca e contribuições à tese.

Aos demais Professores do GTA: Leão, Luis e Otto; pelo apoio.

Aos Professores da COPPE Sistemas: Rosa, Daniel e Valmir; pelo aprendizado.

Aos colegas do GTA: Carina, Celso, C. Henrique, Coutinho, Danilo, Igor, Kleber, Marcel, Marcelo, Miguel, Natália, Raphael, Reinaldo, Tibério, Ulysses e todos os demais; pela amizade.

À equipe da secretaria: Daniele, Maurício, Rosa e todos os demais; pelo suporte operacional.

Ao PEE/COPPE, pelas instalações e equipamentos utilizados.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas da Marinha e à Marinha do Brasil, pelo suporte administrativo e financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DETECÇÃO COOPERATIVA EM REDES COGNITIVAS PARA O  
CONTROLE DA INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS LICENCIADOS

André Chaves Mendes

Junho/2010

Orientador: José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

Em redes cognitivas, a detecção confiável do sistema licenciado é fundamental para a operação do sistema oportunista. Essa detecção tem como objetivo permitir a reutilização do espectro utilizado pelos sistemas licenciados fazendo com que a rede oportunista não provoque uma interferência acima do limite permitido por esses sistemas. Neste trabalho propomos um mecanismo de detecção por dispositivos sensores, dotados de um sistema de localização, que realizam cooperativamente o controle de potência dos dispositivos operacionais na rede oportunista de forma a limitar a interferência nos sistemas licenciados. As simulações realizadas mostram que num cenário ad hoc é possível melhorar a qualidade das comunicações da rede oportunista, mantendo a interferência dentro dos limites permitidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COOPERATIVE DETECTION IN COGNITIVE RADIO NETWORKS TO  
INTERFERENCE CONTROL IN PRIMARY SYSTEMS

André Chaves Mendes

June/2010

Advisor: José Ferreira de Rezende

Department: Electrical Engineering

In cognitive networks, the reliable detection of the licensed system is essential to the operation of the opportunistic system. This detection is intended to allow the reuse of spectrum used by licensed systems so that the opportunistic network does not cause an interference above the limit tolerated by these systems. In this work we propose a detection mechanism by sensor devices, equipped with a location system, which cooperatively perform the power control of operational devices in the opportunistic network in order to limit interference in licensed systems. The simulations show that in a ad hoc scenario is possible to improve the quality of opportunistic network communications, keeping the interference within the limits permitted.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	4
1.2 Organização da Dissertação . . . . .	6
<b>2 Espectro de Frequências, o Rádio por Software e o Rádio Cognitivo</b>	<b>8</b>
2.1 Regulamentação e Uso Efetivo do Espectro de Frequências . . . . .	8
2.2 Visão Geral do Rádio por Software . . . . .	12
2.3 Visão Geral do Rádio Cognitivo . . . . .	23
2.4 Conclusão . . . . .	34
<b>3 Detecção do Primário</b>	<b>35</b>
3.1 Detecção Baseada na Temperatura de Interferência . . . . .	36
3.2 Detecção do Transmissor . . . . .	38
3.2.1 Detecção por Filtro Casado . . . . .	38
3.2.2 Detecção pela Energia do Sinal . . . . .	39
3.2.3 Detecção pela Ciclo-estacionariedade do Sinal Transmitido . .	41
3.2.4 Detecção pela Envoltória do Sinal . . . . .	42
3.2.5 Detecção por Outros Métodos . . . . .	42
3.2.6 Comparação Entre os Métodos de Detecção do Transmissor . .	42
3.3 Detecção de Sinais BPSK Desconhecidos . . . . .	43

3.4	Detecção de Constelações com Valor Esperado de Transmissão Igual a Zero . . . . .	44
3.5	Percepção do Espectro . . . . .	46
3.5.1	Percepção Cooperativa . . . . .	47
3.6	Conclusão . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Arquitetura Proposta</b>	<b>50</b>
4.1	Descrição da Arquitetura . . . . .	50
4.1.1	Rede Primária . . . . .	51
4.1.2	Rede Secundária . . . . .	52
4.2	Modelagem Analítica . . . . .	57
4.2.1	Aproveitamento do Espectro . . . . .	58
4.2.2	Limitação Devido à Interferência . . . . .	59
4.2.3	Detecção das Oportunidades . . . . .	60
4.2.4	Controle da Potência de Transmissão no Usuário Secundário . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Avaliação de Desempenho</b>	<b>71</b>
5.1	Implementação . . . . .	72
5.2	Cenários . . . . .	81
5.3	Métricas . . . . .	83
5.4	Resultados Obtidos . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>101</b>
6.1	Considerações . . . . .	101
6.2	Contribuições . . . . .	102
6.3	Trabalhos Futuros . . . . .	104
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>105</b>

# Lista de Figuras

2.1	Quadro de atribuição de faixas de frequências no Brasil (melhor visualizado no formato original [1]). . . . .	8
2.2	Ocupação do espectro [2]. . . . .	9
2.3	RDS ideal. . . . .	13
2.4	RDS real (parte de transmissão). . . . .	14
2.5	Programa JTRS. . . . .	18
2.6	Ciclo de aprendizado do rádio cognitivo, segundo J. Mitola III. . . . .	25
2.7	Arquitetura genérica do rádio cognitivo, segundo J. Mitola III. . . . .	26
2.8	Lacunas no espectro devido ao baixo uso. . . . .	28
2.9	Ciclo de operação de uma rede cognitiva. . . . .	33
3.1	Modelo da Temperatura da Interferência. . . . .	37
4.1	Círculos de interferência e mecanismo de localização do nó primário. . . . .	53
4.2	Interferência e oportunidade no espectro. . . . .	58
4.3	Oportunidade no espectro e sua detecção. . . . .	61
4.4	Regiões de interesse do usuário primário transmissor. . . . .	64
4.5	Relação entre a potência de transmissão do usuário secundário e o afastamento necessário do primário, em dB . . . . .	69
5.1	Fluxograma do simulador construído usando o Matlab. . . . .	72
5.2	Fluxograma do processo Secundário Operacional (O). . . . .	75
5.3	Fluxograma do processo Primário (P). . . . .	76
5.4	Fluxograma do sub-processo de troca de dados. . . . .	77
5.5	Fluxograma do módulo que efetua a detecção de nós operacionais. . . . .	78
5.6	Fluxograma do módulo que efetua a detecção de nós primários. . . . .	79

5.7	Fluxograma do módulo que efetua o controle da potência de transmissão dos nós operacionais. . . . .	80
5.8	Área de simulação e regiões de posicionamento dos nós. . . . .	82
5.9	Cenários fixos. . . . .	86
5.10	Cenários fixos com variação de parâmetros. . . . .	87
5.11	Cenários fixos com a taxa de transmissão duplicada. . . . .	89
5.12	Cenários fixos. . . . .	90
5.13	Velocidade dos nós no intervalo de 0,1m/s a 0,3m/s. . . . .	91
5.14	Velocidade dos nós no intervalo de 0,5m/s a 0,9m/s. . . . .	92
5.15	Velocidade dos nós no intervalo de 1,0m/s a 1,8m/s. . . . .	93
5.16	Velocidade dos nós no intervalo de 2,7m/s a 8,3m/s. . . . .	94
5.17	Cenário móvel 1. . . . .	96
5.18	Cenário móvel 2. . . . .	97
5.19	Cenário móvel 3. . . . .	98
5.20	Cenário móvel 4. . . . .	99
5.21	Cenário móvel 5. . . . .	100

# Lista de Tabelas

4.1	Mensagens trocadas pelos nós secundários. . . . .	51
5.1	Mensagens trocadas pelos nós. . . . .	74
5.2	Variáveis usadas. . . . .	84

# Lista de Abreviaturas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> , p. 13
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i> , p. 9, 10
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i> , p. 15, 16
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> , p. 19
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , p. 38
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> , p. 43
CI	<i>Circuito Integrado</i> , p. 16
CORBA	<i>Common Object Request Broker Architecture</i> , p. 18
CTS	<i>Clear to Send</i> , p. 61
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i> , p. 13
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i> , p. 16, 28
DFH	<i>Dynamic Frequency Hopping</i> , p. 31
DSA	<i>Dynamic Spectrum Access</i> , p. 28
DoD	<i>United States Department of Defense</i> , p. 16, 23
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , p. 3, 102
FEC	<i>Forward Error Correction</i> , p. 19
FI	<i>Frequência Intermediária</i> , p. 12, 22
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> , p. 14

FSF	<i>Free Software Foundation</i> , p. 21
GNU	<i>GNU is not Unix</i> , p. 21, 22
GPL	<i>GNU General Public License</i> , p. 21
GPP	<i>General Purpose Processor</i> , p. 15
GPS	<i>Global Positioning System</i> , p. 29
GPU	<i>Graphic Process Unit</i> , p. 16
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> , p. 20
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , p. 1
IP	<i>Internet Protocol</i> , p. 1
ITU-R	<i>International Telecommunications Union, Radiocommunications Sector</i> , p. 12, 25
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i> , p. 17
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> , p. 22
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> , p. 30
OMG	<i>Object Management Group</i> , p. 19
PAN	<i>Personal Area Network</i> , p. 12
PDR	<i>Programmable Digital Radio</i> , p. 12
QoS	<i>Qualidade de Serviço</i> , p. 4, 25–27, 31
RDS	<i>Rádio Definido por Software</i> , p. 2, 12–23, 25, 27, 28, 32
RF	<i>Radiofrequência</i> , p. 1, 2, 4–6, 8–14, 22, 23, 25, 27, 28, 32, 37, 101
RKRL	<i>Radio Knowledge Representation Language</i> , p. 23
RTS	<i>Request to Send</i> , p. 61

SCA/HW	<i>SCA Hardware Framework</i> , p. 18
SCA	<i>Software Communications Architecture</i> , p. 18
SCC	<i>Standards Coordinating Committee</i> , p. 28
SCH	<i>Super-frame Control Header</i> , p. 30
SIMD	<i>Single Instruction Multiple Data</i> , p. 16
SINR	<i>Sinal to Noise plus Interference Ratio</i> , p. 63
SMP	<i>Serviço Móvel Pessoal</i> , p. 1
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , p. 5, 6, 38, 40, 41, 43, 44, 46, 48, 50, 57, 63, 65–67, 102, 103
USRP	<i>Universal Software rádio Peripheral</i> , p. 22
UTS	<i>Unidade de Tempo do Simulador</i> , p. 72
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> , p. 11
VHDL	<i>Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language</i> , p. 15
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> , p. 1, 12
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> , p. 1

# Capítulo 1

## Introdução

A necessidade de comunicação segura e robusta torna-se mais evidente a cada dia e os serviços sem fio estão se tornando mais presentes em todo o país, embora ainda com preço elevado. A expansão dos pontos de acesso sem fio baseados no padrão IEEE 802.11 a/b/g, muitas vezes chamado de *Wi-Fi*<sup>1</sup>, nos cafés, aeroportos, *shoppings* e outros espaços públicos, com serviços de dados e voz através de redes IP, incentivam a criação de novos serviços e aplicações. Nos dados do mercado, novas tecnologias, tais como o padrão IEEE 802.16 “WiMAX” estão sendo implantados e empresas operadoras do serviço móvel pessoal (SMP<sup>2</sup>) estão oferecendo aos seus clientes serviços de conectividade sem fio nas suas redes.

A evolução das pesquisas sobre a tecnologia da comunicação digital sem fio conduziu a dois importantes resultados: previsões sobre o escasseamento de faixas do espectro de radiofrequência (RF) dado o seu crescente uso e as preocupações sobre a robustez e a segurança dos sistemas sem fio de hoje, principalmente no tocante aos crimes cibernéticos.

Observando esses aspectos, tornou-se evidente a necessidade de que as redes sem fio tivessem capacidade de reorganização para recuperação de falhas e de que os equipamentos de rede sem fio (que simplificarmente passaremos a chamar de rádios) pudessem evoluir de forma autônoma no tempo, alinhados às políticas regulatórias vigentes, para responder às necessidades de comunicação dos usuários. Nessa altura, surgiram tecnologias que permitiram que os rádios adaptassem seu comportamento

---

<sup>1</sup>Nome usado comercialmente para se referir ao padrão IEEE 802.11.

<sup>2</sup>Serviço de telecomunicação móvel terrestre de interesse coletivo e prestado no regime privado.

baseado em algoritmos pré-definidos, um significativo avanço em relação aos rádios fixos do passado cujos parâmetros operacionais eram estabelecidos no momento da fabricação [3].

Entretanto, quando confrontados com cenários incomuns e forte ruído eletromagnético, estes rádios muitas vezes não funcionam corretamente ou experimentam severa degradação de desempenho [4]. A medida que as pesquisas progrediram na direção dos rádios programáveis baseados na tecnologia do rádio definido por *software* (RDS), a idéia de um rádio que pudesse evoluir as suas funcionalidades no espaço e no tempo começou a aparecer como um conceito plausível [5]. A tecnologia do rádio definido por *software*, do inglês *software defined radio*, teve origem em pesquisas militares e recentemente se expandiu para o meio civil, através de iniciativas como a do SDR Forum, hoje chamado de Wireless Innovation Forum [6]. Na sua origem, o objetivo era integrar as variadas tecnologias de radiocomunicações existentes no campo de batalha. Hoje apresenta-se, principalmente, como um caminho para a convergência dos diversos sistemas de comunicação existentes.

Em outras palavras, um rádio que funcionaria confiavelmente em variados ambientes e potencialmente complementaria o uso comercial do espectro proporcionando novos serviços para o consumidor [7]. *Rádio cognitivo*, um termo cunhado pela primeira vez por Joseph Mitola III [7], foi a materialização dessa idéia e tornou-se um tema de pesquisa de grande interesse nos últimos anos. Muitos pesquisadores têm adotado a definição clássica de cognitivo para a ação ou processo de conhecimento, e cognição é definida como a ação ou faculdade de conhecer tomada em seu sentido mais amplo, incluindo a sensação, percepção, concepção, etc..

Dada esta definição, o processo de “sensorear” um canal de RF existente, uma evolução do funcionamento do rádio para acomodar a percepção do canal, e avaliar as informações obtidas adequadamente é descrito como um processo cognitivo. Esta abordagem inclui tanto a consciência do canal de RF e o julgamento das melhores ações possíveis a tomar tendo em conta este conhecimento.

A crescente demanda por faixas do espectro de RF juntamente com o uso ineficiente das bandas licenciadas [2] trouxe à tona a possibilidade de se abrirem essas bandas de frequências subutilizadas para acesso dinâmico oportunístico [8, 9, 10]. Seguindo nesse caminho, as pesquisas sobre redes reconfiguráveis (fixas e móveis)

têm se focado em dispositivos como o *rádio cognitivo* [7], formando redes cognitivas [11], que ao contrário das demais redes (legadas), são capazes de adaptar o seu funcionamento (proativamente ou reativamente) em resposta à estímulos externos. Isto é conseguido através de mecanismos que captam esses estímulos do ambiente e obtêm conhecimento a partir desta interação, planejando, em conformidade, suas ações futuras.

Apesar dessa flexibilidade, não há certeza de que os rádios cognitivos, integrantes de uma rede cognitiva oportunista (de caráter secundário ou simplesmente, rede secundária), funcionem sem causar interferência excessiva nos sistemas licenciados (de caráter primário ou simplesmente, rede primária). Essa certeza é essencial para que faixas de frequências sejam compartilhadas e regulamentadas para o uso por sistemas secundários, como está sendo feito para a banda de TV analógica nos EUA, para a qual o FCC (órgão regulador das comunicações nos EUA) estabeleceu regras de uso a partir de 2009 [12]. Também não há consenso de que redes sem fio distintas, compartilhando a mesma faixa de frequências, funcionem adequadamente sob forte controle da sua potência de transmissão e da interferência que causam nas demais redes e sistemas.

Essa problemática envolvendo interferência entre dispositivos primários e secundários tem recebido grande atenção ultimamente. Entretanto, em todas essas propostas, a abordagem foi feita através de uma análise teórica e probabilística, se baseando num modelo de rede primária com um transmissor e múltiplos receptores passivos.

Em [13], os autores abordaram de forma teórica o acesso oportunístico ao espectro e os limites de interferência em termos das comunicações entre usuários primários na vizinhança de transmissores e receptores secundários. Também foram identificados os parâmetros necessários para a determinação dos limites de interferência e os parâmetros que afetam o controle da potência de transmissão dos usuários secundários.

O problema do controle de potência de usuários secundários sob limites de interferência toleráveis para os usuários primários foi formulado como um problema côncavo de minimização em [14]. Os autores propuseram um algoritmo de árvore com poda para obter a solução.

Um sistema de controle de potência para usuários secundários usando conceitos de probabilidades para limitar a interferência causada no receptor primário foi proposto em [15], que também explora a informação de localização do receptor primário obtido indiretamente através da percepção do espectro.

Um novo protocolo MAC multi-canal para acesso oportunístico ao espectro foi desenvolvido em [16], onde a funcionalidade de percepção do espectro foi incorporada no desenvolvimento do protocolo. Os autores avaliaram o desempenho considerando vazão e probabilidade de colisão devido a erros na percepção efetuada.

Em [17], o problema do acesso dinâmico ao espectro com garantia de QoS em termos da relação sinal-ruído necessária para usuários secundários foi estudada sob limitação da temperatura de interferência [18] em sistemas primários usando DS-CDMA. O estudo seguiu conceitos de geometria convexa e teoria de jogos (jogo potencial) e a solução ótima global pôde ser obtida considerando uma potência de transmissão suportada pelos usuários secundários.

Numa visão semelhante, em [19], os autores propuseram um *framework* considerando limites de interferência para usuários primários (DS-CDMA) e de QoS para usuários secundários simultaneamente com algoritmos de controle de admissão para esses usuários sob uma condição de carga alta na rede conjuntamente com controle de potência.

Em [20] é feita uma abordagem a partir da teoria de jogos para otimizar uma rede *ad hoc* no que diz respeito à potência de transmissão e ao controle do canais utilizados.

## 1.1 Objetivos

Agilidade em frequência, ou a capacidade do rádio para alterar dinamicamente a frequência utilizada na comunicação, é um tema que tem recebido crescente atenção. O foco neste tema é impulsionado pela escasseamento do espectro de RF e do potencial de lucro decorrente, caso se desenvolva uma forma de melhorar a utilização e aproveitamento desse recurso em escassez.

As pesquisas objetivando o uso dinâmico do espectro buscam soluções para desocupar quando necessário ou negociar um novo canal (faixa de frequências) para co-

municação. No entanto, existem situações em que o rádio não pode ocupar um canal aparentemente livre, mas com presença de interferências de RF, devido a questões regulamentares, escassez de recursos ou até a presença de sistemas interferidores militares (*jammers*).

Assim, esta dissertação foca em uma metodologia que o rádio cognitivo pode adotar para maximizar o seu desempenho dentro de uma banda de frequências onde há presença de interferência. Além disso, investigamos a possibilidade de utilizar uma rede cognitiva secundária em um ambiente onde haja a presença de um sistema licenciado, sem contudo causar-lhe interferência prejudicial.

Motivado pela problemática apresentada, e tomando como base os parâmetros físicos de operação do rádio cognitivo, propomos uma rede *ad hoc* secundária com nós fixos e móveis, composta por rádios cognitivos, que efetuam a detecção cooperativa das transmissões de uma rede licenciada (primária) e mostramos as condições que permitem a um conjunto deles manter a conectividade entre si enquanto limitam a interferência causada pelas suas transmissões.

No trabalho tomou-se como métrica de avaliação do protocolo proposto, a conectividade, uma vez que pode ser encarada como um indicador simples da qualidade nas comunicações. E por fim, propomos um *controle de potência de transmissão* na rede secundária que considera sua distância para os nós primários detectados e ajusta sua potência de acordo com um modelo de propagação, regulando a sua interferência.

Nós impusemos a restrição de que os rádios cognitivos não gerem um nível inaceitável de interferência nos sistemas licenciados (legados) que funcionem na mesma frequência. Para conseguir isso, um rádio cognitivo deve primeiro detectar se uma banda de frequência está em uso. Assumindo que a banda está espacialmente e/ou temporariamente disponível, o rádio pode começar a utilizá-la.

A sua potência máxima de transmissão ficará limitada por uma série de fatores incluindo a proximidade do sistema licenciado, a taxa de perda devido à propagação do sinal, a presença de outros rádios cognitivos, a relação sinal-ruído (SNR) mínima na detecção do sinal e aspectos regulatórios.

Assim, os principais objetivos de nossa proposta são: alcançar escalabilidade, permitindo o seu uso tanto em pequenas redes, considerando o número de nós ou a

área coberta, até em redes com número elevado de nós, e com densidade ou grau de conectividade variado; permitir robustez, ou seja, obter efetividade no procedimento de redução da interferência frente à mobilidade.

## 1.2 Organização da Dissertação

Esta dissertação apresenta os conceitos gerais envolvidos na arquitetura completa, incluindo um modelo analítico, e detalha e avalia por simulação o que foi proposto. Para isto ela está organizada de forma que o Capítulo 2 apresenta inicialmente alguns conceitos sobre o espectro de RF e um pouco do debate regulatório acerca do assunto. Em seguida, são apresentados com um maior detalhamento os conceitos do rádio por *software* e a sua evolução, o rádio cognitivo.

O Capítulo 3 apresenta as formas principais de detecção da transmissão do usuário primário e o conceito de percepção cooperativa onde múltiplos rádios cognitivos trabalham juntos para a identificação das “oportunidades” no espectro de forma colaborativa.

Além disso, é analisada a ordem de complexidade do número de amostras necessárias para detectar, dentro de uma determinada probabilidade de erro, um sinal decodificável contra um sinal desconhecido. Também é mostrado que um radiômetro possui um desempenho pior do que um detector coerente, mas que o melhor detector para símbolos desconhecidos a partir de uma constelação de valor esperado de transmissão igual a zero comporta-se qualitativamente como um radiômetro.

O Capítulo 4 faz a descrição completa da arquitetura de rede (cognitiva) secundária, investigando a possibilidade de se utilizar esta rede em um ambiente onde haja a presença de um sistema licenciado (primário), também descrito neste capítulo, sem contudo causar-lhe interferência prejudicial.

Além disso, apresenta uma proposta de modelo analítico para a questão do aproveitamento do espectro e são mostradas as limitações devido à interferência. Em seguida, a parte de detecção das oportunidades é discutida e usando a SNR do sinal recebido como um estimador para distância é mostrado que é possível para o usuário secundário variar sua potência de transmissão enquanto evita interferir prejudicialmente nos usuários primários. Como consequência, uma regra de controle de

potência é apresentada usando esse conceito, seguindo nossa proposta em [21].

O Capítulo 5 descreve a implementação da arquitetura em ambiente de simulação, assim como os resultados obtidos. Para isto ele está dividido em quatro seções: a primeira relativa aos detalhes da implementação; a segunda à geração de cenários utilizados para avaliação; a terceira sobre as métricas utilizadas; e a quarta e última sobre os resultados obtidos.

O Capítulo 6 finaliza com as conclusões sobre os resultados obtidos, discorrendo sobre as principais contribuições e são apresentadas as idéias para os trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Espectro de Frequências, o Rádio por Software e o Rádio Cognitivo

Este capítulo apresenta inicialmente alguns conceitos sobre o espectro de RF e um pouco do debate regulatório acerca do assunto.

Em seguida, são apresentados com um maior detalhamento os conceitos de rádio por *software* e a sua evolução, o rádio cognitivo, e os projetos que os envolvem.

### 2.1 Regulamentação e Uso Efetivo do Espectro de Frequências

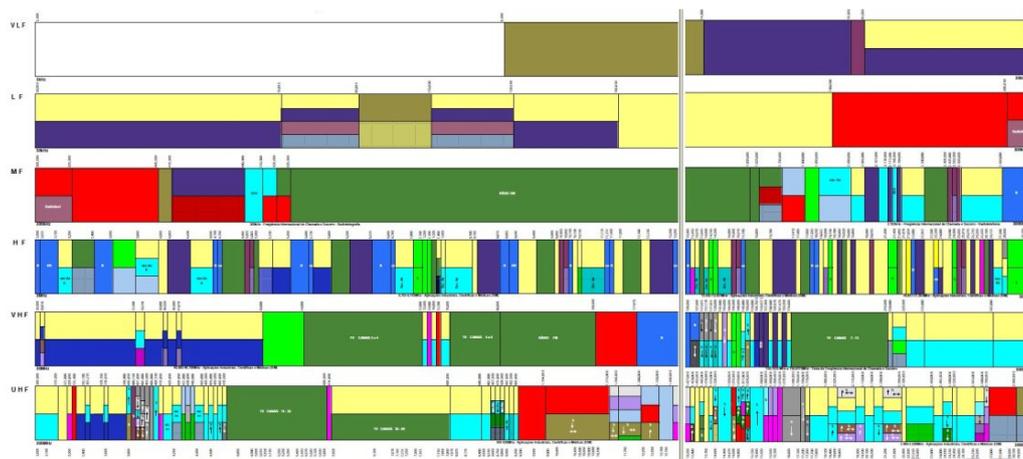


Figura 2.1: Quadro de atribuição de faixas de frequências no Brasil (melhor visualizado no formato original [1]).

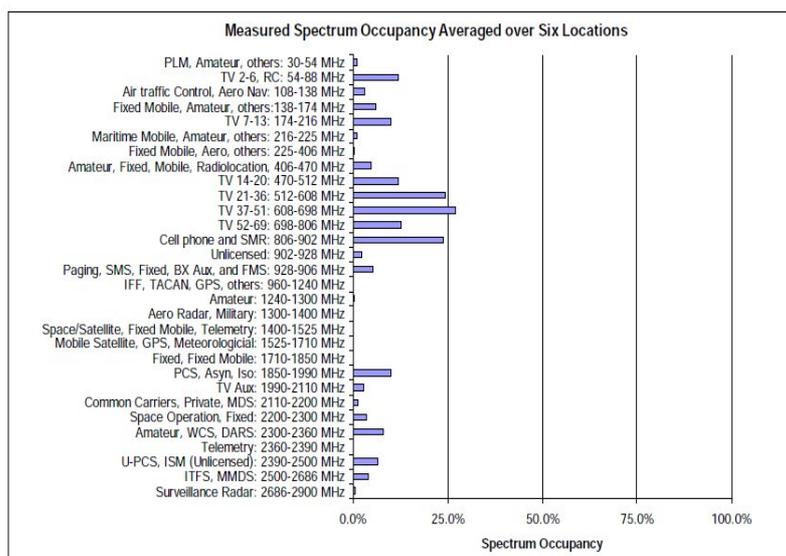


Figura 2.2: Ocupação do espectro [2].

Tradicionalmente, as agências reguladoras de telecomunicações alocam bandas do espectro de RF para um único uso, emitindo licenças de uso exclusivo para uma única entidade dentro de uma área geográfica, e proibindo outros dispositivos de efetuarem transmissões dentro destas bandas. Olhando para o quadro de atribuição de faixas de frequências no Brasil (Figura 2.1) [1], parece que o espectro está totalmente preenchido. No entanto, a atribuição de frequências é apenas uma parte desse contexto. Ao contrário do que se imagina, as medições reais mostram que a maior parte do espectro de RF atribuído é pouco utilizado<sup>1</sup> (Figura 2.2) [2].

Baseado no estudo feito pela Universidade do Kansas e publicado em 2005 [2], a ocupação do espectro de RF é baixa, pouco mais de 5% em média para as localidades medidas na faixa de frequências iniciando em 30MHz até 3000MHz. Assim, pelo modelo atual de consignação do espectro, cerca de 94% do espectro de frequências na faixa citada ficam subutilizados, devido às restrições de uso impostas pela legislação, deixando possíveis usuários e serviços sem acesso por “falta de frequências livres”.

Claramente, o espectro está longe de estar totalmente ocupado. Como resultado, a “exclusividade” da política regulatória atual está sendo vista cada vez mais como desatualizada. Pareceres sobre a solução adequada, no entanto, variam.

A ANATEL iniciou seu atual sistema de leilão de espectro, onde o lance de maior

<sup>1</sup>Embora o estudo tenha sido feito para cidades americanas, pode-se entender que o fenômeno ocorre também em outras localidades.

valor financeiro é vitorioso, no pressuposto de que em um mercado eficiente este processo resultaria na atribuição das faixas de frequências para o seu uso mais valoroso. No entanto, o direito de uso exclusivo das faixas de frequências e a dificuldade de regulação do compartilhamento, ou uso não exclusivo, contribuíram para o grande aumento no uso de dispositivos de radiação restrita, dispensados da necessidade de licença de funcionamento e independentes de outorga de autorização de uso de RF, tais como os dispositivos baseados no padrão IEEE 802.11 [22, 23, 24].

Alguns estudiosos acreditam que permitir aos consignatários de faixas de frequências comercializá-las para usuários secundários resolveria este problema, seria a criação do chamado mercado secundário [25].

No 18º Encontro Telesíntese<sup>2</sup> ocorrido em 23 de junho de 2009, em São Paulo, a Conselheira da ANATEL Emília Ribeiro deu a seguinte declaração: “Outra tendência que se observa no debate sobre a gestão do espectro é a possibilidade de formação de um mercado secundário de radiofrequências, também denominado *spectrum trading*. Ele está associado à regulamentação de serviços no atacado, que estimulem o surgimento de operadores de rede capazes e interessados em realizar a exploração industrial de sua infraestrutura para todo o leque de serviços de telecomunicações. Com efeito, o modelo se apresenta bastante tentador do ponto de vista da promoção da eficiência econômica do uso do espectro.”

Nos E.U.A., onde a discussão está mais acirrada, os opositores dos mercados secundários tendem a favorecer uma solução *commons*<sup>3</sup> [26]. Ao remover os obstáculos do processo de licenciamento e autorização de utilização do espectro, um ambiente baseado na auto regulação do mercado poderia incentivar a inovação e maximizar a utilização do espectro de RF [27].

Outros defensores da idéia argumentam que o sucesso surpreendente dos dispositivos de rede sem fio é a prova de que dispositivos não licenciados podem coexistir em uma banda pouco regulamentada. No entanto, novas pesquisas são necessárias para estabelecer as bases para a tecnologia que os responsáveis políticos de ambos os lados assumem já existir.

Presumivelmente, qualquer que seja a política adotada, os dispositivos que

---

<sup>2</sup>Promovido pela Momento Editorial, o encontro discutiu os desafios da gestão do espectro.

<sup>3</sup>É o conceito de gerência do recurso comum pelos próprios utilizadores, no caso em questão, o próprio mercado.

acessarão este espectro compartilhado serão obrigados a fazê-lo sujeitos a alguma exigência de não-interferência nos usuários primários.

A detecção do sinal é, portanto, fundamental neste caso. Isto poderia referir-se a um dispositivo secundário decidir se uma determinada faixa de frequências está em uso, ou o consignatário da faixa de frequências decidir se a interferência extra que ele está percebendo é causada por um usuário secundário ou apenas flutuações aleatórias do ruído presente no canal.

Uma suposição comum é que os avanços tecnológicos permitirão que esses dispositivos coexistam sem graves implicações. A idéia é que parece razoável permitir que os dispositivos utilizem uma faixa do espectro se eles puderem fazer isso sem interferir com os dispositivos primários.

Uma estratégia seria permitir que dispositivos secundários possam transmitir em frequências que estão sendo ativamente usadas pelo usuários primários. Esta é a abordagem adotada por sistemas de banda ultra-larga (UWB), que efetivamente espalham sua energia sobre uma grande largura de banda para minimizar as interferências que causam nos outros sistemas [28].

Uma estratégia alternativa seria que o dispositivo secundário transmitisse apenas nas frequências que não são utilizadas localmente ou temporalmente. Isto permitiria que esses dispositivos utilizassem uma potência de transmissão maior em uma largura de banda estreita, melhorando a qualidade do sinal nos receptores, porém eles devem ser capazes de determinar quais as faixas de frequências disponíveis.

A tecnologia do rádio cognitivo (Seção 2.3) adota essa abordagem, ajustando dinamicamente as suas transmissões em resposta ao seu ambiente [7, 29]. Outra de suas possibilidades é a busca de bandas de frequências não utilizadas (ou subutilizadas) e, com isso, o rádio cognitivo pode aumentar a eficiência do uso do espectro de RF.

Entretanto, o desenvolvimento de dispositivos sem fio capazes de realizar essas tarefas continua a ser um tema atual de pesquisa. E dentre as tecnologias promissoras para o desenvolvimento de sistemas capazes de aproveitarem melhor o espectro destacam-se o rádios definido por *software* e o rádio cognitivo, que serão detalhados nas seções seguintes.

## 2.2 Visão Geral do Rádio por Software

No início, os rádios foram concebidos com tarefas específicas em mente, como um rádio AM/FM ou receptor de televisão. Mesmo muitos dispositivos contemporâneos operam desta maneira, tais como os comunicadores portáteis e os dispositivos de acesso às redes Wi-Fi.

Os telefones móveis partilham muitas destas características, enquanto dedicados a um único serviço, ou seja, comunicações de voz, mas isso vem mudando. Os modernos celulares geralmente fornecem muitos “modos” diferentes ou formas de onda<sup>4</sup> para redes e frequências diferentes, bem como a capacidade de enviar mensagem de texto. Alguns já estão equipados com rádios compatíveis com os padrões Bluetooth<sup>5</sup> e Wi-Fi para ampliar a sua utilização e capacidades para serviços diferentes. Estes dispositivos tornaram-se mais complexos ao incluírem técnicas como controle adaptativo da potência de transmissão ou adaptação da modulação em resposta à qualidade do sinal.

O rádio definido por *software* é um rádio que possui a maior parte das funcionalidades de radiofrequência e frequência intermediária (FI), incluindo a síntese da forma de onda, no domínio digital (ao invés do analógico), permitindo uma grande flexibilidade nos seus “modos” de operação (chamados “personalidades” [29]). A idéia evoluiu do *rádio digital programável* (PDR) [30], um termo aplicado aos rádios que usam uma combinação de técnicas de seleção de *hardware* por *software* para acessar mais de uma banda de RF através da escolha de modos de interface aérea.

O termo *rádio definido por software* (RDS) foi criado em 1991 por Joseph Mitola III que publicou o primeiro artigo sobre o tema em 1992 [31]. Embora o conceito tenha sido proposto pela primeira vez em 1991, esta idéia tem suas origens na década de 1970 em pesquisas voltadas para o setor de Defesa, nos E.U.A. e Europa [32].

Devido à abrangência que o termo adquiriu ao longo do tempo, a sua definição formal pelo ITU-R ainda não foi estabelecida, sendo prevista para junho de 2010 [33].

---

<sup>4</sup>Diferente do significado comum, que é a representação gráfica da forma com que uma onda evolui ao longo do tempo, por forma de onda, neste contexto, entendem-se todos os parâmetros que definem a forma como o rádio transmite e recebe informações, incluindo potência de transmissão, frequência de operação, modulação, formatação de pulso, taxa de símbolo, codificação e etc..

<sup>5</sup>É um protocolo aberto para troca de dados sem fio em distâncias curtas a partir de dispositivos fixos e móveis criando a chamada rede pessoal (PAN).

Segundo o ITU-R [33], a proposta atual de definição do RDS é a seguinte: “um transmissor de rádio e/ou receptor empregando uma tecnologia que permite que os parâmetros de funcionamento, incluindo, mas não se limitando a faixa de frequência, tipo de modulação ou potência de saída, possam ser fixados ou alterados por *software*, excluindo alterações nos parâmetros de funcionamento que ocorrem durante a sua pré-instalação e pré-operação de acordo com as especificações do sistema ou norma padrão”.

O rádio definido por *software* pode ser entendido como um sistema de radiocomunicação onde a maior parte do processamento do sinal, na camada física, é feito através de *software*. O processamento de sinais engloba modulação, correção de erro, espalhamento, filtragem, atribuição de frequência, sincronização, e assim por diante.

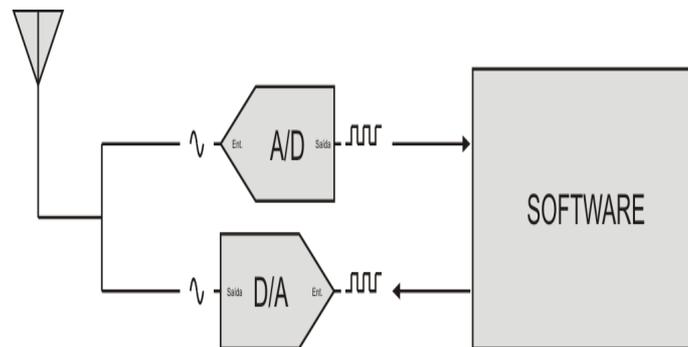


Figura 2.3: RDS ideal.

A Figura 2.3 mostra o diagrama de um RDS ideal onde o sinal é recebido através de uma antena, convertido para o domínio digital através do conversor analógico para digital (ADC) e o restante do processamento de sinais é feito via *software*.

De modo semelhante, o transmissor executa todo o processamento de sinais via *software* e envia o sinal de RF para antena através do conversor digital para analógico (DAC).

Entretanto, para este tipo de sistema, os requisitos necessários para os DACs e ADCs excedem os limites práticos no tocante à faixa dinâmica, taxas de amostragem e largura de banda, por exemplo. Também existem limitações no desempenho quando executando todo esse processamento via *software* ao invés do uso de *hardware* dedicado [3].

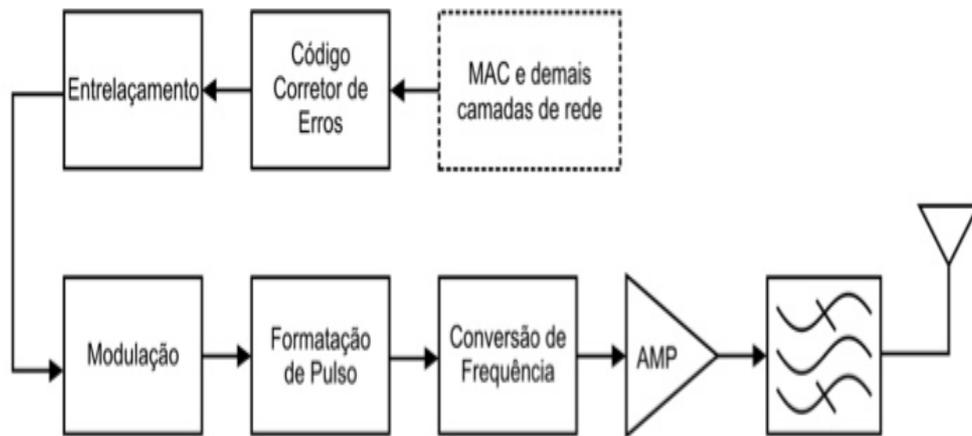


Figura 2.4: RDS real (parte de transmissão).

Dadas as limitações do RDS ideal, o que se faz na prática é executar em *hardware* algumas das manipulações necessárias de sinal enquanto processadores de diferentes tipos, tais como FPGAs, processadores digitais de sinais e processadores de uso geral podem lidar com outras partes do processamento.

A Figura 2.4 mostra um diagrama simplificado da parte transmissora de um RDS. A arquitetura escolhida para o RDS decide quais componentes devem ser implementados em *hardware* ou em *software*, e que tipo de processador deve executar o *software* baseado nas necessidades e nos compromissos estabelecidos para o seu desempenho.

As bases do RDS estão fundamentadas no uso do conjunto *hardware-software* com a finalidade de avançar o máximo do processamento interno do domínio analógico para o digital e do *hardware* para implementações em *software*, permitindo assim a flexibilidade, interoperabilidade e eficiência desejadas.

Avançando um pouco mais na linha evolutiva do rádio, vem os rádios com agilidade de frequência capazes de alterar como e onde eles operam dentro do espectro de RF, movendo-se entre conjuntos de faixas de frequência em resposta às interferências no canal ou outras restrições.

E finalmente, há o rádio cognitivo, comentado com maiores detalhes na Seção 2.3, no qual o dispositivo pode decidir autonomamente sobre o seu funcionamento, em

resposta a mudanças ambientais, tais como interferências no canal, por exemplo.

Indo mais além, chegamos ao rádio inteligente, que é a evolução do rádio cognitivo dotada da capacidade de aprendizado autônomo a partir de dados coletados por sensores ou disponíveis em base de dados.

Provavelmente o maior benefício da tecnologia RDS é a sua flexibilidade. O desenvolvimento de *software* para executar processamento de sinais oferece grandes oportunidades para melhorar o ciclo de desenvolvimento.

A partir da perspectiva do funcionamento, o desenvolvimento e a depuração de um *software* é muito mais fácil, prático e de melhor custo-efetivo sobre a concepção e produção de *hardware*, como um circuito integrado para aplicações específicas (sigla ASIC), por exemplo, onde a curva de desenvolvimento é longa e dispendiosa.

Olhando pela perspectiva do prestador do serviço, o RDS oferece um serviço ágil de atualização e correção em sistemas implantados. Se um novo sistema ou forma de onda é necessária, desde que haja suficiente poder de processamento, as atualizações de *software* podem ser efetuadas com os sistemas em uso em tempo real. Esta capacidade reduz os custos de desenvolvimento e implantação e o tempo para efetivá-los, tendo como consequência a redução dos custos para o prestador de serviços.

Outro benefício além desses dois é o conceito de reutilização de *software*. Quando escrito com um conceito de código modular, o *software* desenvolvido pode ser portado entre processadores com poucas adaptações.

Entretanto, isso não é inteiramente o que acontece atualmente, pois embora existam RDS funcionando sobre um processador de uso geral (GPP), muitas plataformas RDS estão sendo construídas em torno de FPGAs, onde a linguagem usada no desenvolvimento do *software*, geralmente VHDL, é de muito baixo nível não permitindo a abstração suficiente para ser independente da plataforma.

A tendência é que isso evolua para sistemas realmente portáteis e independentes a medida que a influência da comunidade científica afete as práticas de desenvolvimento da tecnologia RDS. Nos sistemas baseados no GPP, contudo, a portabilidade do código é a maior vantagem.

Naturalmente, todos os benefícios do RDS vêm com um custo, especificamente em termos de consumo de energia, velocidade de processamento e eficiência. Para

o *hardware*, o projetista pode otimizar um circuito ou um CI para uma finalidade específica que irá proporcionar o processamento necessário com o consumo de energia mais baixo possível, por isso o nome circuitos integrados de aplicação específica (ASIC).

Por outro lado, o uso do GPP fornece os conceitos de flexibilidade e de reutilização de *software* discutidos anteriormente, entretanto, sem atingir o mesmo desempenho de um sistema dedicado de *hardware* para uma forma de onda em particular.

Desta forma, muitos destes problemas são desafios de engenharia que atravessam uma variedade de disciplinas. O desenvolvimento da tecnologia de processadores de núcleos múltiplos, os conjuntos de instruções avançadas como o SIMD e o uso do grande poder de processamento da unidade de processamento gráfico (GPU) para efetuar operações de alto custo computacional [34] são novos recursos que poderão ser usados para melhorar o desempenho dos RDS.

Atualmente, o uso do processador GPP de núcleos múltiplos tem contribuído significativamente para o aumento do poder de processamento, que tende a crescer ainda mais, especialmente com conceitos como o utilizado no processador IBM CELL [35] e nos futuros processadores assimétricos com núcleos múltiplos. Uma outra vantagem dos processadores multi-núcleos e do uso de sistemas com múltiplos processadores é que as operações podem ocorrer em paralelo.

E a paralelização se presta diretamente ao uso em RDS. Primeiro, a paralelização permite que os caminhos de recepção e transmissão funcionem simultaneamente. Em segundo lugar, quando um fluxo de dados for segmentado em blocos de amostras, os diferentes núcleos podem processar cada bloco ao longo de cada caminho.

Com esta estrutura, o RDS pode processar tarefas diferentes, tais como sincronização de relógio, demodulação, decodificação, em paralelo.

A partir de meados da década de 1990, a DARPA, órgão de pesquisa ligado ao Ministério da Defesa dos E.U.A. (DoD), e o próprio DoD financiaram e influenciaram vários projetos que foram de grande importância para o desenvolvimento do RDS. - **SPEAKeasy** [36, 37].

Foi um planejamento conjunto do DoD e da DARPA que surgiu devido aos problemas de interoperabilidade que foram experimentadas durante operações mi-

litares. O projeto procurou desenvolver um rádio que permitisse a coexistência de múltiplas formas de ondas em múltiplas frequências no mesmo dispositivo e que fosse compatível com os equipamentos legados.

Juntamente com a pesquisa básica no seu projeto estava incluído a produção de um protótipo. O protótipo inicial, apresentado em 1995, demonstrou operação multi-banda, programabilidade e possibilidade de servir como ponte entre entidades comunicantes. As pesquisas e o desenvolvimento de protótipos continuaram até o final de 1998.

Algumas idéias-chave e conceitos de RDS surgiram durante o desenvolvimento deste sistema. Vislumbrou-se a necessidade de uma arquitetura de *software* que pudesse desassociar o *hardware* da estrutura de *software* do rádio.

Isso permitiria o avanço da parte de *hardware* independentemente da arquitetura de *software*. A fim de facilitar a manutenção da rádio, os desenvolvedores criaram um mecanismo para atualização do *software* do rádio *over-the-air*, outra novidade.

Este projeto foi certamente um marco para os primeiros RDS em funcionamento e muitas das novas idéias e inovações que se seguiram tiveram raízes durante a sua vigência.

#### - ***Joint Tactical Radio System (JTRS)*** [38, 39].

Baseado em conceitos que faziam parte do projeto SPEAKeasy e em necessidades futuras vislumbradas pelos militares americanos [40], este programa, iniciado em 1997, pretende desenvolver e adquirir centenas de milhares de RDS, que são esperados para interoperar com os sistemas existentes e fornecer capacidade de comunicação adicional para acessar mapas e outros dados visuais, comunicar por voz e vídeo com outras unidades militares e níveis de comando e obter informações diretamente dos sensores nos campos de batalha (Figura 2.5).

Os RDSs a serem desenvolvidos vão desde terminais de baixo custo, com limitação de funcionalidades, até rádios avançados multi-banda, multi-modo e multi-canal, capazes de utilizar canais em banda larga e banda estreita, suporte a múltiplas formas de onda e possibilidade de funcionamento em rede, formando redes *ad hoc* móveis (MANET).

O seu principal objetivo é o desenvolvimento de uma família de rádios para uso militar capazes de atender a crescente necessidade de expansão de banda, sejam

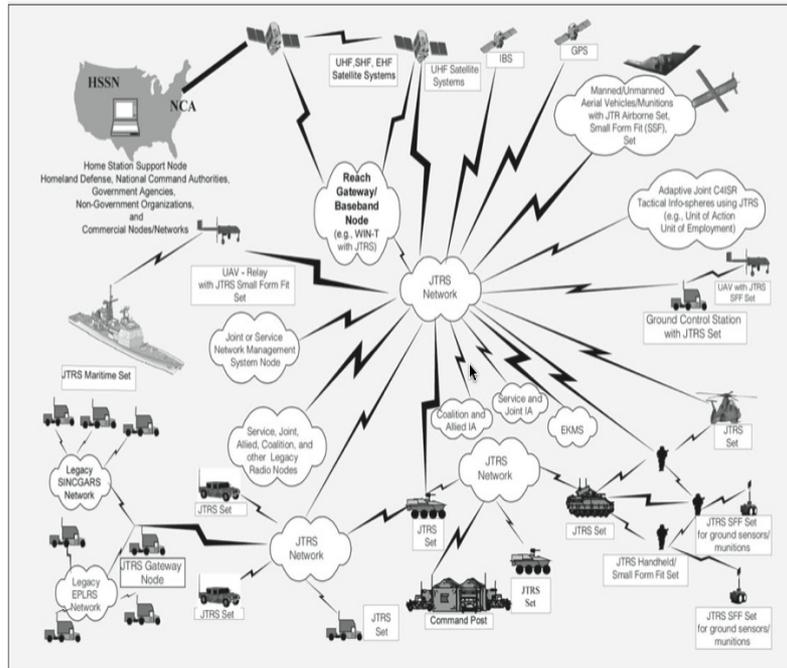


Figura 2.5: Programa JTRS.

interoperáveis e escaláveis, além de ter custo compatível com o mercado. Para isso, a utilização de arquiteturas abertas de *software* e *hardware* foi adotada.

Um componente essencial do JTRS é o *Software Communications Architecture* (SCA). A SCA é uma arquitetura aberta que utiliza CORBA<sup>6</sup> para a estrutura e o funcionamento do RDS.

Os componentes críticos da arquitetura são as regras para a carga de novas formas de onda, execução de aplicações e integração de sistemas. A estrutura de *hardware* da SCA (SCA/HW) determina as especificações mínimas para a parte de *hardware*, assegurando que o *software* escrito seguindo a SCA funcionará sobre o *hardware*.

Embora esta abordagem tenha fundamentação, existem inúmeras deficiências. Primeiro, ela se desenvolveu em um projeto complexo. Em segundo lugar, ela não oferece flexibilidade para as necessidades emergentes de um sistema dinâmico, como um rádio cognitivo. Por último, não é bem orientada para implementações leves.

A SCA está atualmente na versão 2.2.2 e foi adotado como um padrão pelo *Object*

<sup>6</sup>É um padrão estabelecido em 1991 pelo *Object Management Group* (OMG) que permite que componentes de *software* escritos em diferentes linguagens e sendo executados em diferentes computadores funcionem em conjunto.

*Management Group*<sup>7</sup> (OMG ).

O programa já produziu alguns modelos de equipamentos, porém os custos iniciais de desenvolvimento e produção foram em muito ultrapassados, devido aos desafios tecnológicos, e o programa foi reestruturado no início de 2006 [41]. Apesar disso, novos investimentos estão em andamento e novos equipamentos deverão ser disponibilizados nos próximos anos.

- ***Rapidly Deployable Radio Network (RDRN)*** [42].

Este projeto, também pioneiro no uso do RDS, ocorreu no período de 1994 a 1999 e procurou tratar os problemas na implementação de comunicações sem fio móveis, adaptativas e de fácil utilização, com o objectivo de criar arquiteturas, protocolos, *hardware* e *software* para o protótipo de uma rede de alta velocidade que pudesse ser implantada rapidamente em zonas de conflitos armados ou de catástrofes civis em que faltassem infra-estruturas de comunicação.

Os pesquisadores criaram uma rede ATM<sup>8</sup> sem fio de alta velocidade que era adaptativa, tanto na camada de enlace quanto na de rede, permitindo uma rápida implementação. O seu conceito de funcionamento foi o de implementar um *backbone* de *switches* que se autoconfigurava em uma topologia adequada e que permita aos usuários acessar o *backbone* através de uma arquitetura do tipo celular.

O projeto incorporava o controle digital dos lóbulos de irradiação da antena, rádios programáveis, protocolos adaptativos de camada de enlace e gerência de mobilidade dos nós da rede. O protocolo de camada de rede adotado aliado ao feixe de antenas utilizado no projeto foi a base para a sua topologia de enlaces ponto-a-ponto. Além disso, havia a capacidade de mudar a modulação, o comprimento do quadro e ligar/desligar a correção de erro (FEC) nos quadros da camada de enlace.

O próximo passo do projeto, que ainda não ocorreu, seria o desenvolvimento de um algoritmo para ser executado no processador do rádio, permitindo ajustes

---

<sup>7</sup>É um consórcio de empresas privadas ligadas à indústria de computadores, sem fim lucrativo, fundado em 1989, com objetivo inicial de estabelecer padrões para sistemas distribuídos orientados a objeto e, atualmente, efetuando modelagem de sistemas, de processos, de negócios, além de estabelecer normas para esses processos.

<sup>8</sup>É um método de transferência de dados orientado a pacotes desenvolvido em meados de 1980 que usa a técnica da multiplexação por divisão de tempo assíncrona sendo implementado como um protocolo de rede. O ATM utiliza um modelo orientado a conexão e estabelece um circuito virtual entre dois pontos antes da troca de dados reais se inicie.

dinâmicos do nível de potência de transmissão, codificação, direcionamento do feixe de antena, tipo de modulação e vazão.

- ***Virtual Radio: empresa VANU Inc.*** [43].

Por volta de 1995 houve um grande interesse na transição de *hardware* dedicado para processadores de uso geral dentro da tendência de adoção da tecnologia do RDS. Em sua tese de doutorado [44], Vanu Bose demonstrou que era possível implementar o processamento de sinais em tempo real sobre um GPP, mesmo com alta taxa de dados e computacionalmente intenso. Este esforço formou a base de sua tese e depois da sua empresa, Vanu Inc. [43].

Seu trabalho de doutorado produziu um RDS capaz de funcionar em um processador de uso geral, comprovando que um rádio que pudesse adaptar e alterar as suas características de funcionamento em tempo real poderia trazer um impacto significativo na comunicação sem fio.

Em novembro de 2004, a estação rádio-base de tecnologia GSM desenvolvida por ele tornou-se o primeiro dispositivo RDS a concluir com sucesso o processo de certificação pelo FCC [45]. A MidTex Celular foi a primeira empresa a implantar comercialmente o sistema, chamado *Anywave*, e capaz de realizar atualizações remotas de software, permitir que múltiplos padrões coexistam na rede (no caso, CDMA e GSM) e, principalmente, reduzir consideravelmente os custos de manutenção das estações rádio-base [46].

- ***End-to-End Reconfigurability (E<sup>2</sup>R)*** [47].

Este projeto, iniciado em 2004, é o mais proeminente dentre uma série de esforços europeus valendo-se do potencial do RDS e pretende desenvolver modelos e protótipos de sistemas focados na perspectiva fim-a-fim. Em sua segunda fase, o projeto está se concentrando na produção de plataformas que vão desde telefones celulares avançados para o consumidor até ferramentas de gestão do espectro para o agente regulador.

Neste programa, estão sendo desenvolvidos conceitos e soluções a fim de habilitar, gerenciar e controlar a conectividade fim-a-fim em ambientes altamente heterogêneos considerando as diferentes tecnologias de acesso rádio em atividade (rede celular 2G/3G, IEEE 802.X, *broadcast*, etc.).

O principal objetivo do projeto é planejar, desenvolver, experimentar e demons-

trar a concepção arquitetônica de dispositivos reconfiguráveis e apoiar as funções do sistema com o objetivo de oferecer um amplo conjunto de opções de funcionamento para os usuários, fabricantes e agentes reguladores no âmbito de sistemas heterogêneos.

- **SoftMAC e MultiMAC** [48].

O *SoftMAC* é um sistema desenvolvido na Universidade do Colorado [49] para proporcionar um ambiente flexível para testes com protocolos MAC em redes sem fio. Ele utiliza uma placa de rede compatível com o padrão IEEE 802.11 b/g/a que possui *chipset* fabricado pela *Atheros Corporation* para construir um RDS com uma camada física pré-definida aliado à uma camada MAC flexível.

Internamente, o *chipset* Atheros oferece flexibilidade sobre o formato dos pacotes transmitidos, uma característica não muito comum em outros *drivers* de rede. O sistema fornece um *driver* que permite o controle sobre a camada MAC enquanto permite o uso de formas de ondas definidas pela camada física seguindo o padrão do IEEE 802.11 b/g/a.

O *MultiMAC*, também desenvolvido na Universidade do Colorado, pretende ampliar as funcionalidades do ambiente SoftMAC para resolver problemas nas áreas de alocação dinâmica de espectro e rádios cognitivos [50]. Primeiro, ele permite a coexistência de múltiplas camadas MAC com o mínimo impacto na comutação. Em segundo lugar, ele permite reconfigurar dinamicamente as camadas MAC e física de acordo com tipo de dado recebido, através de uma lógica interna do MultiMAC ou por seleção de um usuário, atingindo o chamado MAC cognitivo.

A camada MAC cognitiva agrega as funcionalidades de reconfiguração oferecidas pelo MultiMAC com inteligência computacional. Esta combinação permite que o algoritmo efetue decisões inteligentes sobre qual camada MAC deva ser usada e quais propriedades de camada física devem ser estabelecidas.

- **GNU Radio.**

Iniciado em 1998 é um projeto GNU, da Fundação do Software Livre<sup>9</sup> (FSF), para fornecer um RDS de código aberto distribuído sob os termos da licença pública GNU de uso geral (GPL) e uma das implementações de RDS mais populares [51].

---

<sup>9</sup>É uma corporação sem fins lucrativos, fundada por Richard Stallman, em 4 de outubro de 1985, para apoiar o movimento do software livre baseado no conceito de *copyleft*, que visa promover a liberdade universal para distribuir e modificar software para computador.

O objetivo é dar às pessoas comuns a capacidade de compreender o espectro de rádiosfreqüências e pensar em maneiras inteligentes para usá-lo.

O projeto começou como uma ramificação do código Pspectra que foi desenvolvido pelo projeto SpectrumWare<sup>10</sup>. Em 2004, o código foi reescrito completamente e hoje o projeto não contém qualquer parte do código Pspectra original. É importante observar que o código Pspectra foi utilizado como base para o RDS comercial desenvolvido por Vanu Bose.

Ele se apresenta como um pacote de software que fornece blocos de processamento de sinais, que são componentes discretos, para realizar uma tarefa específica. As aplicações são desenvolvidas primeiramente usando a linguagem de programação Python, enquanto a parte crítica de processamento de sinal é implementada em C++. Atualmente, o GNU rádio suporta muitos blocos de processamento de sinal e uma série de formas de onda. Assim, o desenvolvedor é capaz de implementar sistemas RDS de tempo real com alta vazão em um ambiente de desenvolvimento rápido e de fácil utilização.

Embora não seja principalmente uma ferramenta de simulação, o GNU rádio suporta o desenvolvimento de algoritmos de processamento de sinais usando dados pré-gravados ou gerados, evitando a necessidade de *hardware* real.

A parte de *software* é importante, mas não suficiente para que haja interação com o domínio de radiofreqüência. Assim, uma interface aérea, ou de radiofreqüência, é necessária para fazer a conversão entre o domínio analógico de RF e o *software*. Um projeto de código aberto paralelo e independente ao do GNU rádio para fornecer uma interface aérea é o periférico universal para RDS (USRP) [53].

O USRP é uma placa que faz o processamento em FI da conversão de freqüências *up/down*, quantização, interpolação e filtragem. Junto com a placa USRP existe um conjunto de módulos desenvolvidos para tarefas específicas, como a parte de filtragem analógica de sinais, transmissão e recepção propriamente ditas e amplificação de RF.

Além do USRP outras interfaces aéreas podem ser utilizadas com o GNU rádio assim como outras plataformas de RDS podem usar o USRP.

---

<sup>10</sup>O projeto SpectrumWare teve o objetivo de pesquisar comunicação sem fio e processamento de sinais usando uma abordagem orientada para o *software* durante a década de 1990, no MIT [52].

Evoluindo o conceito do rádio por *software*, surge o rádio cognitivo, que agrega “inteligência” ao rádio e será melhor detalhado na seção seguinte.

## 2.3 Visão Geral do Rádio Cognitivo

Grande parte das pesquisas iniciais sobre RDS definiram as bases para a busca de sistemas de rádiocomunicação dotados de “inteligência”. Na maioria dos casos, a pesquisa e o desenvolvimento da tecnologia RDS buscava a construção de sistemas para resolver problemas específicos.

Vimos que os esforços do DoD estão centrados na portabilidade das formas de onda e na interoperabilidade dos sistemas. O projeto RDRN preocupou-se com a implementação rápida de redes de comunicação móveis em resposta às catástrofes. O trabalho do Dr. Vanu Bose estava voltado para resolução de problemas associados à transição de sistemas analógicos, ou circuitos dedicados (ASIC), para um processador de uso geral (GPP). Toda a atenção estava voltada para o desenvolvimento de *hardware* com maior desempenho e de estruturas de *software* interoperáveis.

Com a flexibilidade oferecida pelo RDS, o próximo passo seria o de utilizar a computação para poder adaptar mais que somente a forma de onda, utilizando melhor todo o sistema de comunicação disponível.

Na sua tese de doutorado [29], Joseph Mitola III, analisou a forma como a próxima geração de RDS poderia ser utilizada. Ele supôs que, dada a flexibilidade inerente ao RDS, um novo tipo de rádio inteligente poderia ser desenvolvido capaz de “perceber” o ambiente de RF e coletar as necessidades de comunicação dos usuários, agindo para satisfazer essas necessidades. A esse rádio inteligente ele deu o nome de rádio cognitivo. Pela definição proposta, o rádio cognitivo é uma classe de RDS que trabalha com base em um modelo de raciocínio e, pelo menos, um nível de sofisticação na utilização, planejamento e criação de regras de uso. Na sua visão, a realização de um rádio cognitivo se daria entre cinco a dez anos.

Ele descreveu como um rádio cognitivo poderia melhorar a flexibilidade dos serviços pessoais sem fios através de uma nova linguagem, chamada de linguagem de representação do conhecimento do rádio (RKRL) [29]. A RKRL é uma linguagem para descrever as características e capacidades de um rádio. Ela pode ser des-

crita como uma ontologia<sup>11</sup> do conhecimento do rádio. Suas pesquisas resultaram no desenvolvimento de uma arquitetura para rádios cognitivos e a formulação de um conjunto de casos de uso para rádios “computacionalmente inteligentes”. Além disso, ele desenvolveu um ambiente de simulação para testar a viabilidade da RKRL. O foco da simulação foi centrado no processamento da linguagem natural.

A experiência adquirida enquanto ele realizava sua simulação levou-o à formulação de sua arquitetura para o rádio cognitivo. Este trabalho foi um marco na pesquisa da tecnologia do rádio cognitivo, pois estabeleceu uma formalização do que significa para o rádio incorporar inteligência computacional. Ele descreveu 9 níveis de funcionamento que se relacionam com a funcionalidade de um dispositivo dito cognitivo [29].

- Nível 0 - Pré-programado
- Nível 1 - Orientado a metas
- Nível 2 - Conscientizado do contexto
- Nível 3 - Rádio Consciente
- Nível 4 - Capaz de Planejamento
- Nível 5 - Negociador
- Nível 6 - Aprendiz
- Nível 7 - Adapta Planos
- Nível 8 - Adapta Protocolos

Atualmente, os pesquisadores estão trabalhando em dispositivos que operam no nível 7 (adapta planos). No seu trabalho [29], Joseph Mitola descreveu também os possíveis passos que um rádio cognitivo poderia seguir para avaliar o seu ambiente, como observar, orientar, planejar, aprender, decidir e agir (Figura 2.6). Várias relações complexas podem ser definidas entre estes passos.

---

<sup>11</sup>É uma representação formal de um conjunto de conceitos dentro de um domínio e as relações entre esses conceitos. Ele é usado para raciocinar sobre as propriedades desse domínio, e pode ser usado para definir o domínio. Uma ontologia fornece um vocabulário comum, que pode ser

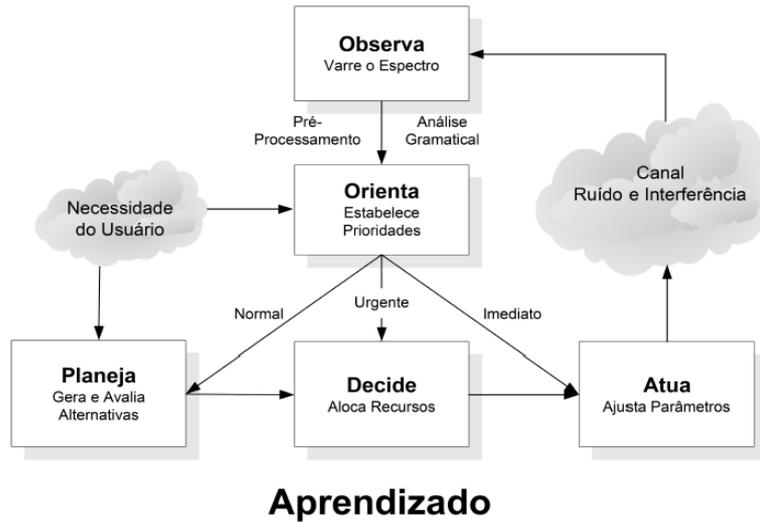


Figura 2.6: Ciclo de aprendizado do rádio cognitivo, segundo J. Mitola III.

O conceito de rádio cognitivo, desde então, evoluiu para o uso do rádio mais centrado na comunicação propriamente dita. Baseado em um sistema RDS reconfigurável, o rádio cognitivo usa sensores para coletar informações sobre o ambiente de RF onde ele se encontra e um algoritmo inteligente para reagir adequadamente às mudanças nesse ambiente e nas necessidades dos usuários, estabelecidas em uma determinada qualidade de serviço (QoS) [9, 3, 55].

A definição do rádio cognitivo está sob debate desde a sua introdução e até o presente momento a sua definição formal pelo ITU-R ainda não foi estabelecida, sendo prevista para junho de 2010 [33].

Segundo o ITU-R [33] a proposta atual de definição do rádio cognitivo é a seguinte: “um sistema rádio que emprega a tecnologia que permite ao sistema: obter o conhecimento do seu ambiente funcional e geográfico, regras (políticas) estabelecidas e seu estado interno; ajustar dinamicamente e autonomamente os seus parâmetros funcionais e os seus protocolos de acordo com os conhecimentos obtidos, a fim de atingir objetivos pré-definidos; e aprender a partir dos resultados obtidos.”.

No início, boa parte das pesquisas sobre o rádio cognitivo tratavam do conceito de acesso dinâmico ao espectro, ou seja, a capacidade de selecionar faixas de frequência usado para modelar um domínio - isto é, o tipo de objetos e/ou conceitos que existem e as suas propriedades e relações [54].

dinamicamente para permitir o compartilhamento e reuso do espectro. Embora esta seja uma das aplicações do rádio cognitivo, não é certamente a única. Os outros aspectos do desenvolvimento do rádio cognitivo se voltam para uma visão orientada para os serviços de comunicações em que todo o sistema de comunicações está adaptado para oferecer uma melhor qualidade de serviço (QoS).

Um rádio cognitivo atribui formas de onda e escolhe protocolos em tempo real usando um algoritmo cognitivo. Estas ações requerem componentes capazes de desempenhar três funções:

- Percepção: sensores que recolhem dados oriundos de fatores externos (condições do canal de comunicações, outros rádios, regras, necessidades dos usuários) e de fatores internos (formas de onda, poder computacional disponível, consumo de bateria).
- Concepção: um núcleo inteligente que aprende e compreende como combinar o conhecimento adquirido pelo mecanismo de percepção visando auxiliar o mecanismo de adaptação.
- Execução: um mecanismo de otimização e adaptação que altera o comportamento do rádio.

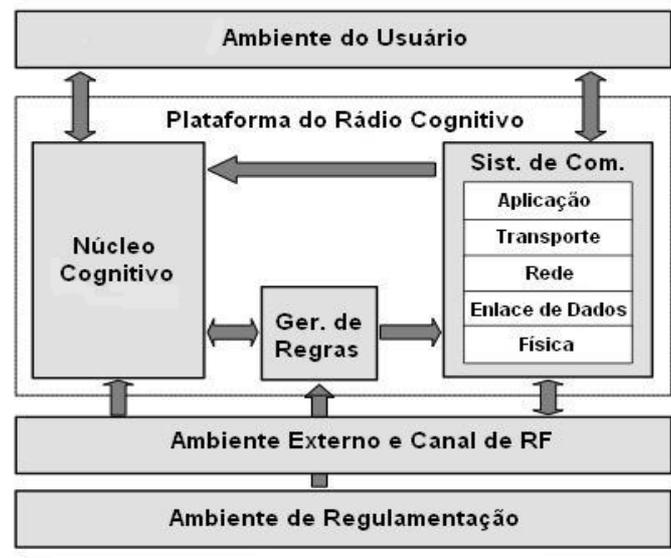


Figura 2.7: Arquitetura genérica do rádio cognitivo, segundo J. Mitola III.

A Figura 2.7 apresenta uma arquitetura genérica para o rádio cognitivo, segundo J. Mitola III.

O *núcleo cognitivo* é um sistema separado que se utiliza das informações do usuário, do ambiente de RF e no conjunto de regras para obter instruções sobre a melhor forma de controlar o sistema de comunicação. Esta estrutura funciona bem como uma arquitetura generalizada, uma vez que não faz recomendações sobre a forma como o núcleo cognitivo deve se comportar durante o processo de mapeamento das interações com os demais sistemas. O próprio sistema de comunicação é apresentado como uma pilha simplificada de protocolos, mais uma vez mostrando a independência do núcleo cognitivo do restante do sistema.

O *ambiente do usuário* informa ao núcleo cognitivo quais as necessidades de desempenho de serviços e aplicações, que são relativos à qualidade do serviço (QoS) desejada para o sistema de comunicações. Uma vez que cada aplicação requer níveis de QoS diferentes, por exemplo limites de velocidade e latência, este ambiente define as metas de desempenho do rádio.

O *ambiente externo*, incluindo informações sobre o canal de RF, fornece informações sobre o ambiente externo para estabelecer o comportamento do rádio nos processos de transmissão e recepção. Diferentes ambientes de propagação provocam mudanças no desempenho das formas de onda e na escolha da arquitetura ótima do receptor.

Um ambiente de propagação com múltiplos caminhos requer um receptor mais complexo do que o utilizado em um ambiente onde predomina a visada direta. O ambiente externo também desempenha um papel significativo no desempenho e nos processos de adaptação. Estas informações do ambiente externo ajudam a fornecer limites de otimização sobre o processo decisório e sobre o desenvolvimento das formas de onda.

Finalmente, o *ambiente de regulamentação* trata as regras determinadas pelos órgãos reguladores, que estabelecem restrições relacionadas ao uso otimizado do espectro e à máxima potência de transmissão.

Importantes ações reguladoras referentes à tecnologia do rádio cognitivo tramitando na FCC incluem a proposta para uso do RDS [56], a proposta de uso do espectro ocupado pela TV analógica [57] e a recente proposta para utilização da

faixa de frequências a partir de 700 MHz para uma rede pública de salvaguarda [58].

Tendo-se em conta que o primeiro RDS disponível comercialmente surgiu apenas recentemente (2005) [45], a aplicação da tecnologia do rádio cognitivo pode ser vista no programa XG [59], na norma IEEE 802.22 [60, 61] e no IEEE P.1900 [62], conhecido como *Standards Coordinating Committee* (SCC) 41.

#### - DARPA *neXt Generation Communications*.

O projeto *neXt Generation Communications* (XG), sob controle da DARPA, pretende desenvolver um sistema de acesso dinâmico ao espectro (DSA) que fornecerá comunicações militares “seguras” com mudança dinâmica da banda de frequências utilizada, evitando interferir com outras redes ou efetuando medidas *anti-jamming*.

A detecção, seleção e coordenação da utilização do espectro de RF, bem como um sistema operacional dedicado, são avanços significativos obtidos no projeto [59].

A meta é tornar possível aumentar a utilização do espectro em dez vezes sem causar interferências prejudiciais nos equipamentos legados. O projeto XG está desenvolvendo sistemas baseados na tecnologia do rádio cognitivo que funcionarão no nível 5 (negociador). Os objetivos do projeto serão atingidos através de trabalhos teóricos, simulação e desenvolvimento de novas plataformas de *hardware* e *software*.

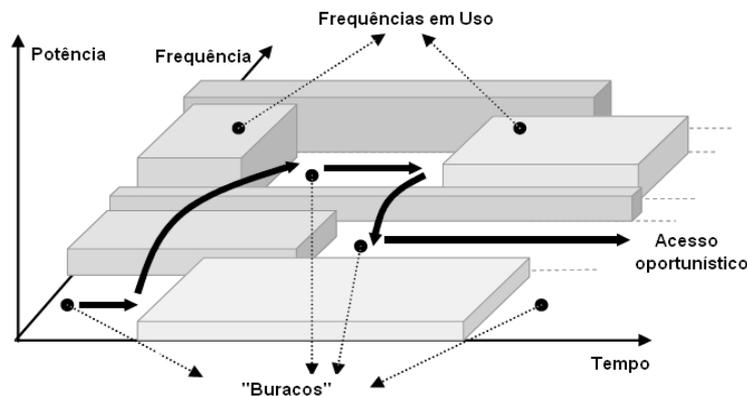


Figura 2.8: Lacunas no espectro devido ao baixo uso.

Além disso, o projeto XG procura criar uma forma de onda que combine canais de banda estreita não-contíguos. Essas formas de onda vão tirar proveito das lacunas no espectro tanto em frequência como no tempo (Figura 2.8). A dificuldade reside na capacidade de maximizar a utilização do espectro, permitindo mudanças de curta

duração na frequência utilizada, sem saturar a rede com a sobrecarga de mensagens de controle do protocolo.

**- IEEE 802.22.**

O desenvolvimento do padrão IEEE 802.22 (WRAN) destina-se a utilização da tecnologia do rádio cognitivo para permitir o compartilhamento do espectro localmente desocupado atribuído ao serviço de difusão de TV, em regime de não-interferência, para levar o acesso banda larga a regiões de difícil acesso, áreas de baixa densidade populacional, ambientes rurais, e por isso é oportuna e tem o potencial para uma ampla aplicabilidade em todo o mundo [63].

Os dispositivos compatíveis com o padrão, de tipo fixo ou portátil (pessoal), operarão nas bandas de difusão de TV, faixa de V/UHF entre 54 e 862 MHz incluindo os canais e as bandas de guarda dos respectivos canais, garantindo que nenhuma interferência prejudicial seja causada ao funcionamento da difusão de TV analógica e digital, bem como aos dispositivos licenciados de baixa potência, como microfones sem fio [60, 61, 64]. Espera-se finalizar o padrão, cujos estudos iniciaram em 2004 [65], no primeiro trimestre de 2010, mas já está disponível o primeiro esboço da norma (*D1 draft*) e as discussões a respeito estão em curso [66].

Nos E.U.A., o IEEE, em conjunto com a FCC, está buscando uma abordagem centralizada para a descoberta de faixas de frequência disponíveis. Especificamente, cada estação-base teria um receptor GPS para obter a sua posição. Esta informação seria enviada de volta para servidores centralizados (que nos E.U.A. seriam geridos pela FCC), que responderiam com a informação sobre os canais de TV de acesso livre e faixas de proteção na área da estação-base.

Uma funcionalidade importante é a capacidade de efetuar a percepção distribuída. Os terminais-cliente fariam periodicamente a percepção do espectro e enviariam essas informações para a estação-base, que, de posse dessas informações, avaliaria se seria necessária uma mudança no canal utilizado ou não.

Outras propostas permitiriam somente a percepção local do espectro, onde a estação-base iria decidir por si quais canais estariam disponíveis para a comunicação. Uma combinação híbrida destas duas abordagens também é vislumbrada.

Há outras formas sugeridas pela FCC e pelo IEEE para evitar interferências, como: percepção dinâmica do espectro (detecção) e controle dinâmico de potência

de transmissão.

O objetivo pretendido para a camada física é oferecer um excelente desempenho, porém sem complexidades. Ela deverá ser capaz de se adaptar a diferentes condições e também precisa ser flexível para permitir o salto entre canais, sem erros na transmissão ou desconexões de terminais-cliente. Esta flexibilidade é também necessária para o ajuste dinâmico da largura de banda, modulação e para os esquemas de codificação.

O esquema de modulação utilizado será o OFDMA para os enlaces de subida e descida. Utilizando apenas um canal de TV com largura de banda de 6 MHz (em alguns países, eles podem ser de 7 ou 8 MHz) a vazão máxima aproximada é de 19 Mbps, até uma distância de 30 Km. Entretanto, a vazão e o alcance atingido não é suficiente para cumprir as exigências da norma. Para contornar esse problema, o recurso de agregação de canal (*channel bonding*) possibilita a utilização de mais de um canal para transmissão e/ou recepção. Isso permitirá que o sistema possua maior largura de banda, melhorando o desempenho global do sistema [66].

A camada MAC será baseada na tecnologia do rádio cognitivo, sendo capaz de se adaptar dinamicamente às mudanças no ambiente utilizando-se da percepção do espectro. A camada MAC será composta de duas estruturas: quadro e super-quadro.

Um super-quadro será formado por muitos quadros e terá um cabeçalho de controle de super-quadro (SCH) e um preâmbulo. Ambos serão enviados pela estação-base em todos os canais onde é possível transmitir e não causar interferência. Quando um terminal-cliente tornar-se ativo, ele efetuará a percepção do espectro, descobrirá quais canais estão disponíveis e neles receberá todas as informações necessárias para se conectar à estação-base [66].

Dois tipos diferentes de medição do espectro serão feitos pelos terminais-cliente: interno ao canal (*in-band*) e fora do canal (*out-of-band*). A medição interna ao canal consiste na percepção do canal atual que está sendo utilizado pela estação-base e terminal-cliente. Na medição fora do canal será feita a percepção dos demais canais existentes.

A camada MAC realizará ainda dois tipos diferentes de percepção, tanto internamente quanto fora do canal: percepção rápida (*fast sensing*) e percepção qualitativa (*fine sensing*). No primeiro tipo, a ação de percepção ocorrerá em velocidades in-

feriores a 1 ms por canal sendo realizada pelo terminal-cliente e pela estação-base, que irá reunir toda a informação e decidirá qual ação tomar. No segundo tipo, ela será mais lenta (cerca de 25 ms por canal ou mais) e será utilizado com base nos resultados obtidos com a percepção rápida. Ambos os tipos serão utilizados, principalmente, para identificar se existe um usuário primário transmitindo e se haverá necessidade de evitar a interferência com ele.

Para executar uma percepção confiável, no modo de funcionamento básico, em uma única banda de frequências, como descrito anteriormente, faz-se necessário estabelecer períodos de silêncio (*quiet times*) onde nenhuma transmissão é permitida. Esta interrupção periódica de transmissão de dados poderia comprometer a QoS dos sistemas baseados em rádios cognitivos. Esta questão é abordada por um modo de operação alternativo chamado salto dinâmico de frequência (DFH) [67], onde a transmissão de dados é feita em paralelo com a percepção do espectro, sem causar qualquer interrupção.

- **IEEE P.1900 Effort: Standards Coordinating Committee (SCC) 41.**

O *IEEE P1900 Standards Group* foi criado no primeiro trimestre de 2005 conjuntamente pelo *IEEE Communications Society* (ComSoc) e pela *IEEE Electromagnetic Compatibility Society* (EMC) com o objetivo é desenvolver padrões e normas em conformidade com as novas tecnologias e técnicas que estão sendo desenvolvidos para a rádio da próxima geração e para a gestão avançada do espectro.

Em março de 2007, o *IEEE Standards Board* aprovou a reorganização deste grupo que passou a ser chamado de *Standards Coordinating Committee 41* (SCC41), *Dynamic Spectrum Access Networks* (DySPAN).

O SCC 41 irá desenvolver normas relativas às redes capazes de acesso dinâmico ao espectro objetivando a melhor utilização do espectro. As novas técnicas e métodos de acesso dinâmico ao espectro requerem o gerenciamento das interferências, a coordenação das tecnologias sem fio e incluem gerenciamento de rede e compartilhamento de informações.

O *IEEE 1900 Committee* deixou de existir a partir de abril do mesmo ano. Os grupos de trabalho individuais são ainda chamados como IEEE P1900.x e atuam conforme a seguir:

- IEEE P1900.1: Termos, definições e conceitos de Gestão do Espectro, regras

de conduta, rádio adaptativo e RDS;

- IEEE P1900.2: Práticas recomendadas para análise de interferência e coexistência.
- IEEE P1900.3: Práticas recomendadas para a avaliação de conformidade dos módulos de *software* para RDS;
- IEEE P1900.a: Confiabilidade e avaliação da conformidade das regras de conduta para sistemas rádio com acesso dinâmico ao espectro<sup>12</sup>.
- IEEE P1900.4a: Norma para a arquitetura e interfaces para redes com acesso dinâmico ao espectro em faixas de frequência desocupadas;
- IEEE P1900.4.1: Norma para interfaces e protocolos com suporte à decisões distribuídos para uso otimizado do recurso de RF em redes sem fio heterogêneas;
- IEEE P1900.5: Linguagem e arquiteturas para estabelecimento de regras (políticas) para o gerenciamento do rádio cognitivo para aplicações capazes de acesso dinâmico ao espectro;
- IEEE P1900.6: Interfaces de percepção do espectro e estruturas de dados para acesso dinâmico ao espectro e outros sistemas avançados de comunicação por RF.

Em fevereiro de 2009, o IEEE aprovou o primeira norma estabelecida pelo SCC 41, “Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks”.

Vimos até o momento aspectos diversos da utilização do rádio cognitivo, porém estendendo um pouco o conceito do rádio cognitivo funcionando isolado para a sua utilização em conjunto, passamos a ter a chamada rede cognitiva.

A primeira definição a respeito [68], surgida em 2005, embora incompleta por não fazer menção clara sobre o conhecimento propriamente dito da rede (comparando

---

<sup>12</sup>Há uma possibilidade de fusão deste grupo de trabalho com o P1900.3.

com as características do rádio cognitivo definidas por Joseph Mitola III [29]), estabelece que “uma rede cognitiva é aquela com processos cognitivos capazes de perceber as condições instantâneas da rede e planejar, decidir, agir e aprender a partir das consequências dessas ações, tudo feito enquanto persegue objetivos fim-a-fim.”.

Desta forma, as redes cognitivas, ao contrário das demais redes (legadas), são capazes de adaptar o seu funcionamento (proativamente ou reativamente) em resposta à estímulos externos [11]. Isto é conseguido através de mecanismos que captam esses estímulos do ambiente e obtêm conhecimento a partir desta interação, planejando, em conformidade, suas ações futuras.

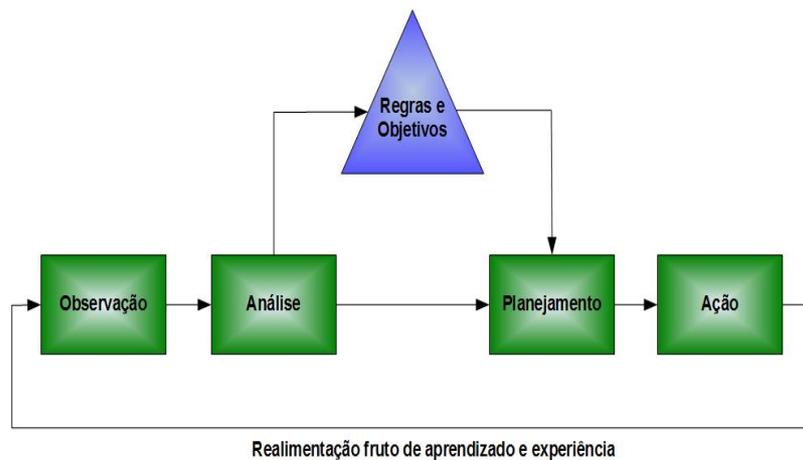


Figura 2.9: Ciclo de operação de uma rede cognitiva.

Este processo pode ser visualizado em um ciclo de operação (Figura 2.9). Este ciclo repete-se num processo de aprendizagem, que leva a cognição. O ciclo é guiado por um conjunto de regras e objetivos, que consideram as observações feitas no planejamento das próximas ações.

A rede cognitiva continuamente observa (monitora) o ambiente, procurando por possíveis mudanças que possam afetar a sua operação. A observação constitui a base para a decisão sobre o início do processo de reconfiguração. A rede pode “aprender” a partir dessas reconfigurações e utilizar esse aprendizado para tomar uma decisão futura, simultaneamente enquanto considera outros objetivos fim-a-fim. Nesta perspectiva, a rede cognitiva se utiliza de funções objetivo visando a otimização do desempenho [68].

No caso, os objetivos fim-a-fim podem ser entendidos como qualquer dos elementos da rede envolvidos na transmissão de dados. Para uma transmissão *unicast*,

poderíamos considerar, por exemplo, sub-redes, *switches*, conexões virtuais, esquemas de criptografia, o canal, interfaces ou formas de onda utilizadas. Os objetivos fim-a-fim são os que proporcionam, verdadeiramente, o enfoque de rede às redes cognitivas, separando-as de outras tecnologias, que possuem apenas um enfoque único, local.

Em alguns casos, como nas redes estáticas com comportamento previsível, não faz muito sentido evoluir para um comportamento cognitivo. Outros ambientes, como as redes (heterogêneas) sem fio, são melhores candidatas.

## 2.4 Conclusão

Ao longo deste capítulo é mostrado um pouco acerca da tecnologia do rádio por *software* e do rádio cognitivo, o histórico, as vantagens e desvantagens da sua utilização e os projetos (e produtos) onde essas tecnologias estão sendo aplicadas.

A medida que evoluem as plataformas de *hardware* capazes de suportar as suas funcionalidades (*software*), é esperado que a cada dia sejam lançados novos dispositivos de comunicação seguindo essas tecnologias, o que as consolidará, certamente, como a evolução do antigo conceito de “rádio”.

## Capítulo 3

# Detecção do Primário

A característica primordial do rádio cognitivo é a sua capacidade de se adaptar ao ambiente onde ele se encontra, possibilitando, por exemplo, o ajuste de suas transmissões para minimizar a interferência em outros sistemas. Em contrapartida, um grande problema que ele encontra é a detecção dos sinais transmitidos pelos usuários primários. Em outras palavras, o problema de detecção se apresenta de tal maneira que o detector precisa determinar se há um usuário primário transmitindo na faixa de frequências (ou canal) onde o usuário secundário intenciona funcionar em um determinado momento no tempo ou em alguma localização geográfica.

O rádio cognitivo, como usuário secundário, preocupa-se com a detecção tanto no tempo quanto em relação à sua localização. Se observarmos o quadro de atribuição de faixas de frequências no Brasil (Figura 2.1) vemos que há espaços no espectro (como as faixas destinadas às comunicações no mar, no ar ou aquelas destinadas à radiodifusão - TV e rádio) que poderiam estar disponíveis em áreas com grande densidade demográfica para uso não-licenciado. Se ninguém estiver transmitindo em um canal de radiodifusão em uma determinada cidade, por exemplo, a faixa de frequências correspondente a esse canal poderia se tornar disponível para aparelhos não-licenciados.

O intervalo de tempo em que pode ocorrer esta detecção do usuário primário é uma consideração importante. Pode parecer de pouca importância, por exemplo, a detecção de uso de um canal onde haja um transmissor local ativo durante horas (ou dias), mas a medida que mais aparelhos não-licenciados começam a compartilhar o mesmo espectro, as janelas de oportunidade para as transmissões individuais se

tornam cada vez menores.

E se o tempo de coerência do canal for mais curto que o tempo de detecção do rádio cognitivo, a correta determinação da desocupação da faixa poderá ser impossível. Desta forma, o rádio cognitivo que possuir um algoritmo de detecção com baixa eficácia terá problemas se o espectro estiver disponível durante intervalos de tempo curtos.

Outro fator importante é o tempo que o rádio leva para “mudar de canal”, especialmente no caso das faixas usadas para segurança pública, comunicações críticas ou atividades militares. Além disso, a complexidade computacional do detector é reduzida se a detecção for efetuada com uma menor quantidade de amostras do sinal.

Para realizar a detecção do primário algumas metodologias foram propostas. Nas seções seguintes serão abordadas com mais detalhes a detecção baseada na temperatura de interferência e a detecção do usuário primário transmissor.

Na sequência, será demonstrado que o detector ótimo para sinais desconhecidos e para constelações com valor esperado de transmissão igual a zero comporta-se, qualitativamente, como um radiômetro. E por fim, será discutido o conceito de percepção cooperativa onde múltiplos rádios cognitivos trabalham juntos para a identificação das “oportunidades” no espectro de forma colaborativa.

### **3.1 Detecção Baseada na Temperatura de Interferência**

Recentemente, surgiu um novo modelo para medir a interferência, chamado de *temperatura de interferência* [69, 18, 17, 14] (Figura 3.1), que mostra o decaimento do sinal de uma estação transmissora especificada para funcionar até o alcance onde a potência recebida se aproxima do nível do ruído (*noise floor*).

A medida que aparecem os sinais interferentes, o ruído aumenta em vários pontos dentro da área de cobertura, como indicado pelos picos acima do nível do ruído original. Ao contrário da abordagem tradicional, o modelo da temperatura de interferência controla o nível de interferência no receptor através do limite da temperatura de interferência, que é representada pela quantidade de “novas” interferências que o

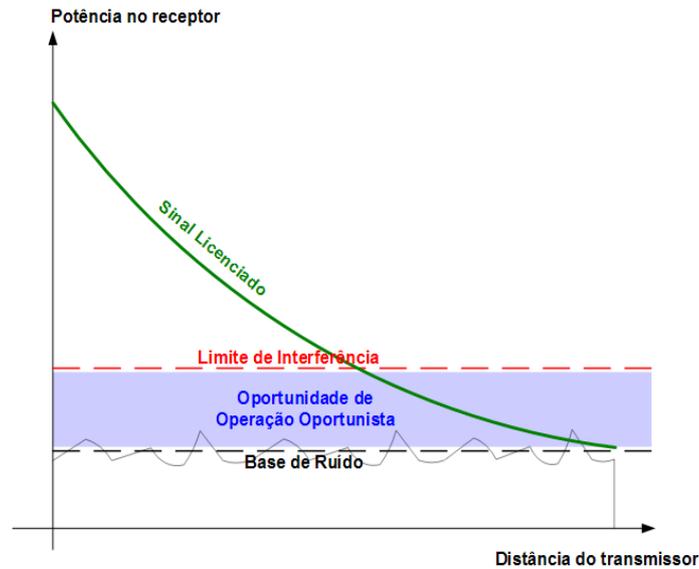


Figura 3.1: Modelo da Temperatura da Interferência.

receptor pode suportar.

Em outras palavras, o modelo da temperatura de interferência leva em consideração a energia de RF acumulada proveniente das múltiplas transmissões e estabelece um limite máximo tolerável. Contudo que os usuários do rádio cognitivo não excedam este limite com suas transmissões, eles podem compartilhar a mesma faixa do espectro.

Entretanto, existem algumas limitações na medição da temperatura de interferência. Por exemplo, este modelo descreve a interferência causada somente por um usuário não-licenciado, não considerando o efeito causado por múltiplos usuários.

Além disso, se os usuários não-licenciados não estiverem cientes da localização dos usuários primários próximos, a real interferência não poderá ser medida com o uso deste método.

Por esse e outros motivos, a agência reguladora das comunicações nos E.U.A, a FCC, decidiu, em maio de 2007, suspender a adoção da temperatura de interferência [69].

## 3.2 Detecção do Transmissor

O rádio cognitivo deve fazer distinção entre as faixas usadas e as não usadas do espectro. Desta forma, ele deverá ter a capacidade de determinar se o sinal do transmissor primário está presente em um determinado espectro numa dada região. A detecção do transmissor se baseia em detectar o sinal de um transmissor primário através de observações realizadas pelos usuários secundários.

Em [70], encontramos uma coletânea dos resultados e técnicas de detecção de sinais desenvolvidos nas últimas décadas. Desde então, alguns métodos foram propostos com essa finalidade: detecção por filtros casados [71], detecção por energia [72], detecção pela ciclo-estacionariedade do sinal [72], detecção pela envoltória do sinal [73], etc..

Nesta dissertação, a menos que especificado o contrário, consideraremos o ruído como sendo aditivo, branco e com distribuição gaussiana <sup>1</sup> (AWGN).

Desta forma, se considerarmos o problema de detecção do sinal na presença de ruído, o objetivo é fazer a distinção entre ter recebido somente ruído ou o ruído adicionado ao sinal de interesse. Podemos traduzir isso com as hipóteses:

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_0 : r(t) &= n(t) \\ \mathcal{H}_1 : r(t) &= h.s(t) + n(t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

Nas Equações 3.1,  $r(t)$  é o sinal recebido,  $h$  o ganho do canal,  $s(t)$  o sinal transmitido originalmente e  $n(t)$  o ruído. A seguir trataremos de alguns desses métodos de detecção do transmissor.

### 3.2.1 Detecção por Filtro Casado

Quando a informação do sinal do usuário primário é conhecida pelo usuário secundário, o detector ótimo em presença de ruído gaussiano estacionário é o filtro casado, uma vez que a relação sinal-ruído (SNR) recebida é maximizada [74].

Considerando as hipóteses descritas pela Equações 3.1, se  $n[k]$  é uma variável aleatória com distribuição gaussiana, de média nula e variância  $\sigma^2$ , representativa

---

<sup>1</sup>A suposição de “gaussianidade” do ruído é devida ao fato deste originar-se de diversas fontes independentes e é ela que notadamente mais reduz a capacidade do canal de comunicações.

do ruído e  $s[k]$  o sinal, ambos discretizados, e este sinal é conhecido no receptor, obtém-se a Equação 3.2, corresponde às condições para aceitarmos ou rejeitarmos  $\mathcal{H}_0$ , caso se utilize o detector ótimo, que no caso é o filtro casado [74, 75].

$$\sum_{k=1}^N r[k] \frac{s[k]}{\|\mathbf{s}\|} \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} \frac{\|\mathbf{s}\|}{2} \quad (3.2)$$

O filtro casado apresenta uma função de transferência igual ao complexo conjugado do sinal para o qual ele é “casado” e requer  $O(\frac{1}{SNR})$  amostras para atender a uma probabilidade de erro pré-determinada.

Enquanto a principal vantagem do filtro casado é que ele requer um tempo menor para atingir um ganho de processamento elevado, devido a sua coerência, a desvantagem é que ele requer o conhecimento antecipado de características do sinal do usuário primário, como o tipo e a ordem de modulação, forma do pulso e o formato do pacote de dados, por exemplo.

Portanto, se esta informação não for precisa, o filtro casado tem um desempenho ruim. Entretanto, uma vez que muitos sistemas de rede sem fio possuem sinal-piloto, sincronização, preâmbulos, essas informações podem ser usadas na detecção coerente.

### 3.2.2 Detecção pela Energia do Sinal

Se o receptor não puder reunir informações suficientes sobre o sinal do usuário primário (por exemplo, se somente a potência do ruído gaussiano for conhecida para o receptor) o detector ótimo é o detector por energia [74].

Considerando as hipóteses descritas pela Equações 3.1, se  $n[k]$  é o ruído e se o sinal  $s[k]$  na recepção for semelhante ao ruído gaussiano e tiver apenas a potência de transmissão ( $P$ ) conhecida, obtém-se a Equação 3.3, que corresponde às condições para aceitarmos ou rejeitarmos  $\mathcal{H}_0$ , caso se utilize o detector ótimo, que no caso será o detector por energia (radiômetro) [76, 74].

$$\sum_{k=1}^N (r[k])^2 \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} N \left( \sigma^2 + \frac{P}{2} \right) \quad (3.3)$$

Neste caso,  $O(\frac{1}{SNR^2})$  amostras são necessárias para atender a mesma probabilidade de erro.

Ainda considerando as hipóteses descritas pela Equações 3.1, se  $n[k]$  é o ruído e  $s[k]$  o sinal de interesse, ambos discretizados, e  $h[k]$  é o ganho do canal, a probabilidade de detecção,  $P_d$ , e a probabilidade de falso alarme,  $P_f$ , podem ser obtidas conforme as Equações 3.4 e 3.5 [77]:

$$P_d = P(\mathbf{r} > \lambda | \mathcal{H}_1) = Q_m(\sqrt{2.SNR}, \sqrt{\lambda}) \quad (3.4)$$

$$P_f = P(\mathbf{r} > \lambda | \mathcal{H}_0) = \frac{\Gamma(m, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(m)} \quad (3.5)$$

Onde  $m$  é o produto da banda utilizada pelo tempo,  $\lambda$  é o limiar de decisão,  $\Gamma(\cdot)$  e  $\Gamma(\cdot, \cdot)$  são as funções Gamma completa e incompleta e  $Q_m(\cdot)$  é a função de Marcum generalizada.

A partir das funções mostradas acima, enquanto uma baixa  $P_d$  resultaria em muitas falhas na detecção do usuário primário, que por sua vez aumenta a interferência para o próprio usuário primário; uma alta  $P_f$  resultaria em uma baixa utilização do espectro, uma vez que os falsos alarmes aumentam o número de oportunidades perdidas.

Enquanto a  $P_f$  é independente do valor de limiar  $\lambda$  pela ausência de sinal de usuário primário ( $\mathcal{H}_0$ ), quando o ganho do canal  $h$  varia devido aos efeitos de sombreamento/múltiplos caminhos, a  $P_d$  é dependente do valor instantâneo da SNR e também do limiar,  $\lambda$ .

Neste caso, a  $P_d$  torna-se uma média, ponderada pela função densidade de probabilidade da SNR sob os efeitos de sombreamento/múltiplos caminhos,  $f_y(x)$  [78], conforme a Equação 3.6:

$$P_d = \int Q_m(\sqrt{2.SNR}, \sqrt{\lambda}) f_y(x) dx \quad (3.6)$$

Entretanto, o desempenho do detector por energia é susceptível a incerteza na potência do ruído. Para resolver este problema, um sinal-piloto ou um preâmbulo proveniente do transmissor primário é usado para ajudar a melhorar a precisão do detector por energia [74].

Se o transmissor enviar um sinal-piloto simultaneamente com suas transmissões, podemos utilizar um detector secundário quase ótimo para detectar somente esse sinal-piloto com SNR baixa.

A partir desse ponto a detecção coerente através de um filtro casado resulta em ganho de processamento e uma redução substancial no número de amostras exigidas para a detecção, mesmo com sinais-piloto externamente fracos.

Uma outra consideração é que o detector por energia não pode diferenciar tipos de sinal, mas apenas determinar a sua presença. Assim, o detector de energia está sujeito à detecção falsa causada por sinais interferentes.

Pela maior facilidade na implementação e baixa complexidade computacional algumas pesquisas recentes sobre detecção do usuário primário adotaram o detector por energia [79, 77, 80].

### **3.2.3 Detecção pela Ciclo-estacionariedade do Sinal Transmitido**

Os sinais modulados são em geral acoplados aos sinais de portadoras, trens de pulsos, sequências de saltos ou prefixos cíclicos que causam uma periodicidade intrínseca, intencional ou não [81].

Estes sinais modulados são caracterizados como ciclo-estacionários, uma vez que sua média e autocorrelação exibem periodicidade [82]. Estas características podem ser detectadas ao analisar uma função de correlação no domínio da frequência [83, 84, 85].

A principal vantagem do uso da função de correlação para detecção do sinal do transmissor é que é possível diferenciar a energia do ruído da energia do sinal modulado. Isto é o resultado do fato de que o ruído ser um sinal estacionário de sentido amplo, sem correlação, enquanto os sinais modulados são ciclo-estacionários com correlação devido à redundância embutida da periodicidade do sinal.

Portanto, o detector ciclo-estacionário poderá ter um desempenho melhor que o do detector por energia na discriminação do ruído devido a sua robustez à incerteza na potência de ruído [85]. Entretanto, a sua implementação é complexa do ponto de vista computacional e requer um longo tempo de observação para obter bons resultados.

### 3.2.4 Detecção pela Envoltória do Sinal

Nos sistemas com padrões conhecidos de sinal, a detecção pode ser realizada correlacionando-se esse sinal conhecido na recepção com uma cópia de si mesmo [85, 86]. Dentre os padrões conhecidos estão os preâmbulos, blocos intermediários, padrões-piloto regularmente transmitidos, sequências de espalhamento e etc..

A detecção baseada na envoltória supera a detecção por energia em confiabilidade e tempo de convergência, com o desempenho do algoritmo de detecção aumentando a medida que o “comprimento” do padrão conhecido cresce. [85].

A partir de medidas, os resultados apresentados mostraram que a detecção com base na envoltória requer um tempo curto de medição, porém é sensível aos erros de sincronização [87].

### 3.2.5 Detecção por Outros Métodos

Um método alternativo de percepção do espectro é a detecção baseada na identificação da tecnologia de transmissão usada pelos usuários primários, o que permite que o rádio cognitivo obtenha um elevado conhecimento dimensional e uma alta precisão [88].

Essa idéia é utilizada no projeto do terminal ubíquo transparente [89], um projeto europeu que visa identificar a presença de algumas tecnologias de transmissão conhecidas e conseguir estabelecer comunicação através delas.

Outros métodos alternativos de detecção de usuários primários incluem a estimação espectral *multitaper* [9], a estimação baseada na transformada de Hough [90], a estimação baseada na transformada de *wavelet* [91] e a análise tempo-frequência.

### 3.2.6 Comparação Entre os Métodos de Detecção do Transmissor

A detecção com base na envoltória é mais robusta que o método de detecção por energia e aqueles baseados na ciclo-estacionaridade por causa do processamento coerente que advém do uso de componentes determinísticos do sinal [85]. Entretanto, deve haver uma informação antecipada sobre as características do sinal do usuário

primário, bem como, eles devem transmitir sinais-piloto ou padrões conhecidos.

O desempenho da detector por energia é limitado quando duas premissas comuns não se mantêm [87]: o ruído ser estacionário e sua variância ser conhecida. Outro problema importante é a presença de sinais interferentes [86].

Observou-se que o método baseado na ciclo-estacionariedade tem um desempenho pior que o do detector por energia quando o ruído é estacionário [81]. Contudo, na presença de interferência co-canal ou de canal adjacente, o ruído se torna não estacionário. Neste caso, os métodos com base no detector de energia falham enquanto os algoritmos ciclo-estacionários não são afetados [92].

Por outro lado, as características que são ciclo-estacionárias no sinal podem se perder completamente devido ao desvanecimento do canal [81]. Demonstrou-se em [93] que as incertezas do modelo provocam uma barreira de SNR para as características ciclo-estacionárias dos detectores similares às encontradas nos detectores de energia [74]. Além disso, o método baseado na ciclo-estacionariedade é vulnerável às compensações da amostragem [92].

Durante a seleção do método de detecção, alguns fatores como: a ocorrência de periodicidades, a existência de sinais-piloto regularmente transmitidos, a precisão necessária, exigências da duração da detecção, complexidade computacional envolvida e os requisitos da rede devem ser considerados, porém o principal deles é a característica dos usuários primários.

### 3.3 Detecção de Sinais BPSK Desconhecidos

Esta seção demonstra a detecção de um sinal na presença de ruído, o qual sabemos que é modulado em BPSK<sup>2</sup>, sendo desconhecidas as suas características, e possui uma baixa potência de transmissão ( $\sqrt{P}$ ).

Presumimos que o receptor não possui informação sobre a sequência de bits transmitidos e assumimos que há uma sincronização perfeita entre a portadora e o instante de amostragem e que  $s[k] \sim \text{Bernoulli}(\frac{1}{2})$  e  $r[k]$  são variáveis aleatórias

---

<sup>2</sup>O PSK é um tipo de modulação digital que transmite dados modulando a fase de um sinal de referência (portadora). O BPSK é a forma mais simples do PSK onde a modulação é feita com duas fases, que estão separadas por  $180^\circ$ . No entanto, o BPSK só é capaz de modular a 1 bit/símbolo, não sendo adequado para aplicações com alta taxa de dados e largura de banda limitada.

i.i.d. e independentes do ruído, correspondentes à discretização dos sinais  $s(t)$  e  $r(t)$ . Considere a hipótese nula como na Equação 3.1 e a hipótese alternativa reescrita conforme as Equações 3.7:

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_0 : r[k] &= n[k], & \text{com } k = 1, \dots, N \\ \mathcal{H}_1 : r[k] &= s[k] + n[k]\sqrt{P}, & \text{com } k = 1, \dots, N\end{aligned}\tag{3.7}$$

O problema de detecção se torna, então, distinguir entre as amostras de uma distribuição gaussiana (normal) e as amostras provenientes da soma de duas distribuições gaussianas de meia altura em  $\pm \sqrt{P}$ . A regra de decisão baseada na máxima verossimilhança pode ser escrita conforme a Equação 3.8 [74]:

$$\sum_{k=1}^N \ln \left[ \cosh \left( \frac{\sqrt{2P}}{\sigma^2} r[k] \right) \right] \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} \frac{N \cdot P}{2\sigma^2}\tag{3.8}$$

Visto que esta regra de decisão corresponde a soma de muitas variáveis aleatórias independentes (presumimos  $N \gg 1$ ) e consideramos a probabilidade de falso alarme moderada (não dependente de  $N$ ), podemos usar o teorema do limite central para aproximar a probabilidade de erro, que necessitará de  $O(\frac{1}{SNR^2})$  amostras [74].

Este resultado demonstra que no caso de SNR baixa, a regra de decisão tem o desempenho semelhante ao do detector por energia.

### 3.4 Detecção de Constelações com Valor Esperado de Transmissão Igual a Zero

Se o modulador digital pode transmitir  $b$  bits ao mesmo tempo, usando  $M = 2^b$  formas de onda distintas,  $s_i(t)$ ,  $i = 0, 1, \dots, M - 1$ , a modulação é chamada de *M-ária*. Cada um desses blocos com  $b$  bits forma um símbolo que pode ser representado por um valor real ou complexo.

Quando os sinais na forma  $s_i(t)$  são mapeados em um conjunto de  $M$  sinais ortonormais em um espaço de dimensão  $N$  ( $N \leq M$ ), o conjunto desses símbolos forma uma *constelação*.

No desenvolvimento da análise é considerada uma constelação com  $2^{LR}$  símbolos, estatisticamente independentes, onde cada símbolo possui o comprimento  $L$  e  $R$  é maior que a capacidade do canal. O transmissor recebe uma sequência de  $N$  símbolos i.i.d. ( $N \gg 1$ ) e a transmite pelo canal de comunicações.

Consideramos as hipóteses descritas pelas Equações 3.1, discretizadas, e que  $\mathbf{c}_i$  é o  $i$ -ésimo símbolo na constelação, com  $i \in (1, 2, \dots, 2^{LR})$ ,  $s[k] = \mathbf{c}_i$  e  $n[k]$  é o ruído.

A probabilidade que  $\mathbf{c}_i$  seja transmitido é  $p$ . A energia do  $i$ -ésimo símbolo ( $E_i$ ) e a energia média por símbolo ( $E$ ) equivalem, respectivamente, a  $E_i = \mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i$  e  $E = \sum_{i=1}^{2^{LR}} p \cdot (\mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i)$ .

O sinal  $r[k]$  de comprimento  $N$  é recebido e uma regra de decisão é usada para determinar se o sinal é puramente ruído ou se o símbolo foi transmitido. De acordo com o disposto em [77], obtém-se as Equações 3.9 e 3.10 para a probabilidade de recebimento de  $r[k]$  sob as hipóteses  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$  descritas conforme as Equações 3.1:

$$P(\mathbf{r}|\mathcal{H}_0) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{L}{2}}} \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} \mathbf{r}^T \mathbf{r}\right) \quad (3.9)$$

$$P(\mathbf{r}|\mathcal{H}_1) = \sum_{i=1}^{2^{LR}} p \left[ \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{L}{2}}} \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} (\mathbf{r} - \mathbf{c}_i)^T (\mathbf{r} - \mathbf{c}_i)\right) \right] \quad (3.10)$$

Considerando a independência dos  $N$  símbolos transmitidos obtém-se o critério de decisão (Equação 3.11), baseado no método de máxima verossimilhança:

$$\prod_{k=1}^N \left[ \sum_{i=1}^{2^{LR}} p \cdot \exp\left(\frac{1}{2\sigma^2} (2\mathbf{c}_i^T \mathbf{r}[k] - \mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i)\right) \right] \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} 1 \quad (3.11)$$

Se for assumido que  $\frac{1}{2\sigma^2} (2\mathbf{c}_i^T \mathbf{r} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i) \ll 1$  e com o uso da aproximação  $e^x \approx 1 + x + \frac{x^2}{2}$ , também for assumido que  $\frac{E[k]}{2\sigma^2} \ll 1$  e  $\frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^M r_j[k] c_j[i] \ll 1$ , obtém-se a Equação 3.12, simplificação da Equação 3.11:

$$\prod_{k=1}^N \left( 1 - \frac{E}{2\sigma^2} + \frac{1}{\sigma^2} \left[ \sum_{i=1}^{2^{LR}} p \mathbf{c}_i^T \right] r[k] + \frac{1}{8\sigma^4} \sum_{i=1}^{2^{LR}} p (2\mathbf{c}_i^T r[k] - E(i))^2 \right) \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} 1 \quad (3.12)$$

Aplicando o logaritmo natural a cada lado da Equação 3.12 e usando a aproximação,  $\ln(1+x) \approx x$ , é possível simplificar ainda mais a regra de decisão que deverá ser seguida, chegando na Equação 3.13.

$$\prod_{k=1}^N \left( \frac{1}{\sigma^2} \left[ \sum_{i=1}^{2LR} p \mathbf{c}_i^T \right] r[k] + \frac{1}{8\sigma^4} \sum_{i=1}^{2LR} p (2\mathbf{c}_i^T r[k] - \mathbf{E}(i))^2 \right) \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} 0 \quad (3.13)$$

Na Equação 3.13, a independência entre os símbolos é importante para o resultado obtido, porém não é necessário que as distribuições sejam idênticas. O mesmo resultado se aplica aos símbolos cujo valor esperado condicional, dados os demais símbolos, seja zero.

O termo entre colchetes é uma função linear de  $\mathbf{r}$  e representa a energia média por símbolo.

Portanto, se todos os símbolos representativos da informação forem escolhidos a partir de um sinal cuja constelação possuir valor esperado de transmissão igual a zero, o detector ótimo em SNR baixa se comporta qualitativamente como um detector por energia, dependente apenas do valor da SNR.

### 3.5 Percepção do Espectro

A maneira mais eficiente de se efetuar a percepção das “oportunidades” no espectro é a detecção dos usuários primários que estão recebendo os dados dentro do alcance das transmissões de um usuário secundário. Entretanto, na prática, é difícil para o rádio cognitivo efetuar uma medição direta de um canal de comunicação entre um transmissor e um receptor primário.

A estimação de tráfego em uma área geográfica específica pode ser feita localmente (por apenas um rádio cognitivo) com o uso de um dos tipos de detecção apresentados na Seção 3.2. Entretanto, a informação de diferentes rádios cognitivos pode ser combinada para se obter uma consciência do espectro mais precisa.

Na próxima subseção, serão apresentadas as técnicas utilizadas para efetuar a detecção de sinais primários utilizando um conjunto de rádios cognitivos, ou melhor, múltiplos usuários secundários.

### 3.5.1 Percepção Cooperativa

No caso da *detecção não-cooperativa ou individual*, os usuários secundários detectam o sinal do transmissor primário independentemente através de suas observações locais [94]. Entretanto, em muitos casos, a rede secundária está fisicamente separada da rede primária, não havendo interação entre elas, o que dificulta ainda mais o processo.

Assim, mesmo com a detecção do transmissor primário, o usuário secundário não pode evitar a interferência por ele causada devido a falta de informação da posição do receptor primário. Além disso, o modelo de detecção do transmissor primário não pode por si só impedir o problema do terminal escondido.

Outra dificuldade é que o detector do rádio cognitivo pode ter uma boa linha de visada para o transmissor primário, mas pode não ser capaz de detectá-lo devido à incerteza na detecção.

A *detecção cooperativa* se refere ao método de percepção do espectro onde a informação de múltiplos usuários secundários é incorporada para a detecção do usuário primário [95].

A cooperação entre os usuários secundários é proposta como a solução para os problemas encontrados durante a percepção do espectro devido às incertezas na detecção do ruído, efeitos de sombreamento e de múltiplos caminhos e a atenuação do sinal no caminho de propagação.

A detecção cooperativa pode ser implementada de maneira *centralizada* ou *distribuída* [95]. No método centralizado, uma estação-base secundária reúne toda a informação de percepção proveniente dos usuários secundários e efetua a detecção dos vazios do espectro. As soluções distribuídas, por outro lado, exigem troca de informações entre os usuários secundários.

A detecção cooperativa entre os usuários secundários é teoricamente mais precisa visto que a incerteza de uma detecção do usuário individual pode ser minimizada [78]. A atenuação do sinal por múltiplos caminhos e o efeito de sombreamento são os principais fatores que degradam o desempenho dos métodos de detecção do usuário primário [96] e quando esses fatores são independentes, a cooperação para detecção torna-se mais efetiva [97, 87].

Portanto, a detecção cooperativa ao reduzir os efeitos de sombreamento e a

atenuação do sinal por múltiplos caminhos melhora a probabilidade de detecção [78]. Esses efeitos podem ainda ser combatidos se aliarmos à cooperação com o uso de técnicas de irradiação direcionada e antenas direcionais [87]. Além disso, a percepção cooperativa reduz as probabilidades de erro de detecção e falsos alarmes, bem como auxilia na redução do problema do terminal escondido [87].

Em [98] é feita a verificação da degradação no desempenho devido à correlação entre o efeito de somreamento experimentado por nós cooperativos individualmente em termos de perda de oportunidades. Neste estudo percebeu-se que é mais vantajoso ter uma mesma quantidade de nós colaborando numa área larga do que em uma pequena.

Embora pareça um contra-senso, a cooperação utilizando todos os usuários secundários da rede não atinge necessariamente o desempenho ótimo na detecção [99]. Os usuários que devem ser escolhidos para participarem da percepção cooperativa são os usuários secundários com melhor recepção (maior SNR) do sinal do usuário primário transmissor [99].

Enquanto as abordagens cooperativas fornecem uma percepção do espectro mais precisa, elas provocam efeitos adversos sobre as redes com limitação de recursos devido às operações adicionais e à sobrecarga do tráfego de controle. Além disso, o problema da incerteza do receptor primário devido a falta do conhecimento da sua localização ainda não está resolvido na percepção cooperativa.

Geralmente, a *troca de dados* e a *função de percepção* estão juntas no mesmo usuário secundário e podem ser implementadas de duas formas: centralizada ou distribuída. Entretanto, esta arquitetura pode resultar em uma decisão pouco precisa devido a possíveis conflitos entre a ação de percepção do espectro e a troca de dados.

A fim de resolver este problema, *duas redes distintas podem ser dispostas separadamente*, isto é, uma rede de sensores para a percepção cooperativa do espectro e uma rede operacional para a troca de dados [100].

A rede de sensores é montada na área onde se intenciona efetuar a percepção do espectro. Um controlador central processa a informação coletada a partir dos sensores e faz o mapa da ocupação do espectro para a rede operacional. A rede operacional usa esta informação para determinar os canais disponíveis.

Na *percepção externa* um agente externo realiza a ação de percepção do espectro

e transmite a informação sobre a ocupação do canal para os usuários secundários. Os algoritmos de percepção externa resolvem alguns problemas associados à percepção individual. As principais vantagens são a redução do problema do terminal escondido e a redução das incertezas devido aos efeitos de sombreamento e atenuação do sinal.

Além disso, a medida que os rádios cognitivos não dispendem tempo para realizar a ação de percepção, a eficiência do espectro é aumentada, bem como, há um menor consumo de energia. A rede externa utilizada não precisa ser móvel e nem necessariamente alimentada por baterias, eliminando, desta forma, alguns importantes problemas.

A percepção externa é um dos métodos propostos para a identificação dos usuários primários no padrão IEEE 802.22 (Seção 2.3).

### **3.6 Conclusão**

Ao longo deste capítulo são mostradas as formas principais de detecção da transmissão do usuário primário e o conceito de percepção cooperativa onde múltiplos rádios cognitivos trabalham juntos para a identificação das “oportunidades” no espectro de forma colaborativa.

Além disso, é analisada a ordem de complexidade do número de amostras necessárias para detectar, dentro de uma determinada probabilidade de erro, um sinal decodificável contra um sinal desconhecido. Também é mostrado que um radiômetro possui um desempenho pior do que um detector coerente, mas que o melhor detector para símbolos desconhecidos a partir de uma constelação de valor esperado de transmissão igual a zero comporta-se qualitativamente como um radiômetro.

# Capítulo 4

## Arquitetura Proposta

Este capítulo faz a descrição completa da arquitetura de rede (cognitiva) secundária, investigando a possibilidade de se utilizar esta rede em um ambiente onde haja a presença de um sistema licenciado (primário), também descrito neste capítulo, sem contudo causar-lhe interferência prejudicial.

Além disso, apresenta uma proposta de modelo analítico para o melhor aproveitamento do espectro e são mostradas as limitações devido à interferência.

Em seguida, na Seção 4.2.3, a parte de detecção das oportunidades é discutida e usando a SNR do sinal recebido como um estimador para distância é mostrado que é possível para o usuário secundário variar sua potência de transmissão enquanto evita interferir prejudicialmente nos usuários primários. Como consequência, uma regra de controle de potência é apresentada usando esse conceito, seguindo nossa proposta em [21].

### 4.1 Descrição da Arquitetura

Nesta seção, apresentamos os detalhes das duas redes *ad hoc* distintas: primária e secundária, que compõem nossa arquitetura, incluindo as mensagens utilizadas e suas funções.

A arquitetura proposta é formada por uma rede secundária *ad hoc* com nós fixos e móveis, composta por rádios cognitivos, que efetuam a detecção cooperativa das transmissões de uma rede primária e utilizam essa informação para ajustar sua potência de transmissão, mantendo a conectividade entre si e controlando dinami-

camente a interferência percebida pela rede primária.

A rede primária é a rede licenciada para utilizar a banda de frequência de interesse. A rede secundária funciona de maneira oportunista, evitando ultrapassar o limite de interferência tolerado pela rede primária, que é previamente divulgado.

A rede secundária se utiliza da mesma banda de frequência (banda de interesse) que a rede primária e faz uso de um mecanismo de reserva do meio semelhante ao RTS/CTS do IEEE 802.11b visando reduzir o problema do terminal escondido, mantendo todos os demais nós dentro do alcance cientes da comunicação em andamento.

Não há um canal de controle exclusivo, entretanto, há um controle distribuído sendo exercido na rede secundária através da troca de mensagens, conforme a Tabela 4.1. Essas mensagens contêm informações de identificação do nó origem e do nó destino, sua posição e sua potência de transmissão.

Nome	Origem	Destino	Ação
<i>talk</i>	P/O	P/O	solicita comunicação e envia dados
<i>ack</i>	P/O	P/O	aceita comunicação e reconhece dados
<i>detecção</i>	S	O	informa detecção de nó primário
<i>hold-on</i>	O	O	suspende comunicações por $\Delta_t$ unidades de tempo
<i>posição</i>	S	O	informa posição de nó primário
<i>controle-Pt</i>	S	O	informa mudança de potência TX

Tabela 4.1: Mensagens trocadas pelos nós secundários.

Segue-se uma descrição das redes primária e secundária.

#### 4.1.1 Rede Primária

Os nós que a compõem (nós primários, P) são capazes apenas de comunicarem entre si e utilizam uma potência de transmissão fixa, que atinge o *alcance padrão*, também utilizado como valor de referência de alcance para os demais nós.

Os nós primários transmitem e recebem dados somente entre si e as mensagens transmitidas são desconhecidas da rede secundária. Assim, os nós primários ora transmitem, ora recebem, e durante o período de transmissão, chamado de *janela*

de localização, eles podem ser detectados e localizados pelos nós sensores da rede secundária.

O limite de interferência permitido pelos nós primários é divulgado para a rede secundária e vale  $I$ . O valor, a priori, é referenciado à posição do nó primário, mas poderia ser calculado para uma outra posição considerando a existência de *círculos de nível de sinal interferente permissíveis crescentes com a distância*.

Esses círculos são estabelecidos considerando o desvanecimento do sinal transmitido pelo nó primário ao longo do caminho de propagação. Desta forma, o seu estabelecimento está diretamente ligado ao modelo de propagação de RF adotado. Observando a Figura 4.1 e tomando-se o nó primário como referência, pode-se notar a gradação do valor de  $I$ , de modo que  $I'' < I' < I$ .

### 4.1.2 Rede Secundária

Emprega rádios cognitivos e é composta por nós desempenhando distintamente a *função operacional*, responsável pela comunicação na rede, e a *função sensorial*, responsável pela detecção cooperativa das transmissões dos nós primários e pela obtenção de uma estimativa da distância e da direção de chegada do sinal detectado.

Para reduzirmos os problemas causados pelos efeitos de múltiplos caminhos e sombreamento, que fazem com que o sensoriamento individual não seja adequado para a detecção dos usuários primários com precisão [10, 74], e melhorarmos a precisão na detecção dos usuários primários, implementamos nos nós sensores o sensoriamento cooperativo (Seção 3.5).

O conhecimento pelos nós da rede secundária da sua posição na área onde atuam é de grande importância para o funcionamento da rede. Para a escolha do sistema de posicionamento a ser adotado, vários requisitos como escalabilidade, disponibilidade, confiabilidade, eficiência energética e precisão, são fatores importantes.

Uma das técnicas tradicionais de posicionamento mais difundida é baseada no uso do sistema GPS [101] que apesar da facilidade de uso possui algumas desvantagens, pois o sinal do GPS na recepção é muito baixo e passível de ser interferido por fontes naturais ou artificiais, possui um custo a mais na aquisição do equipamento, possui um baixo desempenho em ambiente *indoor* e, sendo proprietário, de natureza militar e dependente da detecção de um número mínimo de satélites para obter a posição,

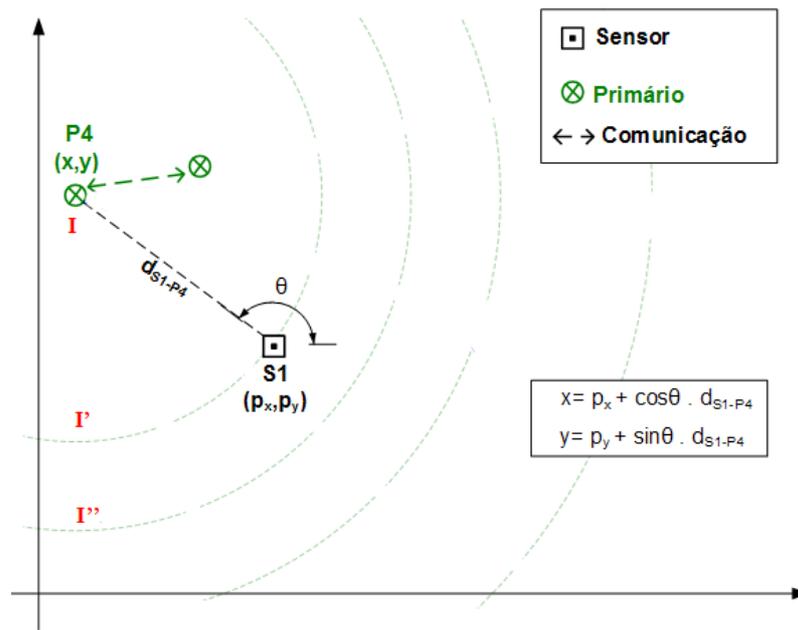


Figura 4.1: Círculos de interferência e mecanismo de localização do nó primário.

não há controle absoluto de que estará disponível a todo momento.

Apesar de não o implementarmos de fato, pressupomos que todos os dispositivos da rede secundária possuem um sistema de posicionamento que fornece informações acerca da sua posição na região onde se encontram.

Em todas as mensagens trocadas na rede secundária há informações de identificação do nó origem e do nó destino, sua posição e sua potência de transmissão.

Chamaremos de *nó sensor*,  $S$ , o nó da rede secundária desempenhando a função sensorial; e de *nó operacional*,  $O$ , o nó da rede secundária desempenhando a função operacional. A seguir, vamos detalhar esses dois tipos de nós da rede secundária.

- Nós *sensores*: permanecem a maior parte do tempo sem transmitir (modo passivo) empenhados em efetuar a detecção das transmissões dos nós primários e obter uma estimativa da distância e da direção de chegada do sinal detectado. Além disso, eles possuem dois mecanismos que são:
  - *Mecanismo de detecção de transmissão.*

A detecção de sinais possui variada aplicação na Ciência, inclusive nas comunicações. Em [70] encontramos uma coletânea dos resultados e técnicas de detecção de sinais desenvolvidos nas últimas décadas. Desde então, alguns

métodos foram propostos com essa finalidade: detecção por energia [72], detecção pela forma de onda do sinal [73], detecção pela cicloestacionariedade do sinal [72], detecção por filtros casados [71], etc..

Conforme mostrado no Capítulo 3, todos esses métodos possuem vantagens e desvantagens e se aplicam melhor ou pior de acordo com as características do sinal a ser detectado. Face a facilidade de implementação, pressupomos que o nó sensor pode detectar, dentro do seu alcance, qualquer transmissão dos demais nós fazendo uso do método de detecção por energia (*vide* Subseção 3.2.2).

Se o nó sensor considerar que a fonte do sinal detectado não é um nó da rede secundária, ele envia uma *mensagem detecção* para os nós operacionais dentro do seu alcance com o objetivo de alertar sobre a presença de um nó primário transmissor e inicia o procedimento de localização desse nó através do mecanismo de localização do primário.

Uma vez localizado o nó primário que está transmitindo, o nó sensor envia uma *mensagem posição* para os nós operacionais dentro do seu alcance, contendo a posição estimada do nó primário transmissor, e volta a operar passivamente até que aconteça outra detecção.

- *Mecanismo de localização do primário.*

É iniciado após a detecção da transmissão e sua identificação negativa como nó da rede secundária.

O requisito básico de qualquer sistema de localização é permitir a correta medição da distância entre quaisquer dois nós da rede. Várias propostas que foram feitas visando a determinação dessa distância incluíram os métodos de *Time-of-Arrival* (ToA), *Time Difference of Arrival* (TDoA), *Angle-of-Arrival* (AoA) e *Received-Signal-Strength* (RSS) [102, 103]. As principais fontes de erros nesses sistemas são provenientes da visada indireta entre os dispositivos (NLOS) e da medição propriamente dita. Métodos para detectar e corrigir erros devido à NLOS são apresentados em [104, 105].

As medições de distâncias sofrem por erros cuja variação é dependente do tempo, ou então, por erros estáticos, mas dependentes do ambiente. Os erros com variação temporal causados, por exemplo, por ruído aditivo e inter-

ferência, podem ser reduzidos realizando múltiplas medições numa janela de tempo e calculando a média dessas medições. Já os erros estáticos dependentes do ambiente são resultado, principalmente, da disposição dos obstáculos na região de operação. Uma vez que a região de operação normalmente não é a mesma, esse tipo de erro torna-se imprevisível e deve ser modelado como uma variável aleatória [102, 106].

O escopo do trabalho não inclui uma descrição dos algoritmos de localização, entretanto, assumimos que o método AoA é utilizado pelo nó sensor para obter uma linha de posição sobre a qual estará o nó primário transmissor. Também é utilizado o método RSS para obter uma estimativa da sua distância ao mesmo nó primário [102, 106].

A posição  $(x,y)$  do nó primário detectado é obtida conforme a Figura 4.1 e informada para os nós operacionais no alcance através de uma *mensagem posição*. A precisão da posição estimada do nó transmissor e da sua distância dependerá exclusivamente do número de nós sensores que efetuarem a detecção.

No caso de ser detectada mais de uma transmissão simultânea distinta pelo mesmo nó sensor (mais de um nó detectado), a janela de localização é alongada.

- Nós *operacionais*: são capazes de comunicarem apenas entre si (ponto-a-ponto) de forma semelhante aos nós primários e compartilham a banda de interesse, preferencialmente quando não houver nenhum nó primário fazendo uso dela, ou simultaneamente a eles, mas de modo a manterem-se abaixo do limite de interferência  $I$ .

Para isso, recebem informações dos nós sensores para realizar o controle de sua potência de transmissão. O seu alcance de transmissão é ajustável entre zero, correspondente a não efetuar nenhuma transmissão, e o alcance padrão, correspondente a se utilizar a máxima potência de transmissão.

Ao receber uma *mensagem detecção*, o nó operacional, caso esteja em comunicação, envia uma *mensagem hold-on* para o nó operacional destino com objetivo de avisar que houve a detecção de uma transmissão de um nó primário,

e interrompe a sua transmissão temporariamente. Isso evita que haja uma transmissão do nó operacional destino (que pode estar fora do alcance do nó sensor) e, conseqüentemente, aumente a possibilidade de interferência no nó primário.

Ao receber uma *mensagem posição*, o nó operacional se certifica da existência de um nó primário e caso esteja em comunicação, envia uma nova *mensagem hold-on* para o nó operacional destino.

Com os dados calculados e armazenados pelos dois mecanismos comentados acima, o nó sensor efetua o cálculo dos níveis de interferência causados pelos nós operacionais transmissores e o nível de interferência permitido sobre a rede primária, referenciado à sua posição ( $I'$ ).

Após isso, o nó sensor compara esses dois valores e envia uma *mensagem controle-Pt* para os nós operacionais transmissores, com as informações necessárias para que os nós ajustem sua potência de transmissão, caso o limite permitido de interferência tenha sido ultrapassado.

Se um nó operacional não consegue receber uma *mensagem ack* após o envio de uma *mensagem talk* por três vezes consecutivas, ele entende que está com potência de transmissão insuficiente e a ajusta, aumentando-a em 10% e efetuando novas tentativas.

Caso não obtenha resposta, ele repete o procedimento até que o valor da potência de transmissão assuma o seu valor máximo. Se mesmo assim não houver resposta, a comunicação é cancelada e um novo procedimento de comunicação é iniciado.

De forma a validar o sistema proposto, efetuamos algumas considerações necessárias ao funcionamento das redes que são descritas a seguir:

- Todos os nós sensores possuem receptores com sensibilidade 10dB acima da base de ruído (*noise floor*) presente na banda de interesse;
- Todos os nós sensores possuem um par de antenas: uma para comunicação e outra para efetuar a detecção de transmissões primárias. As ações de detecção

e comunicação ocorrem em instantes distintos e a capacidade de separação espacial dos sinais detectados referente à antena direcional utilizada na detecção permite a diferenciação dos sinais detectados;

- Todos os nós operacionais possuem transceptores que funcionam dentro dos mesmos limites de potência de transmissão e sensibilidade;
- Todos os nós utilizam formas de onda específicas de acordo com a rede onde estão operando (primária ou secundária) que podem ser totalmente distintas entre si, de modo que a comunicação em uma das redes seja impossível de ser decodificada pela outra rede;
- Usamos um mecanismo de reserva do meio na rede secundária semelhante ao RTS/CTS [23] visando reduzir o problema do terminal escondido, mantendo todos os demais nós secundários dentro do alcance, cientes da comunicação em andamento.

## 4.2 Modelagem Analítica

Nesta seção é apresentado um modelo analítico para o melhor aproveitamento do espectro e apresentadas as limitações devido à interferência.

Em seguida, passamos a parte de detecção das oportunidades e usando a SNR do sinal recebido como um estimador para distância, mostramos que é possível para o usuário secundário variar sua potência de transmissão enquanto evita interferir nos usuários primários.

A principal motivação para a construção de um modelo analítico que descreva o funcionamento da arquitetura é a obtenção de um entendimento mais detalhado do comportamento desta mesma arquitetura frente às modificações nos diversos parâmetros de configuração e possibilidades de cenário a que ela possa ser submetida.

Portanto, apesar de considerarmos que o modelo proposto possui precisão limitada, ele permite alcançar uma avaliação da arquitetura sem perda de generalidade.

## 4.2.1 Aproveitamento do Espectro

Intuitivamente, uma faixa de frequências, ou simplificada, um canal de comunicações, pode ser considerado como uma “oportunidade” se não está sendo usado pelos usuários primários. Contudo, em uma rede com transmissores e receptores primários geograficamente distribuídos, o conceito de oportunidade de espectro é um pouco mais complexo do que parece a princípio.

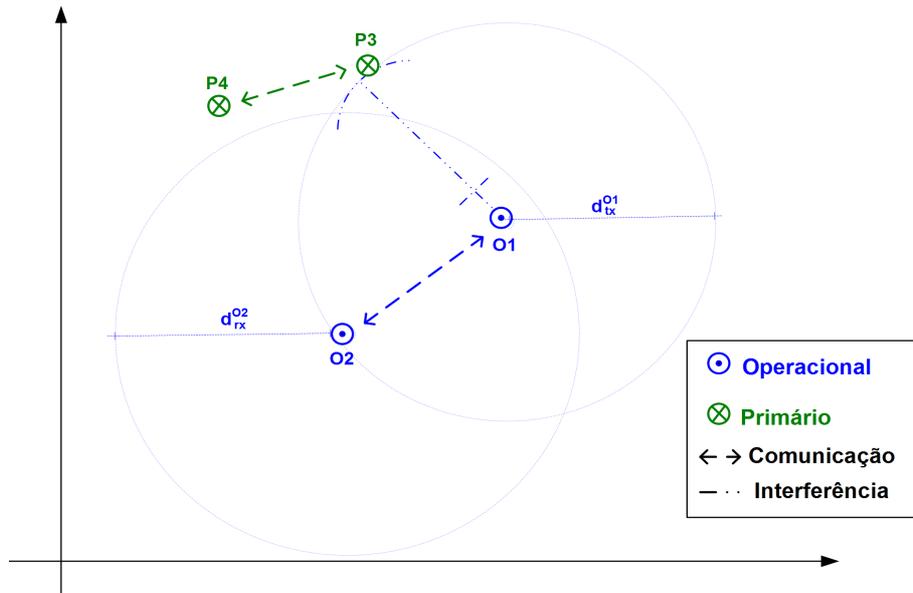


Figura 4.2: Interferência e oportunidade no espectro.

Com o auxílio da Figura 4.2, identificamos as condições onde um canal pode ser considerado uma oportunidade. Considere dois usuários secundários, ( $O_1$  e  $O_2$ ), onde num dado momento  $O_1$  é o transmissor e  $O_2$  o receptor.

Um canal pode ser considerado uma oportunidade para ambos os usuários caso eles possam se comunicar através dele enquanto limitam a interferência nos usuários primários até o nível previamente estabelecido ( $I$ ). Isto significa que a “recepção” de  $O_2$  não será afetada pelas transmissões efetuadas pelos nós primários e a “transmissão” de  $O_1$  não interferirá nos receptores primários (reuso espacial).

Para exemplificar as condições descritas acima, consideramos a atenuação do sinal no percurso como seguindo a lei de potência,  $loss(d) = d^{-\alpha}$ , onde  $\alpha$  é o fator de atenuação [107].

Neste caso, um canal será uma oportunidade para  $O_1$  e  $O_2$  se nenhum usuário primário dentro da distância  $d_{tx}^{O_1}$  de  $O_1$  estiver “recebendo” alguma mensagem e nenhum usuário primário a uma distância  $d_{rx}^{O_2}$  de  $O_2$  estiver “transmitindo” alguma mensagem neste mesmo canal.

Evidentemente,  $d_{tx}^{O_1}$  é determinada pela potência de transmissão dos usuários secundários e pela interferência máxima permitida para os usuários primários, enquanto  $d_{rx}^{O_2}$  é determinada pelo nível máximo de interferência suportado pelos usuários secundários, ou melhor, pela potência de transmissão dos usuários primários.

Desta forma, podemos estabelecer que neste trabalho o conceito de *oportunidade no espectro* é um conceito local definido com respeito a um par específico de usuários secundários e dependente da localização não apenas do transmissor secundário, mas também do receptor secundário num dado instante.

Além disso, a *oportunidade no espectro* é determinada da mesma forma pelas atividades de comunicação dos usuários primários como dos usuários secundários, e as falhas nas comunicações causadas pelas colisões, entre as mensagens trocadas pelos usuários secundários, não interferem na oportunidade surgida.

## 4.2.2 Limitação Devido à Interferência

A imposição de limites para a interferência é uma questão regulatória complexa. Limitações muito rígidas poderão reduzir muito a eficiência das redes secundárias enquanto o relaxamento das limitações poderá afetar o funcionamento dos sistemas primários.

De uma forma geral, a limitação devido à interferência deve seguir pelo menos *dois parâmetros*: o nível máximo de potência interferente,  $I$ , percebido pelo receptor primário ativo, e a regularidade com que este nível  $I$  é ultrapassado no mesmo receptor primário.

O nível de interferência no receptor primário abaixo deste limite  $I$  não afeta os usuários primários enquanto a interferência acima dele pode degradar as comunicações com a ocorrência de perdas ou colisões de pacotes na rede primária.

O segundo parâmetro pode ser definido de duas maneiras. Pode ser o número máximo de perdas ou colisões que poderá ocorrer durante uma determinada janela

de tempo ou a probabilidade de perda ou colisão. Neste trabalho, abordaremos inicialmente a probabilidade de perda ou colisão, que chamaremos de  $\Pr_{Interf>I}$ .

Uma vez que os erros na detecção da oportunidade no espectro são inevitáveis, quanto maior o valor para  $I$  maiores as possíveis oportunidades no espectro para os usuários secundários. Em outras palavras, o nível  $I$  determina a decisão de acesso do usuário secundário com base na detecção da oportunidade no espectro [108].

Um aspecto importante da  $\Pr_{Interf>I}$  é a escolha da região onde ela será computada. Por exemplo, a comunicação descrita pela Figura 4.2 pode fazer uso de apenas um canal, ou mais de um canal, com o conseqüente aumento da vazão, e desta forma, podemos escolher que  $\Pr_{Interf>I}$  seja computada em cada canal utilizado, com uma janela de observação curta, ou na média de todos os canais utilizados, com uma janela de observação longa.

Se a escolha recair sobre a medida de  $\Pr_{Interf>I}$  por canal, poderemos ter um alto nível de proteção para os usuários primários não importa quando e em qual canal eles estejam transmitindo. Por outro lado, se escolhermos a média dos canais, o nível de proteção pode variar para os diferentes usuários primários dependendo da sua estatística de tráfego.

Enquanto as limitações devido à interferência devam ser impostas sobre a transmissão agregada de todos os usuários secundários (nível de rede), cada usuário secundário precisa saber o limite de interferência em sua própria posição (nível de nó) a fim de escolher a potência de transmissão adequada e tomar decisões sobre o momento de transmitir.

A conversão da limitação da interferência a nível de “rede” para uma a nível de “nó” depende da posição do nó e do tráfego dos usuários secundários, bem como do modelo de atenuação do sinal no ambiente de funcionamento.

### 4.2.3 Detecção das Oportunidades

A partir da observação da Figura 4.2 e da definição de oportunidade no espectro é esperado que em uma rede secundária a detecção da oportunidade precise ser feita simultaneamente por ambos os usuários secundários do par de comunicação, o que nos leva a considerar aspectos de rede e de processamento do sinal.

Assim, no começo de cada período de comunicação, dois usuários secundários que

desejam se comunicar precisam determinar se o canal escolhido é uma oportunidade neste momento específico.

Desconsiderando por ora a possível disputa entre os usuários secundários, o transmissor primeiramente detecta as atividades dos usuários primários em sua vizinhança. Se o canal estiver disponível (nenhum receptor primário próximo), ele transmite uma mensagem do tipo RTS para o receptor, semelhante àquela existente no padrão IEEE 802.11b [23]. O receptor ao receber com sucesso a mensagem RTS sabe que o canal também está disponível no transmissor (nenhum transmissor primário próximo em atividade visto que a mensagem RTS foi recebida com sucesso) e responde com uma mensagem CTS. Uma troca bem-sucedida de RTS-CTS completa a detecção da oportunidade e é seguida pela transmissão de dados.

O que falta resolver é a detecção pelo usuário secundário dos usuários primários no momento da “recepção”. Isto pode ser feito se pudermos transformar o problema de detecção dos receptores primários para detecção dos transmissores primários, considerando que os nós de ambas as redes, primária e secundária, possuem um transmissor e um receptor, e que a comunicação se dá com transmissões e recepções em ambos os nós no par de comunicação.

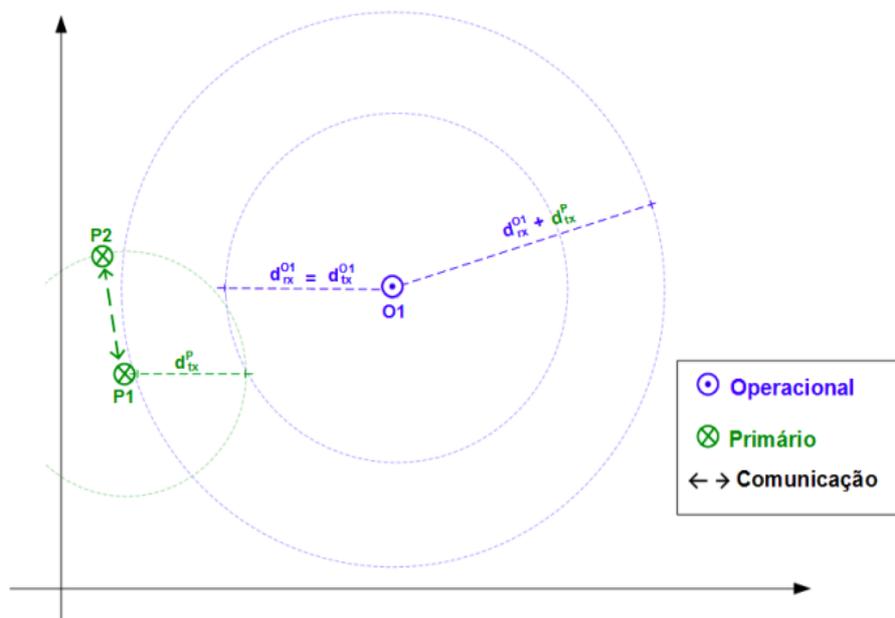


Figura 4.3: Oportunidade no espectro e sua detecção.

Observando a Figura 4.3, chamamos de  $d_{tx}^P$  o *alcance de cobertura* de um usuário primário e consideramos que o outro usuário primário, do par de comunicação, está dentro desta cobertura.

Assim, um usuário secundário pode determinar que um canal está disponível se nenhum usuário primário for detectado dentro da distância,  $d_{tx}^P + d_{rx}^{O_1}$ , que chamaremos de *alcance de detecção*.

Contudo, esta abordagem é conservadora, pois as atividades de transmissão dos nós primários  $P_1$  e  $P_2$  poderão impedir que  $O_1$  aproveite uma oportunidade mesmo que o par de comunicação  $P_1, P_2$  esteja além da distância  $d_{tx}^{O_1}$ , que chamaremos de *alcance de cobertura* (ou, no caso, interferência) de um usuário secundário.

A escolha adequada do *alcance de detecção* é um compromisso entre a conectividade dos usuários secundários e o nível de interferência causado nos usuários primários.

#### 4.2.4 Controle da Potência de Transmissão no Usuário Secundário

Enquanto a atenuação do sinal por múltiplos caminhos pode ser quase independente entre usuários próximos, o sombreamento provavelmente está correlacionado [78]. Em ambientes reais, se um usuário sofrer o efeito de sombreamento outros usuários a poucos metros de distância também estarão sujeitos a este sombreamento [96].

Isso pode ser uma vantagem, pois o usuário secundário sabidamente sob efeito de sombreamento ao transmitir nas proximidades de um usuário primário não detectado tem um potencial menor de interferir além do limite tolerado por este mesmo usuário primário, considerando que ele está sob o mesmo efeito.

Esse correlacionamento do sombreamento em relação à posição do usuário é importante para o desenvolvimento de novos protocolos para os rádios cognitivos que consideram a interferência. Entretanto, por questões de simplicidade, em nosso modelo não consideramos os efeitos de sombreamento nem o de múltiplos caminhos.

Inicialmente, consideremos que um usuário secundário  $O_1$  é capaz de detectar a presença de um usuário primário dentro do alcance de detecção  $d_{rx}^{O_1}$ . A potência de transmissão  $P_{O_1}$  de  $O_1$  deve ser tal que além do seu alcance de interferência  $d_{tx}^{O_1}$  o sinal decaia de intensidade para abaixo do limite tolerado  $I$ . Assim, utilizando a

expressão  $loss(d) = d^{-\alpha}$  e observando que o ruído de fundo pode ser descartado, temos:

$$P_{O_1} \leq I.(d_{rx}^{O_1})^{-\alpha} \quad (4.1)$$

A Equação 4.1 estabelece a dependência entre a potência de transmissão do usuário secundário e o alcance de interferência do usuário primário, o nível permitido de interferência  $I$  e o modelo de atenuação escolhido para o canal.

Se considerarmos a abordagem conservadora e estendermos o alcance de detecção para  $d_{tx}^P + d_{rx}^{O_1}$ , a Equação 4.1 pode ser reescrita como:

$$P_{O_1} \leq I.(d_{tx}^P + d_{rx}^{O_1})^{-\alpha} \quad (4.2)$$

Onde  $d_{tx}^P$  é o alcance de transmissão do usuário primário. Em outras palavras, o controle de potência do usuário secundário deveria considerar mais um fator, além dos já citados, que é a potência de transmissão do usuário primário.

No Capítulo 3 foi mostrado que várias limitações fundamentais podem ser superadas se o transmissor primário transmitir um sinal-piloto conhecido ou um preâmbulo para ajudar na detecção da sua transmissão pelos usuários secundários. Sem que haja esta obrigatoriedade, partimos da premissa que os usuários secundários podem medir o SNR do sinal recebido localmente de forma precisa.

De forma alternativa, a relação sinal-ruído mais interferência (SINR) poderia ser usada caso a interferência resultante dos outros usuários secundários pudesse ser determinada.

Assumiremos a condição de que se um sinal-piloto ou preâmbulo for transmitido como parte da transmissão primária, sua SNR será a mesma que a SNR da parte de dados e que o único ruído presente é o ruído de fundo. E dentro dessa condição de SNR alta devido à inexistência de ruído externo interferente, o detector ótimo é o detector por energia (radiômetro).

Assim, a SNR de toda transmissão primária, não apenas a do sinal-piloto ou do preâmbulo, seria um estimador apropriado para a distância.

A partir deste momento, apresentaremos um modelo de controle de potência que permita aos usuários secundários aumentarem a sua potência de transmissão

enquanto mantêm um nível aceitável de interferência agregada nos receptores primários.

Uma preocupação é o efeito da atenuação devido à propagação, para as duas redes, primária e secundária, o efeito de múltiplos usuários secundários em comunicação e da potência de transmissão heterogênea entre os usuários secundários. Mostraremos que nenhuma destas questões invalida a utilização do rádio cognitivo.

A fim de facilitar o desenvolvimento do nosso modelo utilizaremos uma faixa de frequências designada para um sistema primário, inicialmente, com apenas um par de comunicação a cada instante.

E assumiremos que dentro do alcance de cobertura do usuário primário transmissor, todos os usuários primários receptores em potencial têm a sua recepção garantida, mesmo quando os usuários secundários estão funcionando. E que todas as transmissões são omnidirecionais.

#### Uso da Relação Sinal-Ruído como Estimador para Distância

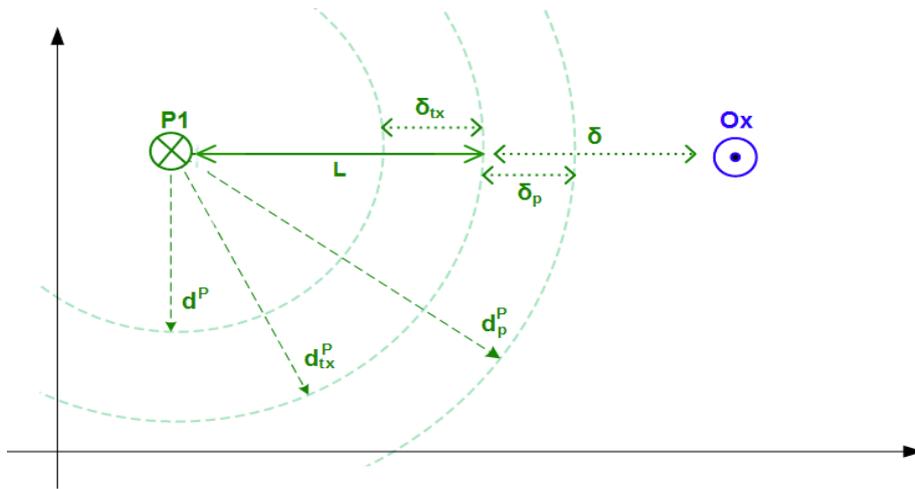


Figura 4.4: Regiões de interesse do usuário primário transmissor.

Um usuário primário,  $P_1$ , possui o alcance de cobertura  $d_{tx}^P$  correspondente à utilização de sua potência de transmissão máxima, porém ele está utilizando uma potência de transmissão que corresponde a um alcance de cobertura dado pela distância  $d^P$ ,  $d^P < d_{tx}^P$ . Além disso, estabeleceremos uma distância de proteção,  $d_p^P$ , além de  $d_{tx}^P$ , onde os usuários secundários deverão permanecer sem transmitir

(Figura 4.4).

Essa distância de proteção garante o limite permitido da interferência máxima sobre o usuário primário,  $I$ . Em distâncias do transmissor primário maiores que  $d_p^P$ , os usuários secundários podem transmitir, pois estarão abaixo do limite  $I$ .

Visto que estamos empregando a medição de SNR local como estimador para a distância ao transmissor, é conveniente representar  $d^P$ ,  $d_{tx}^P$  e  $d_p^P$  em relação ao valor da SNR em dB medida nestes pontos. Assim teremos respectivamente  $SNR^P$ ,  $SNR_{tx}^P$  e  $SNR_p^P$  correspondentes às referidas distâncias.

Com isso, observando a Figura 4.4 e adotando a potência do primário (transmissor) como  $P_P$ , a potência do secundário como  $P_O$  e a potência de interferência no primário (receptor) como  $I$ , definimos:

$$L = 10 \log\left(\frac{P_P}{I}\right) - SNR_{tx}^P \quad (4.3)$$

$$\delta_{tx} = SNR^P - SNR_{tx}^P \quad (4.4)$$

$$\delta_p = SNR_{tx}^P - SNR_p^P \quad (4.5)$$

$$\delta = SNR_{tx}^P - 10 \log\left(\frac{P_O}{I}\right) \quad (4.6)$$

A Equação 4.3 representa a atenuação efetiva do sinal transmitido pelo usuário primário  $P_1$  dentro do seu alcance de cobertura, ou seja, a distância  $d^P$  obtida através do valor da variação da SNR do sinal. De forma semelhante, a Equação 4.4 representa a distância ( $d_{tx}^P - d^P$ ) e a Equação 4.5 representa a distância ( $d_p^P - d_{tx}^P$ ). A Equação 4.6 representa a distância equivalente ao “afastamento” do usuário secundário do limite da cobertura do usuário primário.

Além disso, consideramos que a  $SNR_{tx}^P$  e a  $SNR^P$  são medidas pelo usuário primário (receptor) e a  $SNR_p^P$  é medida pelo usuário secundário (transmissor).

Como na Seção 4.2.1, representamos a atenuação da potência de transmissão referente à propagação do sinal entre dois usuários a uma distância  $d$  de separação

como obedecendo a função  $loss(d) = d^{-\alpha}$ . Porém estabelecemos diferentes funções  $loss(.)$  de acordo com o sentido da transmissão, ou seja, os caminhos de propagação podem sofrer diferentes atenuações, explicitadas pelo coeficiente  $\alpha$ .

Assim,  $loss_P(.)$  representa a função de atenuação correspondente à comunicação entre usuários primários;  $loss_{PO}(.)$  corresponde à transmissão por um usuário primário e a recepção por um usuário secundário; e  $loss_{OP}(.)$  se o transmissor for secundário e o receptor, primário.

Adotaremos nesta modelagem que nos percursos de propagação do sinal de um primário isoladamente ( $loss_P$ ) e de um primário até encontrar um secundário ( $loss_{PO}$ ), o coeficiente será  $\alpha_1$ . No percurso de propagação entre um secundário e um primário ( $loss_{OP}$ ) o coeficiente será  $\alpha_2$ .

### Limite de Potência de Transmissão para Rede Secundária

Examinaremos a potência agregada máxima permitida para a rede secundária enquanto ainda se garante a decodificação para o usuário primário, ou seja,  $SINR \geq SNR_{tx}^P$ .

Dada uma comunicação ocorrendo entre um par de usuários primários, chamaremos a potência do transmissor primário e a dos transmissores secundários agregados percebidas pelo receptor primário, respectivamente, como  $Pr_P$  e  $Pr_{\Sigma O}$ . A garantia da recepção pode, portanto, ser expressa como:

$$SINR \geq SNR_{tx}^P \therefore \frac{Pr_P}{Pr_{\Sigma O} + I} \geq 10^{\frac{SNR_{tx}^P}{10}} \therefore$$

$$Pr_{\Sigma O} \leq Pr_P \left( 10^{\frac{-SNR_{tx}^P}{10}} \right) - I \quad (4.7)$$

Também podemos expressar  $Pr_P$  com relação à SNR e a  $\delta_{tx}$  (Equação 4.4):

$$SNR^P = SNR_{tx}^P + \delta_{tx} \therefore 10 \log\left(\frac{Pr_P}{I}\right) = SNR_{tx}^P + \delta_{tx} \therefore$$

$$Pr_P = I \left( 10^{\frac{-SNR_{tx}^P + \delta_{tx}}{10}} \right) \quad (4.8)$$

Substituindo a Equação 4.8 na Equação 4.7, vemos que a rede secundária deve garantir o seguinte limiar para sua potência agregada,  $Pr_{\Sigma O}$ :

$$Pr_{\Sigma O} \leq I(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) \quad (4.9)$$

### Transmissor Secundário Ideal

Examinaremos agora o limiar para um usuário secundário que varia sua potência de acordo com sua proximidade do usuário primário transmissor.

A restrição de potência neste caso deverá considerar o seguinte, baseando-se na Equação 4.9:

$$Pr_{\Sigma O} \leq I(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) \therefore P_{O}loss_{OP}(d^O - d^P) \leq I(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) \therefore$$

$$P_O \leq \frac{I(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1)}{loss_{OP}(d^O - d^P)} \quad (4.10)$$

Visto que essas distâncias não são conhecidas do usuário secundário, tentaremos representá-las em relação à SNR. Começaremos por  $d^P$ , realizando uma subtração entre as Equações 4.3 e 4.4:

$$\begin{aligned} L - \delta_{tx} &= 10 \log\left(\frac{P_P}{I}\right) - SNR_{tx}^P - (SNR_P - SNR_{tx}^P) \\ &= 10 \log\left(\frac{P_P}{I}\right) - 10 \log\left(\frac{P_P \cdot loss_P(d^P)}{I}\right) \therefore \end{aligned}$$

$$loss_P(d^P) = 10^{\frac{-L + \delta_{tx}}{10}} \therefore$$

$$d^P = loss_P^{-1}\left(10^{\frac{-L + \delta_{tx}}{10}}\right) \quad (4.11)$$

Onde  $loss^{-1}(d) = d^{-\frac{1}{\alpha}}$  é a função inversa da função de atenuação.

Em seguida, passamos a  $d^O$ , realizando uma adição entre as Equações 4.3 e 4.6:

$$\begin{aligned}
L + \delta &= 10 \log\left(\frac{P_P}{I}\right) - SNR_{tx}^P + (SNR_{tx}^P - SNR^O) \\
&= 10 \log\left(\frac{P_P}{I}\right) - 10 \log\left(\frac{P_P \cdot loss_{PO}(d^O)}{I}\right) \therefore
\end{aligned}$$

$$loss_{PO}(d^O) = 10^{-\frac{L-\delta}{10}} \therefore$$

$$d^O = loss_{PO}^{-1}\left(10^{-\frac{L-\delta}{10}}\right) \quad (4.12)$$

As Equações 4.11 e 4.12 nos permitem reescrever a Equação 4.10 em relação à SNR:

$$\frac{P_O}{I} \leq \frac{(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1)}{loss_{OP}(d^O - d^P)} = \frac{(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1)}{loss_{OP}\left(loss_{PO}^{-1}\left(10^{-\frac{L-\delta}{10}}\right) - (loss_P^{-1}\left(10^{-\frac{L+\delta_{tx}}{10}}\right))\right)} \therefore$$

$$\frac{P_O}{I} \leq \frac{(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1)}{loss_{OP}\left(loss_{PO}^{-1}\left(10^{-\frac{L-\delta}{10}}\right) - (loss_P^{-1}\left(10^{-\frac{L+\delta_{tx}}{10}}\right))\right)} \quad (4.13)$$

Após isso, vamos convertê-la para valores em dB e incluir os coeficientes da função de atenuação:

$$\begin{aligned}
10 \log\left(\frac{P_O}{I}\right) &\leq 10 \log(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) + 10 \log\left(10^{\frac{-(-L-\delta)}{10\alpha_1}} - 10^{\frac{-(-L+\delta_{tx})}{10\alpha_1}}\right)^{\alpha_2} \\
&\leq 10 \log(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) + 10\alpha_2 \log\left(10^{\frac{L+\delta}{10\alpha_1}} - 10^{\frac{L-\delta_{tx}}{10\alpha_1}}\right) \\
&\leq 10 \log(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) + 10\alpha_2 \log\left(10^{\frac{L}{10\alpha_1}}\left(10^{\frac{\delta}{10\alpha_1}} - 10^{\frac{-\delta_{tx}}{10\alpha_1}}\right)\right) \\
&\leq 10 \log(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) + 10\alpha_2 \log(10^{\frac{L}{10\alpha_1}}) + 10\alpha_2 \log\left(10^{\frac{\delta}{10\alpha_1}} - 10^{\frac{-\delta_{tx}}{10\alpha_1}}\right) \\
&\leq 10 \log(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) + \frac{L\alpha_2}{\alpha_1} + 10\alpha_2 \log\left(10^{\frac{\delta}{10\alpha_1}} - 10^{\frac{-\delta_{tx}}{10\alpha_1}}\right) \therefore
\end{aligned}$$

$$10 \log\left(\frac{P_O}{I}\right) \leq 10 \log(10^{\frac{\delta_{tx}}{10}} - 1) + \frac{L\alpha_2}{\alpha_1} + 10\alpha_2 \log\left(10^{\frac{\delta}{10\alpha_1}} - 10^{\frac{-\delta_{tx}}{10\alpha_1}}\right) \quad (4.14)$$

A Figura 4.5(a) mostra a plotagem da equação 4.14 utilizando  $L = 50 \text{ dB}$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 3$  e  $I = -100 \text{ dB}$ .

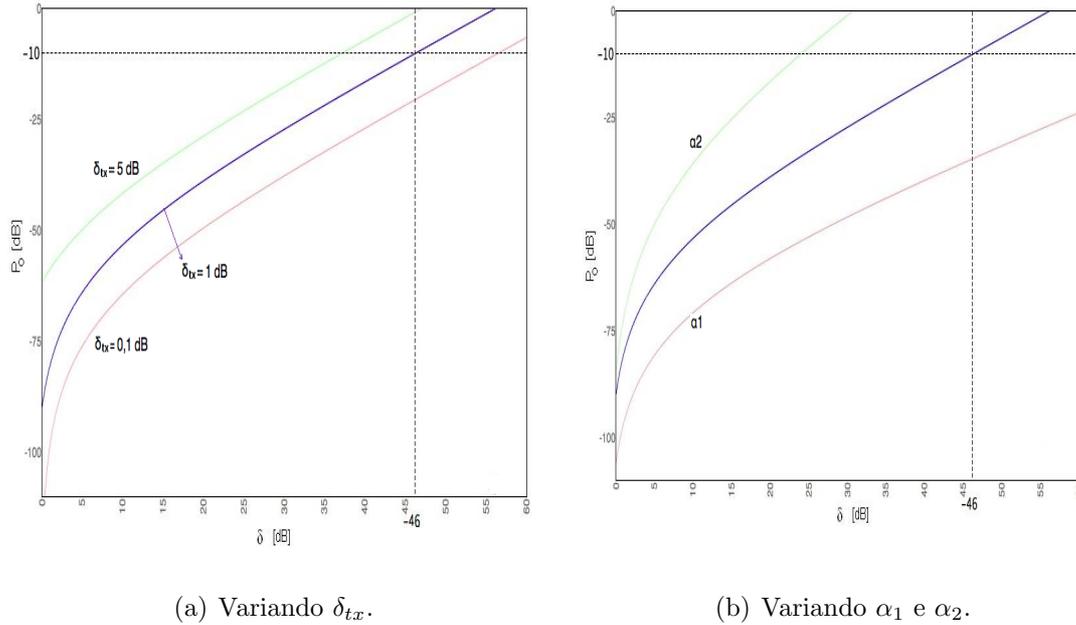


Figura 4.5: Relação entre a potência de transmissão do usuário secundário e o afastamento necessário do primário, em dB

Através dela podemos observar a relação entre a potência de transmissão utilizada pelo usuário secundário e o valor de  $(\delta)$ , que representa o “afastamento” do usuário secundário do limite da cobertura do usuário primário, de acordo com a Equação 4.6, em dB.

Se o usuário secundário escolhesse uma potência de transmissão de 100 mW<sup>1</sup>, por exemplo, seria necessário um “afastamento” de 37 dB, 46 dB ou 56 dB, caso fosse utilizado  $\delta_{tx}$  igual a 5 dB, 1 dB ou 0,1 dB, respectivamente. Essa variação no “afastamento” teria como consequência a variação na sensibilidade do detector usado pelo secundário para detectar o primário.

Para valores pequenos de  $\delta_{tx}$ , os usuários secundários utilizando baixa potência de transmissão precisariam apenas saber sua posição em relação ao limite de interferência  $I$  deslocado para sua posição, o que é equivalente à  $\delta$ . Para valores grandes de  $\delta_{tx}$ , os usuários secundários utilizando baixa potência de transmissão poderiam funcionar bem próximos do limite  $I$ . Igualmente, não seria necessário que a sensibilidade do detector usado pelo secundário para detectar o primário fosse tão alta.

<sup>1</sup>Esse valor de potência de transmissão é comum em dispositivos compatíveis com o padrão IEEE 802.11b, podendo chegar até 1W [109].

A Figura 4.5(b) mostra também a plotagem da Equação 4.14, porém com um valor fixo para  $\delta_{tx}$  e com variação nos valores utilizados como fatores de atenuação,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ .

Nela podemos observar que se o fator de atenuação no caminho do usuário secundário até o primário for maior que o do caminho do primário para o usuário secundário, ou seja, a atenuação da transmissão do usuário secundário é mais intensa, a potência usada pelo usuário secundário poderia ser maior e não seria necessário que a sensibilidade do detector usado pelo secundário para detectar o primário fosse tão alta.

Com isso, adotaremos nesta modelagem os valores de  $\delta_{tx} = 1 \text{ dB}$  e, inicialmente, de  $\delta_p = 0,05 \text{ dB}$ .

# Capítulo 5

## Avaliação de Desempenho

Este capítulo descreve a implementação da arquitetura em ambiente de simulação, assim como os resultados obtidos.

Para isto ele está dividido em quatro seções: a primeira relativa aos detalhes da implementação; a segunda à geração de cenários utilizados para avaliação; a terceira sobre as métricas utilizadas; e a quarta e última sobre os resultados obtidos.

De forma a avaliar o sistema proposto, efetuamos algumas considerações necessárias ao funcionamento das redes que são descritas a seguir:

- Na área onde as redes estão operando, não existem emissões de radiofrequência capazes de introduzir erros significativos nos mecanismos propostos;
- As comunicações se darão sem erros. A existência de erros causaria a retransmissão de pacotes, dado que não foi considerado para as métricas avaliadas nesta etapa da avaliação;
- Nesta avaliação, toda a comunicação acontece a partir da troca de mensagens. Entretanto, nesta etapa da avaliação, não consideramos a vazão nem o uso de protocolos de roteamento porque a comunicação em questão se resume ao envio de um pacote de dados e o recebimento de um pacote de reconhecimento com o propósito de validar o processo de detecção;

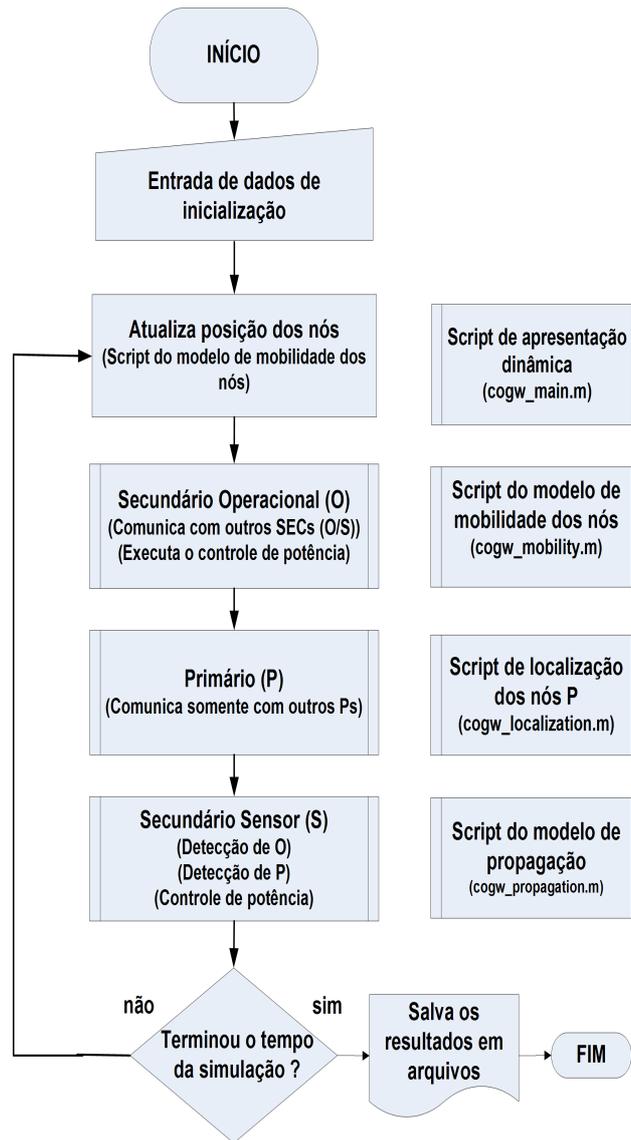


Figura 5.1: Fluxograma do simulador construído usando o Matlab.

## 5.1 Implementação

Para avaliar o comportamento da rede cognitiva proposta na nossa arquitetura (Seção 4.1), construímos um simulador, baseado em *time steps*, onde cada segundo equivale a 10 unidades de tempo do simulador (UTS), usando a ferramenta Matlab [110]. Este simulador foi dividido em blocos de processos e o seu fluxograma pode ser visto na Figura 5.1.

Os blocos que representam os processos predefinidos localizados no lado direito da Figura 5.1 representam as sub-rotinas que realizam funções específicas de apoio às funções principais do simulador.

Essas sub-rotinas mostram a evolução dinâmica dos nós no cenário, desempe-

nham as funções de posicionamento dos nós de acordo com o cenário gerado e conforme o modelo de mobilidade, estimam a localização dos nós primários detectados pelos nós sensores (mecanismo de localização do primário (Subseção 4.1.2) e calculam o desvanecimento do sinal de acordo com o modelo de propagação estabelecido, escolhido dentre os seguintes:

- *Outdoor*:
  - *Free Space*;
  - *Power Scale*.
  
- *City (Urban)*:
  - *Young Model (two-ray ground)*;
  - *Okumura Model*;
  - *Hata Model for Urban Areas*;
  - *Hata Model for Suburban Areas*.
  
- *Indoor*:
  - *Log-distance path loss model*.

Ao longo da descrição dos processos são feitas referências às mensagens trocadas pelos nós, utilizadas no simulador, conforme a Tabela 5.1, que também é comentada na Seção 4.1. Os nós primários utilizam somente as mensagens *talk* e *ack* para o estabelecimento das suas comunicações. A fila de transmissão dos nós possui comprimento de 1000 bytes.

Os blocos que representam os processos predefinidos: secundário operacional (O), primário (P) e secundário sensor (S) serão detalhados em seguida.

- *Processo secundário operacional (O)*.

Cabe a este processo realizar as funções desempenhadas pelo nó operacional na rede secundária. O fluxograma correspondente pode ser visto na Figura 5.2.

O nó operacional pode estabelecer comunicações com os outros nós operacionais no seu alcance, a partir de uma fonte de dados seguindo o padrão de tráfego

Nome	Tamanho	Origem	Destino	Ação
<i>talk</i>	100 bytes	P/O	P/O	solicita comunicação e envia dados
<i>ack</i>	20 bytes	P/O	P/O	aceita comunicação e reconhece dados
<i>detecção</i>	20 bytes	S	O	informa detecção de nó primário
<i>hold-on</i>	20 bytes	O	O	suspende comunicações por $\Delta_t$ UTS
<i>posição</i>	20 bytes	S	O	informa posição de nó primário
<i>controle-Pt</i>	20 bytes	S	O	informa mudança de potência TX

Tabela 5.1: Mensagens trocadas pelos nós.

assintótico, simulando o funcionamento de uma rede sem fio para troca de dados. Esta funcionalidade é desempenhada pelo sub-processo de troca de dados.

Com outros nós operacionais a comunicação é bidirecional, enquanto que com os nós sensores é apenas unidirecional, no sentido do nó operacional.

O alcance deste nó é variável entre zero (não transmite) e o alcance estabelecido para o nó primário, definido como *alcance padrão*.

Após isso, ele aguarda o recebimento de uma *mensagem controle-Pt* originada em um nó sensor, que efetivamente regula a sua potência de transmissão. Esse ajuste é efetivado na próxima rodada.

Caso o nó receba uma *mensagem detecção* ou uma *mensagem posição* proveniente de um nó sensor ele envia uma *mensagem hold-on* para aqueles nós operacionais com quem mantém comunicação, significando uma suspensão da comunicação por  $\Delta_t$  unidades de tempo do simulador (UTS) para evitar a interferência causada nos nós primários. Após isso, a comunicação é restabelecida.

- *Processo primário (P)*.

Cabe a este processo realizar as funções desempenhadas pelo nó primário da rede primária. O fluxograma correspondente pode ser visto na Figura 5.3.

Ao nó primário cabe estabelecer comunicações com os outros nós primários no seu alcance, a partir de uma fonte de dados do tipo ON/ OFF exponencial, simulando o funcionamento de uma rede sem fio para troca de dados. Esta funcionalidade é desempenhada pelo sub-processo de troca de dados. O alcance

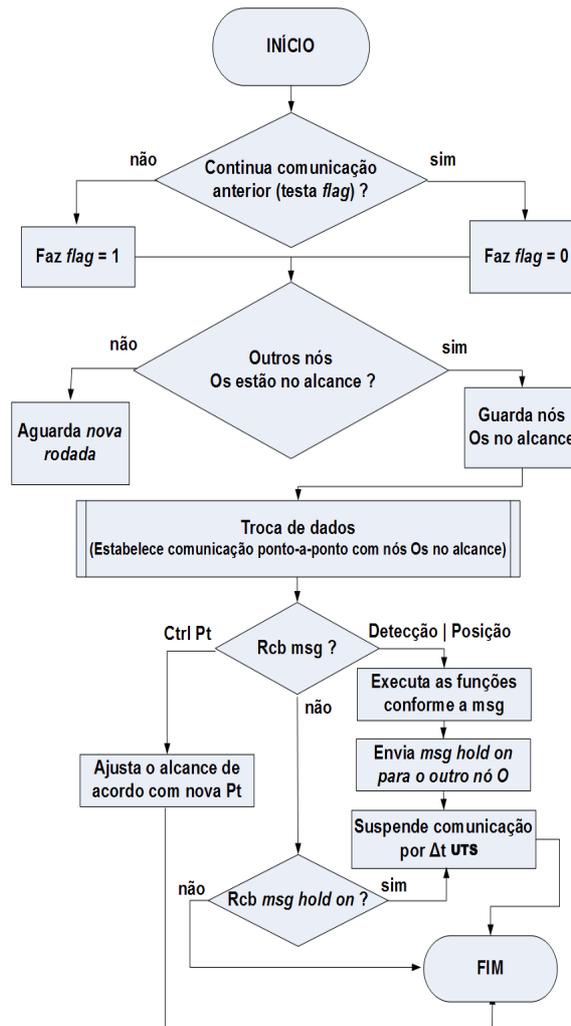


Figura 5.2: Fluxograma do processo Secundário Operacional (O).

deste nó é fixo e definido como *alcance padrão*.

- *Sub-processo de troca de dados.*

O objetivo deste sub-processo é estabelecer as comunicações (troca de pacotes) entre os nós operacionais, na rede secundária, e entre os nós primários, na rede primária. Essas comunicações acontecem dentro de cada rede individualmente, ou seja, não há comunicação entre a rede primária e a secundária. O fluxograma deste sub-processo pode ser visto na Figura 5.4.

A primeira tarefa é obter o conjunto de nós que efetuarão a comunicação, quer seja na rede primária ou na secundária. Com esta informação, o nó origem envia uma *mensagem talk* para o nó destino e aguarda o recebimento de uma *mensagem ack*, que representa uma comunicação sem problemas. Para referência

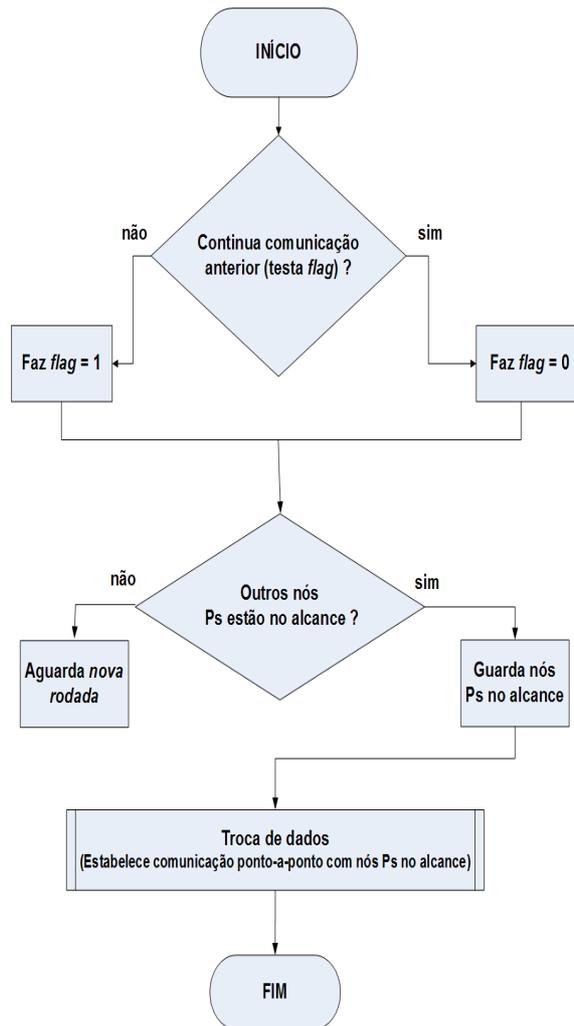


Figura 5.3: Fluxograma do processo Primário (P).

futura, a identificação dos nós que responderam com a *mensagem ack* é armazenada.

- *Processo secundário sensor (S)*.

O nó sensor é aquele que desempenha as principais funções na rede secundária. É ele quem detecta os demais nós, estima sua localização, mede os parâmetros físicos e verifica se o limite de interferência está sendo violado.

Nesta situação, o nó sensor efetua o cálculo da nova potência de transmissão do nó operacional que está transmitindo, adequando os limites de interferência ao valor previamente estabelecido para o funcionamento da rede primária.

O alcance deste nó é fixo e igual ao dobro do alcance padrão.

Por conta desta maior complexidade, este processo foi dividido nos módulos abaixo.

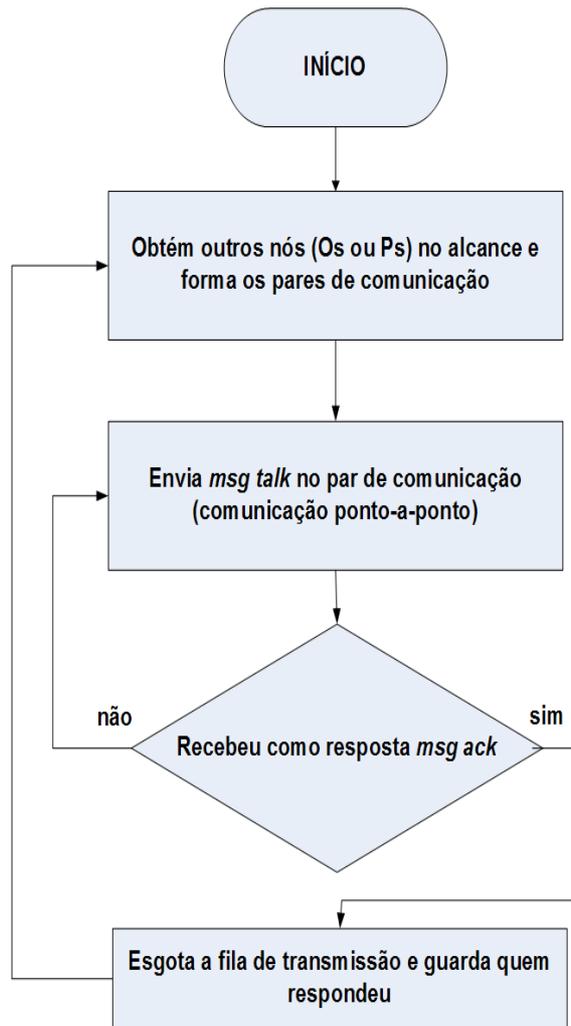


Figura 5.4: Fluxograma do sub-processo de troca de dados.

- Módulo de detecção de nós operacionais.

Este módulo compõe parte do mecanismo de detecção de transmissão (Subseção 4.1.2) e sua função é realizar a detecção da transmissão dos nós operacionais dentro do alcance do nó sensor. O fluxograma deste módulo pode ser visto na Figura 5.5.

Inicialmente, o nó sensor funciona em modo “passivo” a procura de nós operacionais que estejam transmitindo.

Após isso, o nó sensor efetua a medição do SNR dos nós operacionais transmissores e armazena as informações acerca da potência de transmissão e da posição desses nós, coletadas do cabeçalho das mensagens trocadas.

Com estas informações, são calculadas e armazenadas as distâncias até os nós

operacionais detectados ( $d$ ) e a atenuação de cada sinal no percurso ( $att_d$ ), usando o modelo de atenuação escolhido.

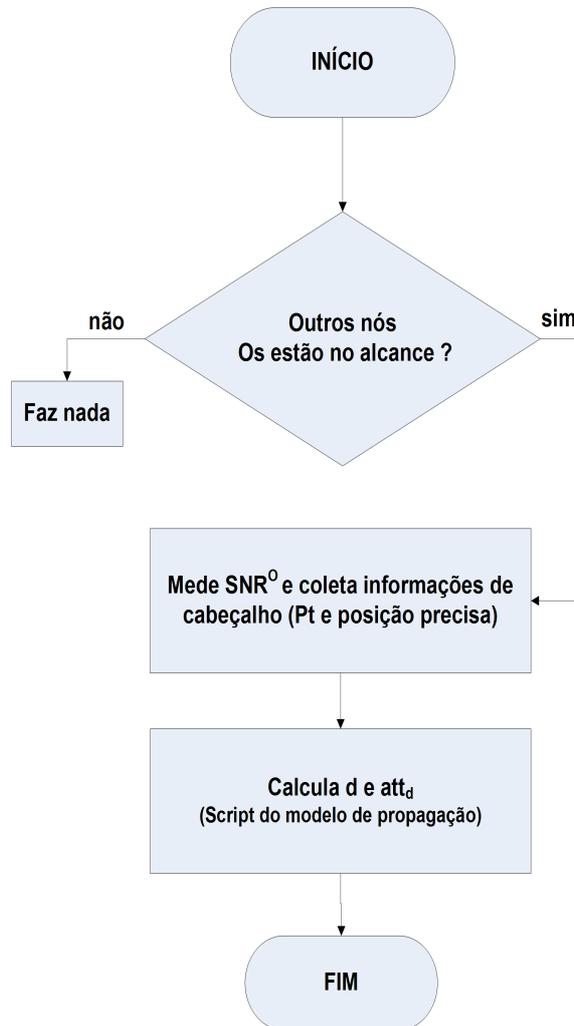


Figura 5.5: Fluxograma do módulo que efetua a detecção de nós operacionais.

- Módulo de detecção de nós primários;

Este módulo compõe parte do mecanismo de detecção de transmissão (Subseção 4.1.2) e sua função é realizar a detecção da transmissão dos nós primários dentro do alcance do nó sensor. O fluxograma correspondente pode ser visto na Figura 5.6.

Caso o nó sensor detecte algum nó primário transmitindo, ele envia uma *mensagem detecção* para os nós operacionais no seu alcance, obtidos do módulo de detecção de nós operacionais, alertando sobre a existência de uma rede primária ativa próxima.

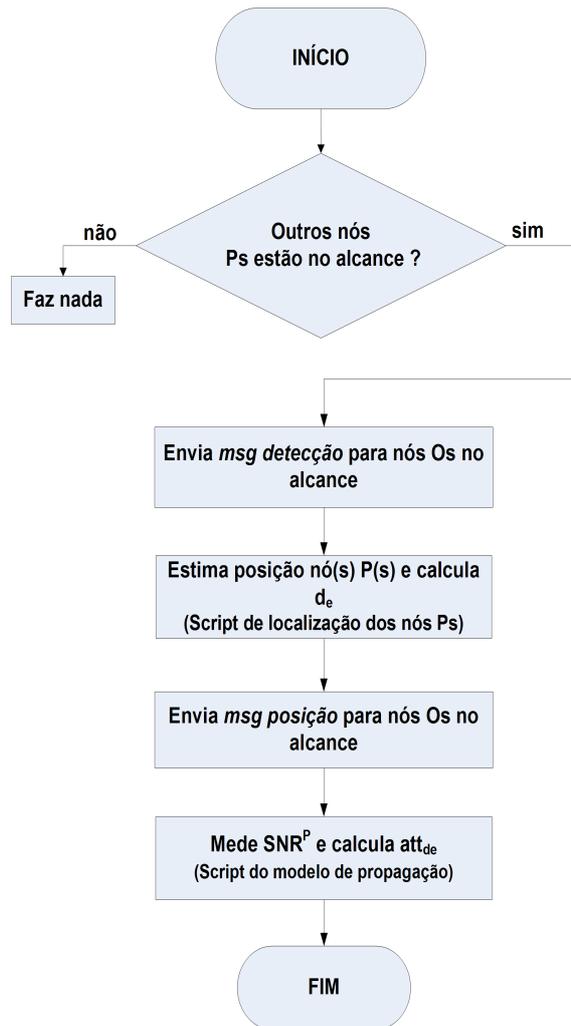


Figura 5.6: Fluxograma do módulo que efetua a detecção de nós primários.

Após isso, o nó sensor estima a posição dos nós primários transmissores e estabelece “linhas de posição” a partir da sua própria posição, conforme a Figura 4.1, descrita na Subseção 4.1.2. Com esta informação, uma *mensagem posição* é enviada para os nós operacionais no seu alcance.

Com as posições estimadas, são calculadas e armazenadas as distâncias até os nós primários detectados ( $d_e$ ) e a atenuação de cada sinal no percurso ( $att_{d_e}$ ), usando o modelo de atenuação escolhido.

- Módulo de controle de potência.

A função deste módulo é realizar o controle da potência de transmissão dos nós operacionais que estejam transmitindo dentro do alcance do nó sensor e que tenham sido detectados. O fluxograma deste módulo pode ser visto na

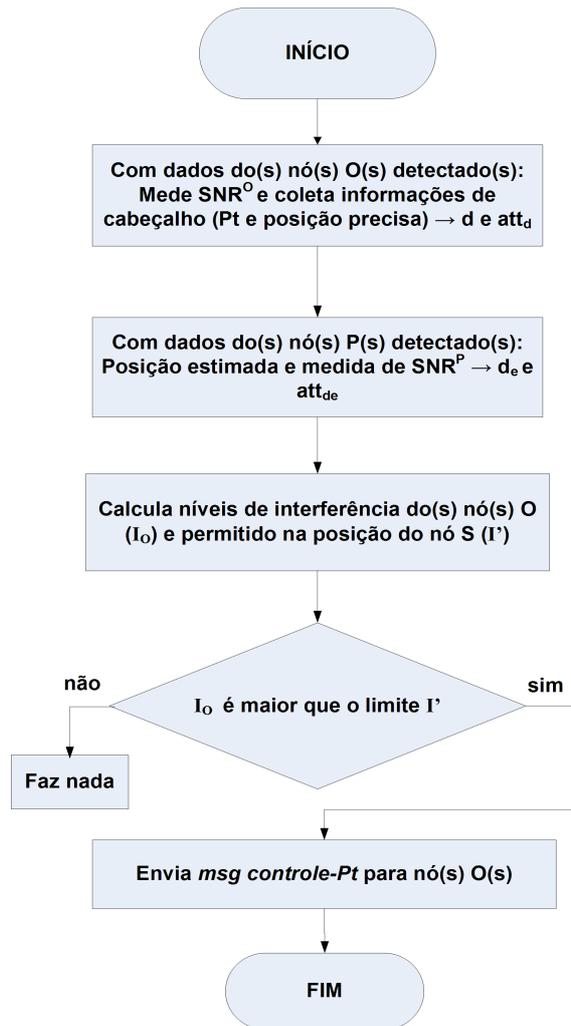


Figura 5.7: Fluxograma do módulo que efetua o controle da potência de transmissão dos nós operacionais.

Figura 5.7.

Com os dados calculados e armazenados pelos módulos anteriores, o nó sensor efetua o cálculo dos níveis de interferência causados pelos nós operacionais transmissores e o nível de interferência permitido sobre a rede primária, referenciado à sua posição ( $I'$ ) (Figura 4.1).

Após isso, o nó sensor compara esses dois valores e envia uma *mensagem controle-Pt* para os nós operacionais transmissores, com as informações necessárias para que os nós ajustem sua potência de transmissão, caso o limite permitido de interferência tenha sido ultrapassado.

## 5.2 Cenários

Para avaliar nossa implementação, criamos um grupo de 5 cenários fixos e 5 cenários móveis, com 4 nós sensores e 10 nós operacionais, formando a rede secundária, e 10, 20, 30, 40 e 50 nós primários, formando a rede primária.

Inicialmente, utilizamos a ferramenta *Scenario Generator - ScenGen*<sup>1</sup> [112] para desenvolver um modelo de mobilidade híbrido para ser utilizado na simulação, denominado *mixed waypoint*, correspondente ao movimento de um grupo que patrulha uma determinada região.

Neste modelo, a área quadrada disponível de 100m x 100m é dividida em quatro setores pelas diagonais do quadrado. Em setores opostos, duas regiões quadradas, de 45m x 45m, com superposição no centro do quadrado são dispostas para abrigarem as duas redes, primária e secundária. Dentro de uma das regiões são dispostos aleatoriamente os nós operacionais e dentro da outra, os nós primários (Figura 5.8). Nas respectivas regiões, foram considerados dois tipos de movimento: o movimento individual dos membros de cada região relativo ao centro da região e o movimento da região como um todo, aplicando-se o modelo de movimentação ao centro da região. Foram utilizados como base os modelos *Random Waypoint* e *Brownian Motion*, respectivamente, para modelar os dois movimentos citados.

O movimento dos nós sensores segue o modelo de mobilidade *Fixed Waypoint (FWP)* e acontece em movimentos opostos sobre as duas diagonais do quadrado que forma a área total. Os modelos de mobilidade utilizados estão descritos em [113].

A posição dos nós em ambas as redes é importante. Entretanto, a exigência é de que não haja uma total intersecção entre as redes primária e secundária, pois caso contrário poderia haver uma paralisação das transmissões na rede secundária a fim de se manter o limite de interferência até  $I$ . Por esse motivo as regiões correspondentes às redes primária e secundária não se sobrepõem por completo.

Lembrando de que os cenários propostos visam representar a movimentação de um grupo de patrulha, os nós primários e operacionais movem-se com velocidades

---

<sup>1</sup>É uma ferramenta para gerar cenários de mobilidade para o ns-2 [111]. O ScenGen foi desenvolvido em C++ e implementa alguns modelos de mobilidade, entre eles o *Random Waypoint*, *Fixed Waypoint*, *Reference Point Group Mobility* e *Brownian Motion*. Modelos híbridos podem ser construídos de modo que novas cenários possam ser aplicados nas simulações.

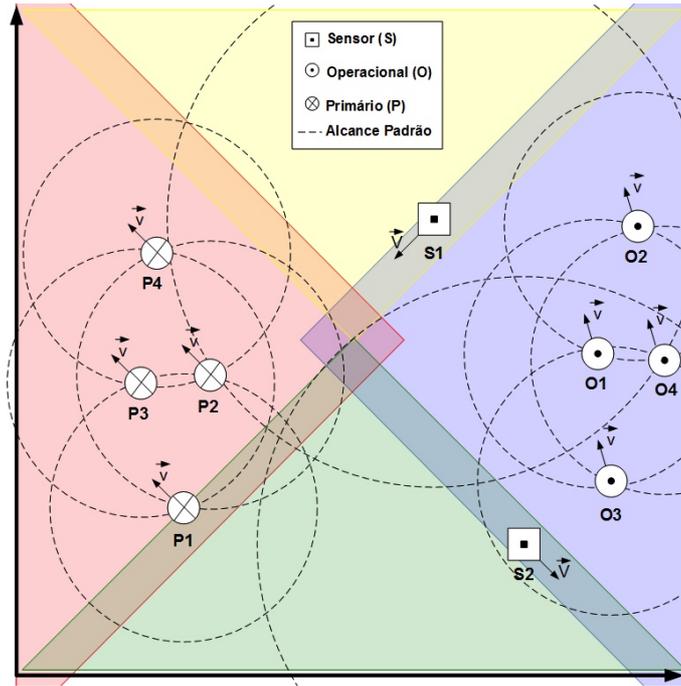


Figura 5.8: Área de simulação e regiões de posicionamento dos nós.

que assumem valores distribuídos uniformemente dentro de quatro intervalos. São eles: 0,1 a 0,3m/s; 0,5 a 0,9m/s; 1,0 a 1,8m/s; e, 2,7 a 8,3m/s. Os três primeiros intervalos simulam as velocidades de uma caminhada lenta até uma corrida moderada. O último intervalo simula a utilização de um veículo com velocidade máxima de aproximadamente 30Km/h. Quando ocorre mudança da direção do movimento é feita uma pausa cujo valor é distribuído uniformemente entre o intervalo de 0 a 2s.

Os nós sensores movem-se com velocidades médias iguais a 5m/s, 7m/s, 9m/s e 10m/s e na mudança da direção do movimento fazem uma pausa cujo valor é distribuído uniformemente entre o intervalo de 0 a 1s. Os grupos se movimentam com velocidade média de 1m/s a partir do centro do grupo.

O tempo de simulação é de 300 segundos. Com esses dados, geramos através do *ScenGen* 30 cenários para cada um dos 5 cenários com mobilidade, e mais 30 cenários para cada um dos 5 cenários sem mobilidade. Desta forma, foram então armazenados 300 cenários.

Posteriormente, através de programa próprio em linguagem Matlab [110], geramos outros cenários, com o mesmo número de nós, porém aumentamos a área quadrada correspondente à região de simulação variando o lado do quadrado de 100m a 3000m em passos de 100m. Desta forma foram gerados mais 8700 cenários.

Cada simulação foi então executada, para cada configuração, em 30 rodadas, uma para cada cenário específico. Portanto, os gráficos gerados possuem barras de erro, em torno das médias das amostras, correspondentes a 30 amostras, utilizando intervalo de confiança de 95%.

### 5.3 Métricas

Nossa intenção é mostrar que é possível que uma rede secundária funcione sem interferir prejudicialmente na rede licenciada, desde que essa divulgue o limite de interferência permitido na posição do seu transceptor. Para tanto, avaliamos individualmente em cada cenário o *percentual de interferência (PI)* maior que  $I$  no transceptor primário dada uma comunicação entre nós operacionais. Cabe ressaltar que não estamos considerando nesta métrica a interferência causada internamente na rede secundária, ou seja, entre os próprios nós secundários.

Queremos mostrar também que podemos manter a qualidade das comunicações na rede secundária mesmo sob restrição da interferência por ela causada avaliando a conectividade dos nós operacionais. Nesse caso, avaliamos o *percentual de enlaces quebrados (PEQ)* na rede secundária por conta do controle de potência realizado pelo nó operacional.

Como comparação, criamos uma entidade externa à rede que possui todas as informações da sua dinâmica ao longo do tempo da simulação, porém sem os erros de posicionamento e localização e sem os erros de detecção do primário transmissor. Essa entidade fornece os valores *ideais* das métricas avaliadas, PI e PEQ.

### 5.4 Resultados Obtidos

Para a simulação, utilizamos uma área quadrada sem obstáculos de lado igual a  $D$  onde dispomos os nós para cada um dos cenários. As variáveis usadas, bem como os valores que elas assumem estão resumidos na Tabela 5.2.

Para efeitos de cálculo, consideramos que o meio de transmissão é a atmosfera, ao nível do mar, com índice de refração unitário e que a velocidade de propagação das ondas de RF nesse meio é igual à velocidade de propagação da luz no vácuo.

Nome	Valor	Conteúdo
$D$	100m-3000m	lado da área quadrada
$f$	1 GHz	frequência utilizada
$\eta$	-100.9 dBm	ruído de fundo
$Y$	$N(0.01d; 0.05d^2)$	erro em distância (RSS)
$\epsilon$	1%	erro no posicionamento
$\phi$	1%	erro no AoA
$G$	0 dB	ganho das antenas
$h$	1m	altura das antenas
$L$	1%	perda interna
$d_0$	41m	distância de referência
$\Delta_t$	5 UTS	tempo de <i>hold-on</i>

Tabela 5.2: Variáveis usadas.

A potência de transmissão (EIRP) vale 20 dBm, que corresponde ao alcance padrão, e a taxa de transmissão para ambas as redes, primária e secundária, vale 8 Kbps. Esse valor baixo da taxa de transmissão corresponde ao valor usual de um canal que permite comunicação segura para aplicações militares.

A escolha do modelo de propagação determinará o alcance de comunicação de cada nó. Fizemos nossa escolha dentre os modelos implementados de modo que o alcance máximo de cada nó estivesse em torno de 900 m. Este alcance permite a maior interação entre os nós, em ambas as redes, possibilitando a obtenção de medidas mais consistentes. O tempo máximo da troca de mensagens (RTT) é da ordem de algumas centenas de  $\mu$ segundos, considerando a maior distância entre os nós.

Em relação à localização dos nós primários transceptores, consideramos um erro único na estimação da sua distância  $d$ , que contabiliza os erros variáveis e os estáticos dependentes do cenário, modelado como uma variável aleatória normal  $Y \sim N(\mu, \sigma^2)$  [103]. O erro na determinação do ângulo de chegada ( $\phi$ ) e o erro devido ao sistema de posicionamento ( $\epsilon$ ) são fixos.

No cenário móvel, o deslocamento dos nós durante o tempo da troca de mensagens mais o tempo gasto pelo algoritmo de localização para conseguir estimar a

posição varia entre 0,36 m e 29,88 m, conforme o intervalo de velocidades.

Consideramos uma interferência sobre um nó primário quando o valor do nível de interferência  $I$  sobre ele é ultrapassado. Como forma de ajuste para o mecanismo de controle de potência, usamos inicialmente em todos os cenários o valor de 5% (0,05dB) para a faixa de proteção <sup>2</sup>  $\delta_p$  no cálculo de  $I'$  (limite de interferência projetado sobre a posição do nó sensor).

Usamos o valor de  $I$  equivalente a -90 dBm semelhante ao utilizado como limite de detecção da portadora nas interfaces comerciais que seguem o padrão IEEE 802.11b. O valor de  $I$  utilizado refere-se ao limite (fixo) de interferência tolerado pelos nós primários, que é divulgado no início da operação da rede primária.

Os receptores, de um modo geral, possuem um limiar mínimo de recepção abaixo do qual é improvável que um pacote seja corretamente decodificado [74]. Consideramos este limiar mínimo como equivalente ao ruído de fundo (*noise floor*).

O tráfego de dados na rede primária é modelado como uma fonte ON/OFF exponencial, com média do período ON e OFF, iguais, respectivamente, a 700 ms e 300 ms. Os dados são gerados a taxa de 64 Kbps durante o período ON. De posse dessas informações passamos a analisar os resultados.

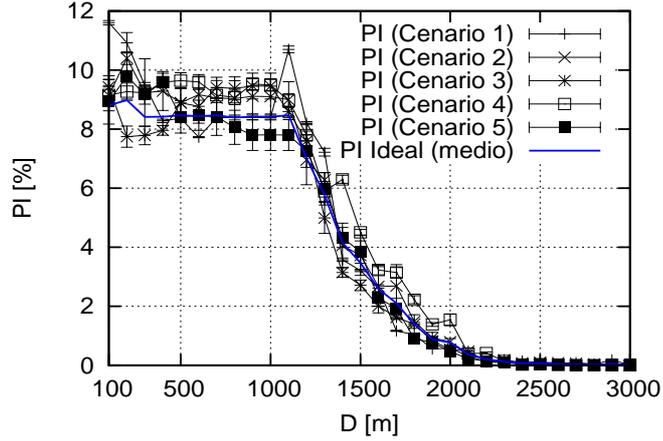
Na Figura 5.9(a), relacionada aos *cenários fixos*, observamos que o *PI medido* manteve-se estável com a variação do número de nós, embora para  $D$  entre 100m e 1500m o valor do PI estivesse variando entre 8% e 12% e o PI ideal médio, calculado como a média dos valores do PI ideal para os cinco cenários, próximo de 8,5%, que é um percentual alto.

O que aconteceu neste caso é que havia uma estimativa inicial para a faixa de proteção  $\delta_p$  que não estava adequada. Ao ajustarmos o valor de  $\delta_p$  de 5% para 7,5%, obtivemos valores mais baixos para o PI (Figura 5.9(b)). Assim, assumimos este novo valor para  $\delta_p$  na continuidade dos testes.

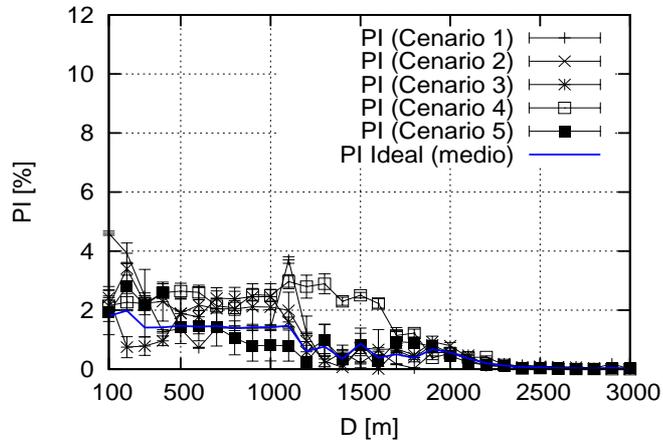
Além do valor de  $\delta_p$ , precisávamos saber a relação da variação nos erros,  $Y$ ,  $\epsilon$

---

<sup>2</sup>O uso da faixa de proteção (Seção 4.2.4) tem como objetivo minimizar os efeitos dos erros de detecção de transmissão dos nós primários, bem como os efeitos de colisão nos nós sensores entre pacotes oriundos dos nós operacionais e primários. Esses erros não são determinísticos, uma vez que suas causas também não são.



(a) Cenários fixos: métrica PI.



(b) Cenários fixos: métrica PI com  $\delta_p$  ajustado.

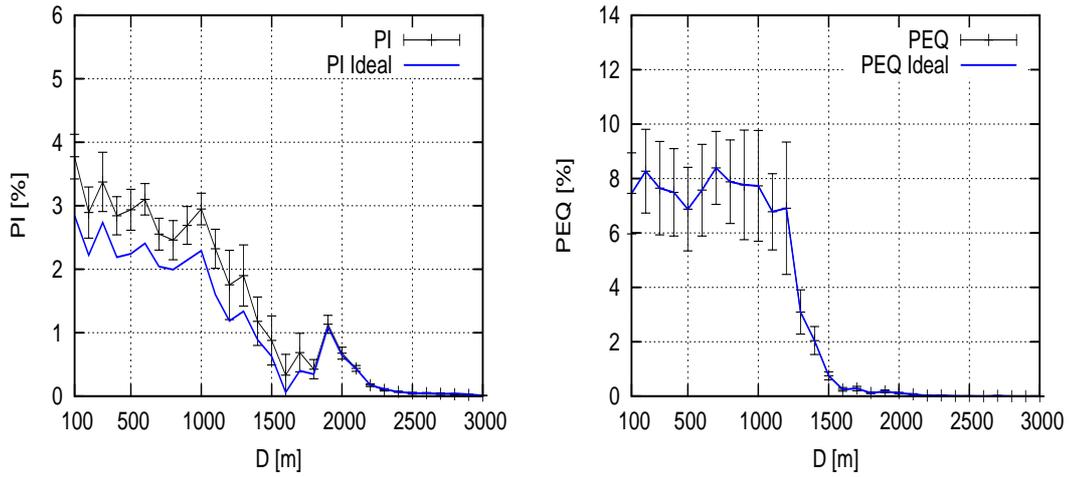
Figura 5.9: Cenários fixos.

e  $\phi$ , respectivamente, o erro em distância dado a utilização do método RSS, o erro de posicionamento e o erro na determinação do ângulo de chegada (AoA), sobre o funcionamento da rede secundária.

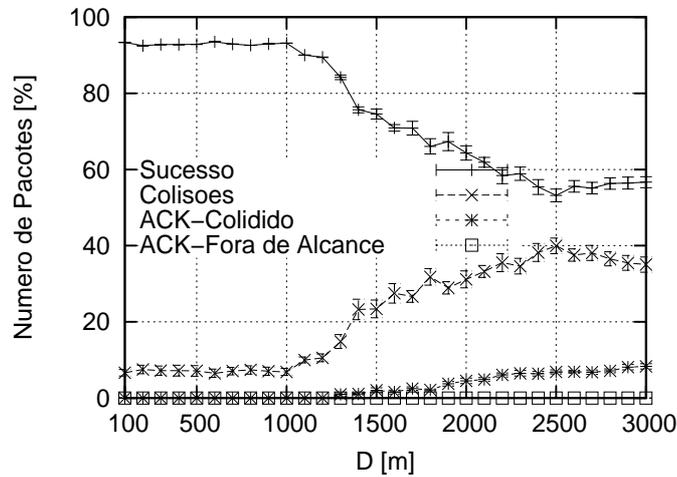
Para tanto, realizamos uma simulação onde dobramos o valor de  $Y$  e aumentamos para 5% o valor de  $\epsilon$  e  $\phi$ .

Como mostrado na Figura 5.10(a), esse aumento dos valores dos erros contribuiu para aumentar o valor do PI medido em aproximadamente 1,5% e afastá-lo do valor ideal, além de tornar o decaimento do valor de PI com a distância menos intenso. Aumentando muito mais os valores dos erros tenderíamos a impossibilitar o funcionamento da rede secundária.

Em relação ao valor do *PEQ medido* (Figura 5.10(b)), observamos que houve um aumento inicial e depois o valor se estabilizou em torno de 8%, para  $D$  entre 100m e



(a) Percentual de Interferência (PI). (b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).



(c) Pacotes trocados.

Figura 5.10: Cenários fixos com variação de parâmetros.

1100m. No intervalo de  $D$  entre 1200m e 1500m, o valor de PEQ oscilou um pouco e depois decaiu para cerca de 2%, antes de decair totalmente com o aumento de  $D$ . Com isso, a conectividade dos enlaces ( $100\% - \text{PEQ}$ ) permaneceu acima de 90% ao longo da variação de  $D$ .

Analisando as possíveis causas para esse aumento do valor medido de PEQ, para  $D$  valendo 200m e depois 1200m, observamos que o aumento do número de nós na rede primária e o consequente aumento do tráfego de dados causava uma quebra dos enlaces para os nós quando em distâncias muito próximas e no extremo do seu alcance.

Uma explicação para esse comportamento é que devido à pouca distância entre

os nós operacionais e ao aumento dos erros, havia muita necessidade de controle da potência de transmissão nos nós operacionais para esses valores de  $D$ .

Na Figura 5.10(c) podemos ver o comportamento da rede secundária no tocante a troca de mensagens (Seção 4.1). O percentual de sucessos, ou mensagens *talk* transmitidas com correspondentes mensagens *ack* recebidas, permanece maior que o de colisões, tentativas de comunicação entre nós fora do alcance um do outro, colisões de mensagens *ack* e mensagens *ack* fora de alcance ao longo da variação de  $D$ , comparando-se ao total de mensagens trocadas na rede secundária.

Desta forma, como queremos verificar o funcionamento da rede secundária efetuando o controle da sua interferência, restabelecemos os valores iniciais de  $Y$ ,  $\epsilon$  e  $\phi$ , conforme a Tabela 5.2.

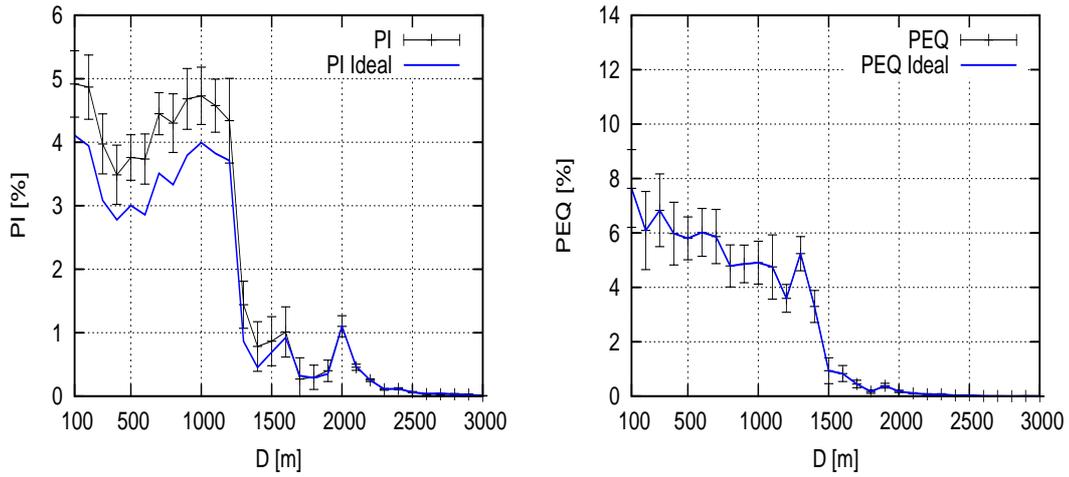
Ao percebermos que o aumento do tráfego poderia influenciar no funcionamento da rede secundária, resolvemos duplicar o valor da taxa de transmissão e analisar o comportamento da rede.

O valor do PI, como vemos na Figura 5.11(a) sofre um aumento com o aumento da taxa, além disso, percebe-se que os valores decrescem, para  $D$  entre 100m e 500m, e depois aumentam, para  $D$  entre 500m e 1100m.

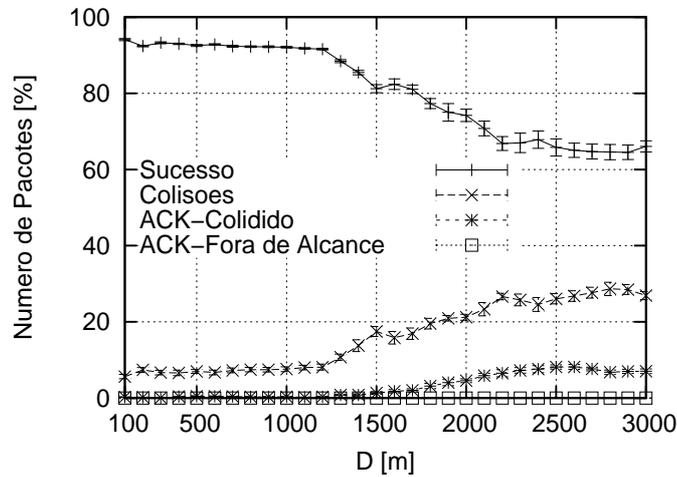
O aumento da taxa ocasionou mais oportunidades para a rede secundária uma vez que o canal passou a escoar com maior rapidez as mensagens trocadas entre os nós, que têm tamanho fixo. Esse aumento das oportunidades teve como consequência o aumento do valor do PI dentro do alcance médio dos nós.

O valor de PEQ demonstrou um ligeiro aumento (Figura 5.11(b)). Isso era esperado, pois o aumento da taxa tornou mais ágil a troca de dados entre os nós operacionais, criando novas oportunidades para outros nós e aumentando o número de enlaces criados, por sua vez, passíveis de serem quebrados. Em consequência, a conectividade dos enlaces (100%-PEQ) permaneceu acima de 86%.

No tocante à troca de mensagens, na Figura 5.11(c) podemos ver que o número de sucessos permanece maior que os demais, percentualmente ao total de mensagens trocadas na rede secundária, indicando o maior tráfego de mensagens devido à maior taxa.



(a) Percentual de Interferência (PI). (b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).



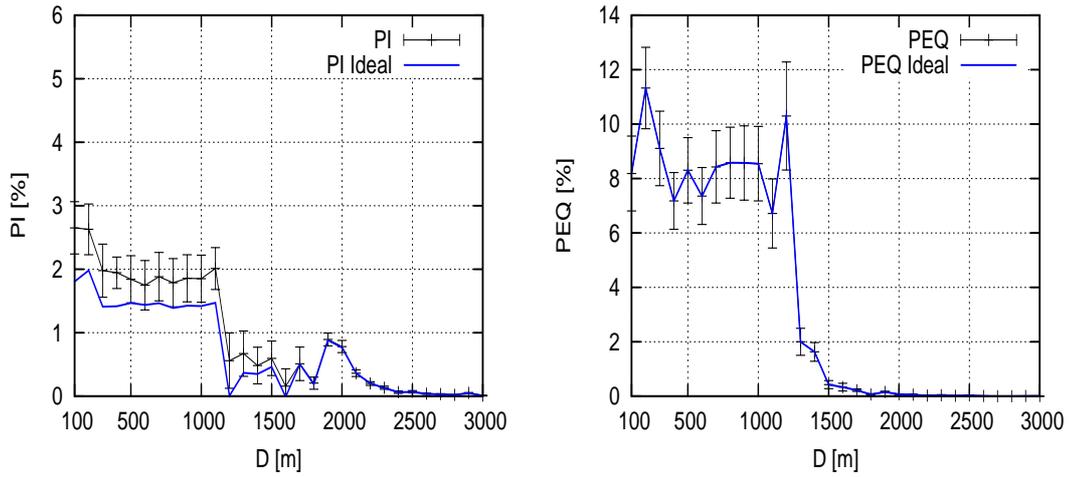
(c) Pacotes trocados.

Figura 5.11: Cenários fixos com a taxa de transmissão duplicada.

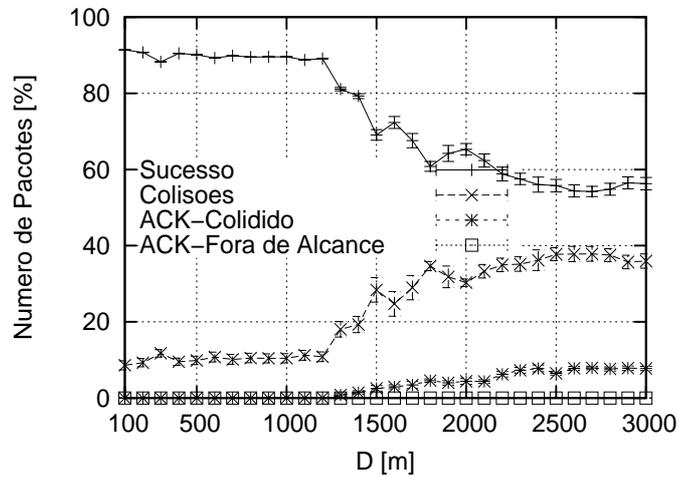
Após essas verificações, restabelecemos o valor inicial da taxa da fonte de dados e testamos o comportamento da rede secundária com os valores iniciais dos parâmetros, conforme a Tabela 5.2.

Nesta condição, observamos que o valor medido de PI decaiu de 3% para quase 2%, para  $D$  próximo de 1100m (Figura 5.12(a)), e continuou a cair, para  $D$  acima de 1100m, mantendo-se em cerca de 0,5% até  $D$  em torno de 2100m.

O valor do PEQ medido apresentou uma redução, mantendo-se entre 4% e 7%, para  $D$  entre 100m e 1100m, e, conseqüentemente, a conectividade dos enlaces (100%-PEQ) aumenta para acima de 91% de acordo com o cenário. Para valores maiores de  $D$ , por conta dos efeitos de propagação, os sinais primários têm um



(a) Percentual de Interferência (PI). (b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).



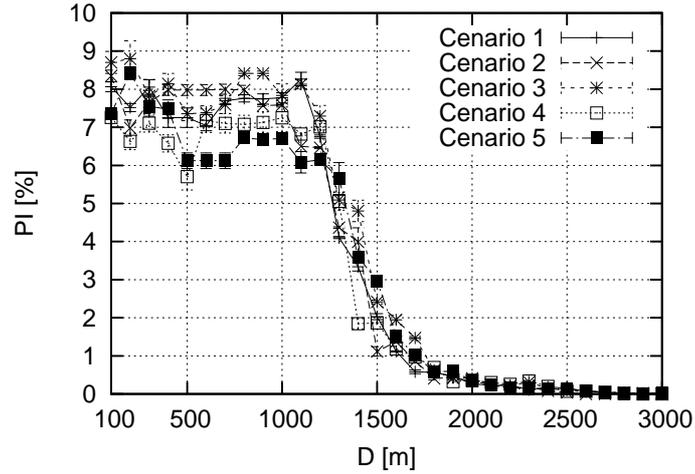
(c) Pacotes trocados.

Figura 5.12: Cenários fixos.

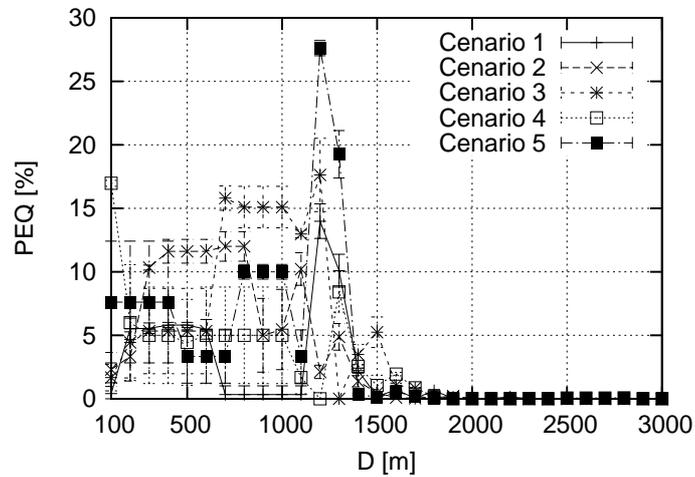
alcance efetivamente “menor”, tornando o controle de potência menos frequente e causando um decaimento mais forte da curva do PEQ medido.

Com isso demonstramos que é possível sustentar a conectividade dos enlaces (100%-PEQ) acima de 91%, simultaneamente com a limitação da interferência abaixo de 3%, mantendo-se os nós fixos, conforme o cenário.

Agora passaremos a analisar a influência da *mobilidade* nos valores medidos de PI e PEQ. Para tanto, utilizamos quatro intervalos de velocidades passíveis de serem assumidas pelos nós: 0,1 a 0,3m/s, 0,5 a 0,9m/s, 1,0 a 1,8m/s, e 2,7 a 8,3m/s, conforme descrito na Seção 5.2, equivalentes a de uma caminhada, passando pela



(a) Percentual de Interferência (PI).



(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).

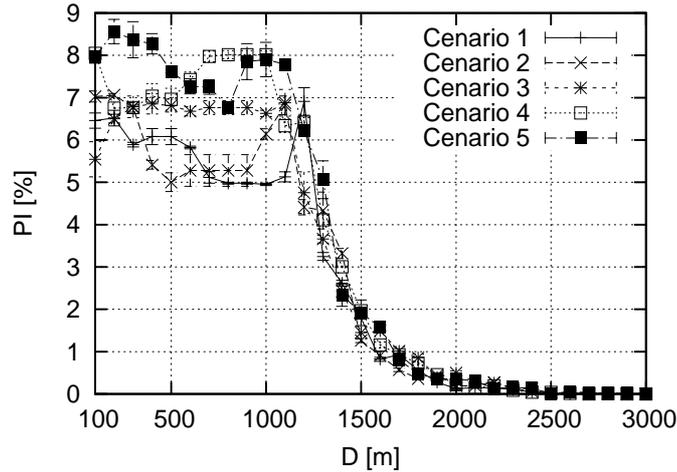
Figura 5.13: Velocidade dos nós no intervalo de 0,1m/s a 0,3m/s.

corrida, até a utilização de um veículo em baixa velocidade.

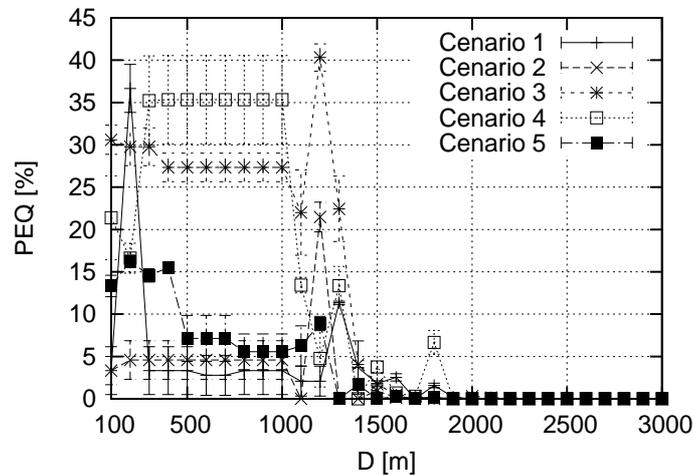
Olhando para *todos os intervalos de velocidades*, observamos em todos os cenários móveis que o valor medido de PI permaneceu entre 5% e 9% (Figuras 5.13(a), 5.14(a), 5.15(a) e 5.16(a)).

Isso demonstrou que o aumento do número de nós primários não altera significativamente o valor do PI causado pela rede secundária, embora a mobilidade dos nós tenha até triplicado o valor de PI para alguns cenários em relação ao valor medido nos cenários fixos.

O valor medido do PEQ também aumentou em relação àquele medido nos cenários fixos, indicando que a mobilidade reduziu a conectividade dos nós ope-



(a) Percentual de Interferência (PI).



(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).

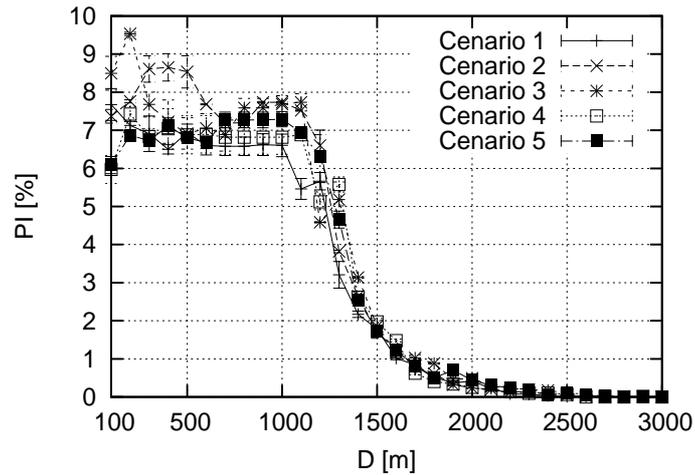
Figura 5.14: Velocidade dos nós no intervalo de 0,5m/s a 0,9m/s.

racionais (Figuras 5.13(b), 5.14(b), 5.15(b) e 5.16(b)).

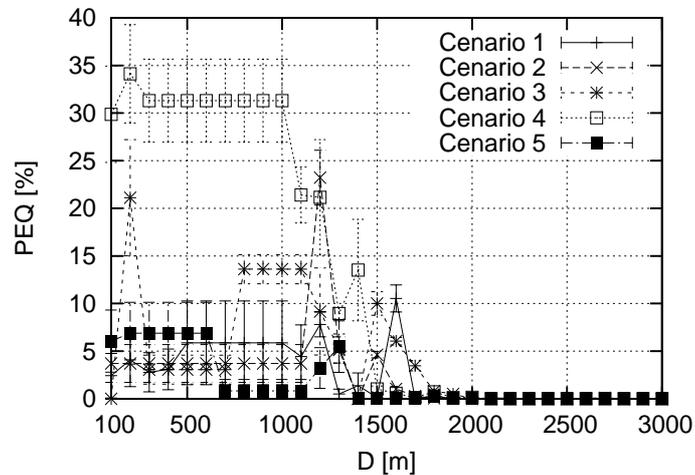
O aumento do número de nós primários conforme o cenário também contribuiu para o aumento do valor medido do PEQ. Para os cenários mais “populados”, 3, 4 e 5, com 30, 40 e 50 nós primários, respectivamente, o valor medido do PEQ teve um pico que chegou a 40%, para  $D$  na proximidade de 1100m.

Considerando que o alcance máximo dos nós está em torno de 900m, podemos atribuir esse valor de PEQ nesse valor específico de  $D$  à influência da comunicação de nós primários distantes, tornando o controle de potência dos nós operacionais mais intenso, contribuindo para a quebra de enlaces na rede secundária.

Outra observação interessante sobre o valor medido do PEQ para a velocidade



(a) Percentual de Interferência (PI).

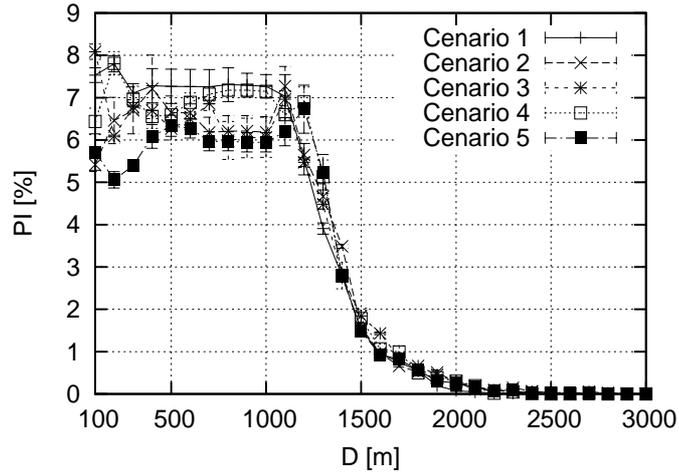


(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).

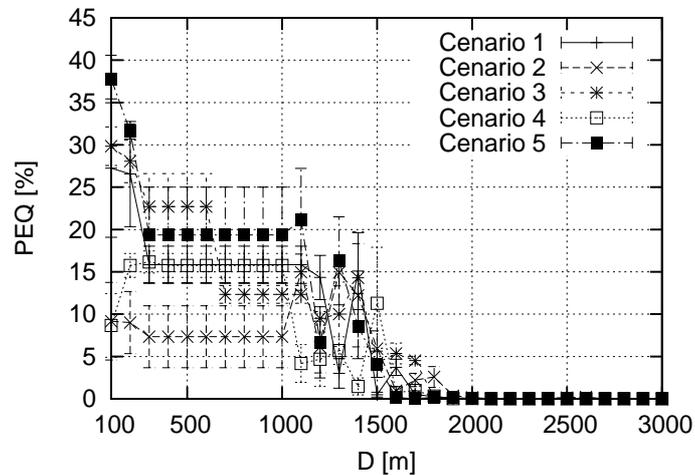
Figura 5.15: Velocidade dos nós no intervalo de 1,0m/s a 1,8m/s.

dos nós entre 0,5 a 1,8m/s, foi que, para os cenários mais “populados”, o valor medido do PEQ permaneceu bem acima dos demais cenários, para  $D$  entre 100m e 1200m, sugerindo uma sensibilidade nestas velocidades ao número maior de nós primários (Figuras 5.14(b) e 5.15(b)), diferente do ocorrido nos demais intervalos de velocidades dos nós.

Além disso, para a velocidade dos nós entre 2,7 a 8,3m/s, o valor medido do PEQ permaneceu menos disperso que nos intervalos anteriores, sugerindo que há influência do número de nós primários sobre a conectividade dos nós na rede secundária, porém de maneira mais homogênea (Figura 5.16(b)).



(a) Percentual de Interferência (PI).



(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).

Figura 5.16: Velocidade dos nós no intervalo de 2,7m/s a 8,3m/s.

Sob um outro ponto de vista, ainda relativo à influência da *mobilidade* nos valores medidos de PI e PEQ, passaremos a analisar a variação da velocidade dos nós dentro de cada cenário.

Olhando para *todos os cenários móveis*, podemos considerar que o valor medido de PI encontra-se na faixa entre 5% a 9%, confirmando a observação realizada anteriormente (Figuras 5.17(a), 5.18(a), 5.19(a), 5.20(a) e 5.21(a)). Além disso, observamos que os cenários mais “populados” mantêm o valor medido de PI abaixo do valor do PI médio para a velocidade dos nós entre 1,0m/s e 8,3m/s, e nos demais cenários, este mesmo efeito ocorre para a velocidade dos nós entre 0,1m/s e 0,9m/s.

Isso sugere que os nós da rede secundária reduzem o valor do PI, caso eles

movimentem-se mais rapidamente, em regiões onde houver maior densidade de nós primários.

O valor medido do PEQ possui um comportamento diferenciado, por cenário e por velocidade dos nós, embora possamos perceber que o seu valor permaneça entre 3% e 40% dependendo da velocidade dos nós e, conseqüentemente, a conectividade dos enlaces (100%-PEQ) possa ser considerada acima de 60% (Figuras 5.17(b),5.18(b),5.19(b),5.20(b) e 5.21(b)).

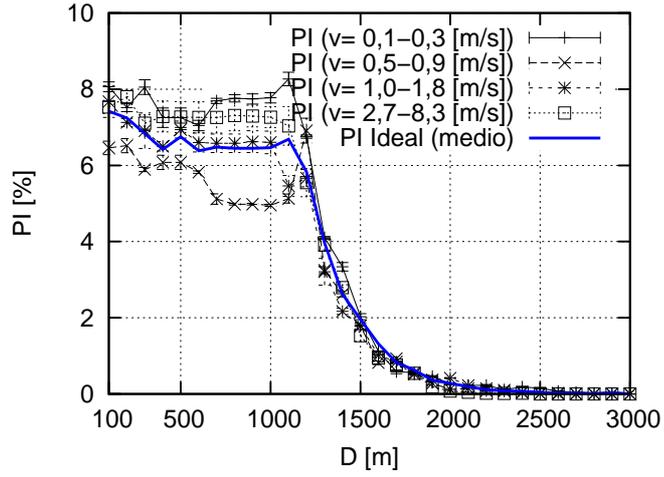
Diferente do ocorrido com o valor medido do PI, o valor do PEQ sofre com a maior velocidade dos nós e desta forma, deve-se ter em mente o compromisso de que a redução do PI com o aumento da velocidade, onde houver maior densidade de nós primários, também reduz o valor do PEQ.

Os pacotes trocados, por sua vez, mostram que há um aumento do número de tentativas de comunicação frustradas pela distância entre os nós (Figura 5.17(c), 5.18(c), 5.19(c), 5.20(c) e 5.21(c)), porém a mobilidade aumenta a probabilidade de criação de novos enlaces, comparativamente aos cenários fixos, e com isso há um aumento das oportunidades para a rede secundária.

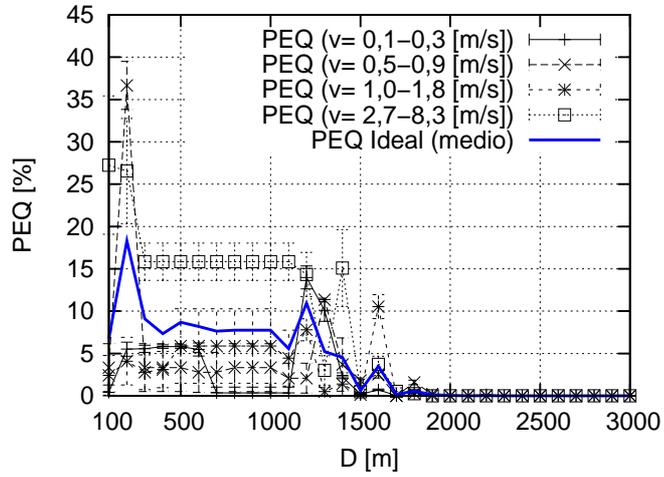
Desta forma, mesmo com a mobilidade, vemos que o número de comunicações bem sucedidas entre os nós operacionais, dadas pelo número de sucessos obtidos percentualmente ao total de mensagens trocadas na rede secundária, mantém-se elevado até o valor de  $D$  atingir 2000m, quando apresenta um decréscimo para valores maiores de  $D$ .

Com isso demonstramos que é possível sustentar a conectividade dos enlaces (100%-PEQ) acima de 60%, simultaneamente com a limitação da interferência abaixo de 9%, mesmo com mobilidade, conforme o cenário escolhido.

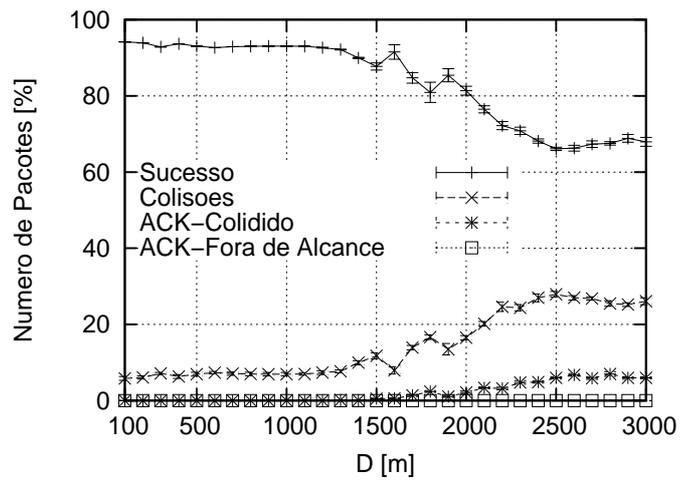
Essas fronteiras para os valores medidos de PI e PEQ, embora signifiquem que houve interferência na rede primária, sugerem que é possível ajustar os parâmetros da rede secundária de forma a reduzi-los ainda mais, mantendo-os dentro de limites suportáveis para o funcionamento da rede primária.



(a) Percentual de Interferência (PI).

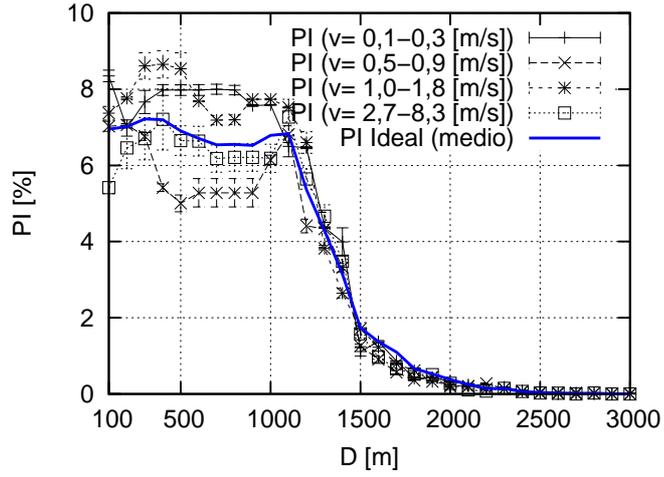


(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).

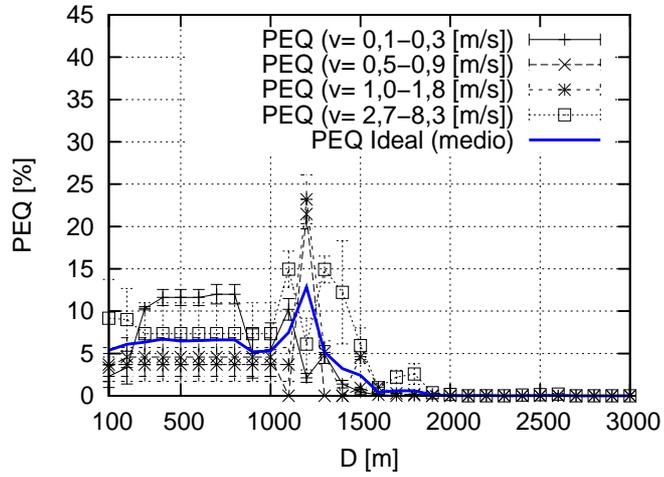


(c) Pacotes trocados.

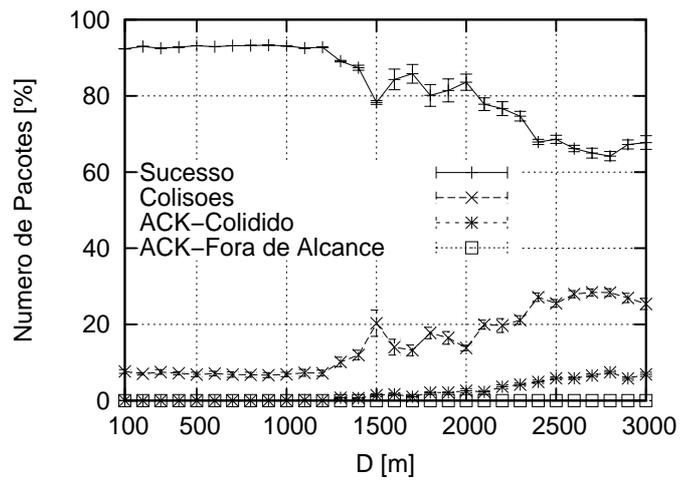
Figura 5.17: Cenário móvel 1.



(a) Percentual de Interferência (PI).

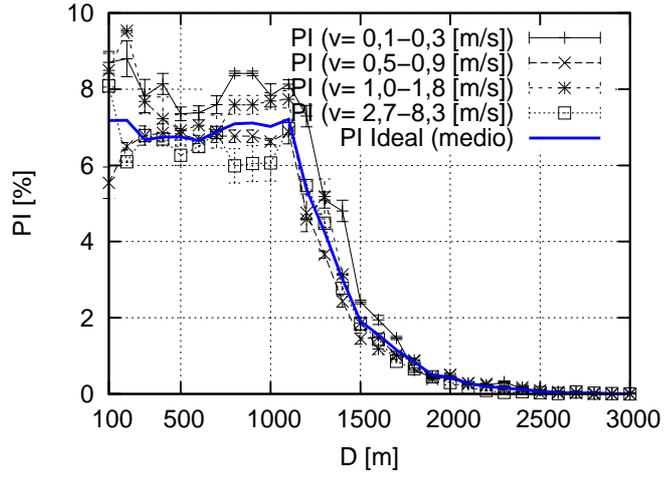


(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).

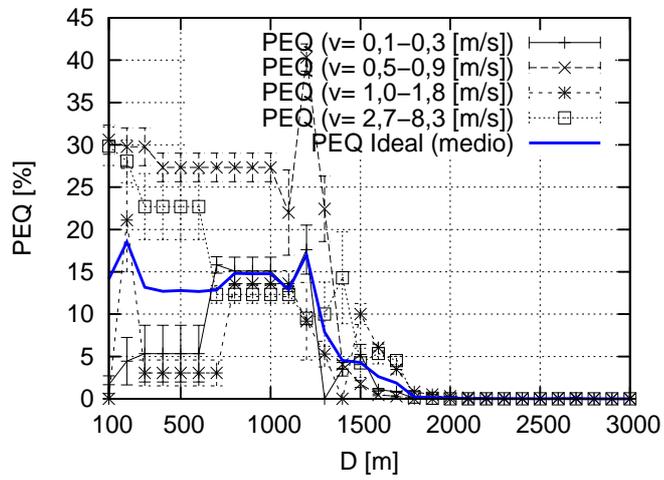


(c) Pacotes trocados.

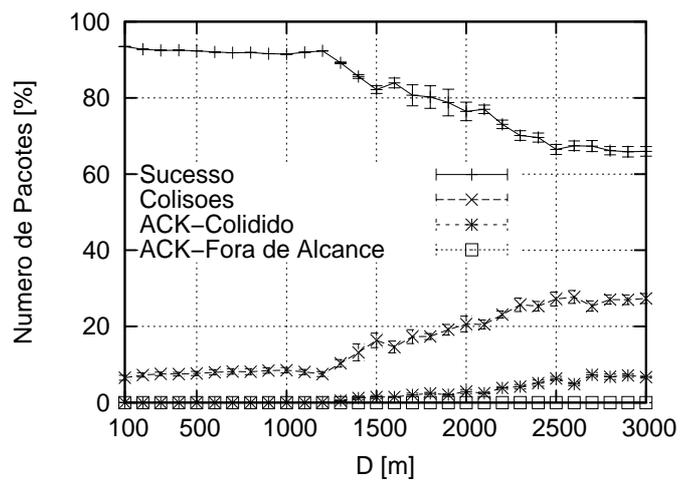
Figura 5.18: Cenário móvel 2.



(a) Percentual de Interferência (PI).

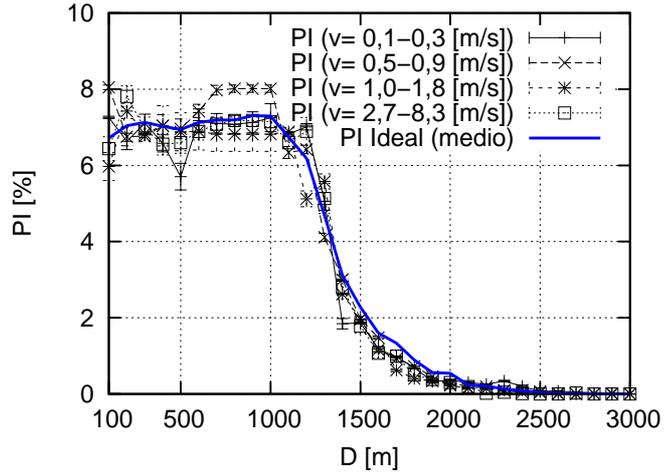


(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).

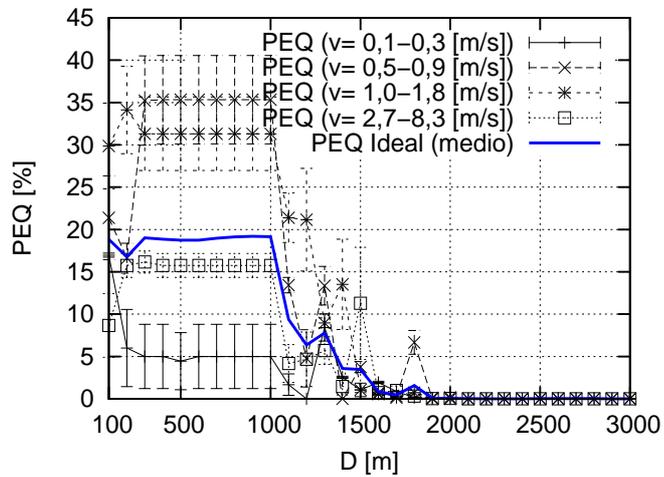


(c) Pacotes trocados.

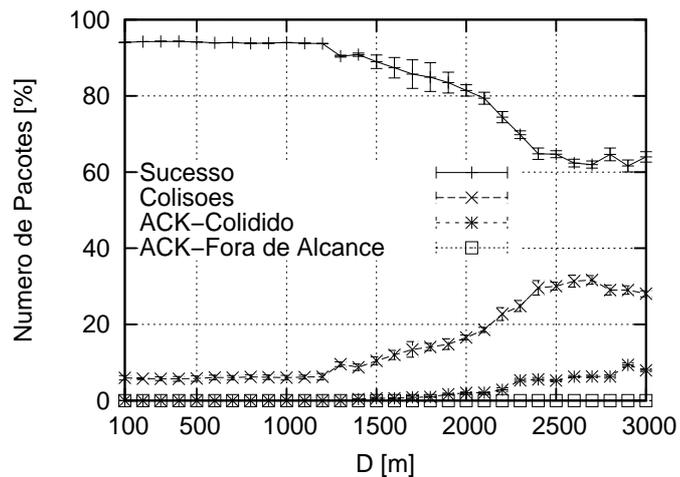
Figura 5.19: Cenário móvel 3.



(a) Percentual de Interferência (PI).

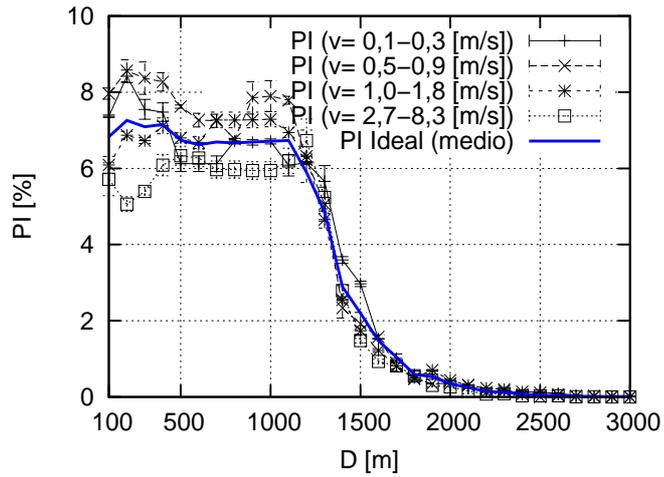


(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).

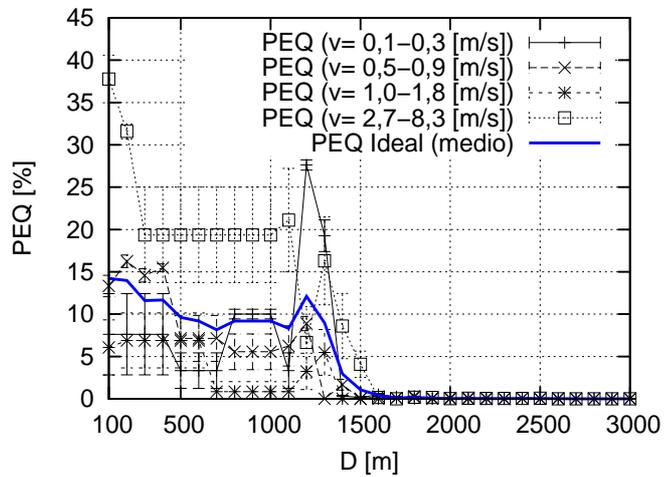


(c) Pacotes trocados.

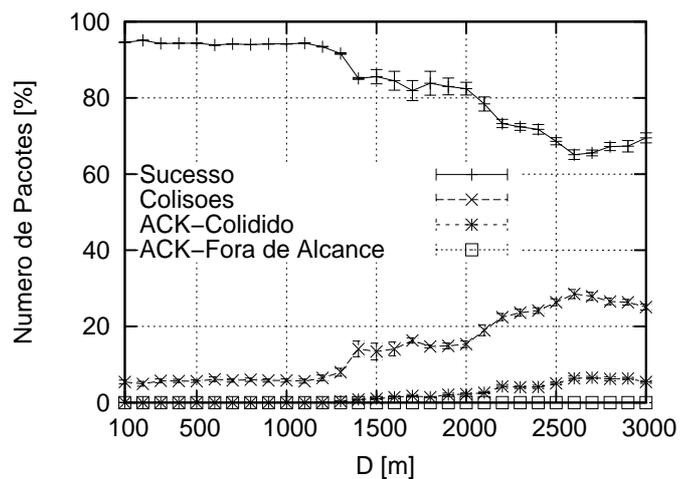
Figura 5.20: Cenário móvel 4.



(a) Percentual de Interferência (PI).



(b) Percentual de Enlaces Quebrados (PEQ).



(c) Pacotes trocados.

Figura 5.21: Cenário móvel 5.

# Capítulo 6

## Conclusões

Neste capítulo finalizamos com as conclusões sobre os resultados obtidos, discorrendo sobre as principais contribuições e apresentando as ideias para os trabalhos futuros.

### 6.1 Considerações

O atual processo regulatório para licenciamento de uso do espectro tem resultado numa grande divergência entre a reserva do espectro e a sua real utilização. Novos desenvolvimentos tecnológicos trarão a expectativa de que este espectro subutilizado possa ser disponibilizado, porém não se vislumbra grandes mudanças políticas e/ ou regulatórias sem uma garantia de não-interferência nos usuários legados (ou primários).

Seguindo neste caminho, surge como uma possibilidade de solução desse impasse o rádio cognitivo, dispositivo sem fio capaz de ajustar suas transmissões em resposta ao ambiente de RF. Ao ajustar dinamicamente suas transmissões para usar apenas bandas subutilizadas, o rádio cognitivo poderia ser a chave para aumentar a eficiência de uso do espectro numa região, formando uma rede secundária.

Por conta do esforço para a convergência de redes e serviços, da necessidade de reuso do espectro e da crescente abrangência e popularização do acesso à banda larga entre outros fatores, imaginamos que é questão de pouco tempo para que tenhamos, de fato, redes secundárias maciçamente em operação.

Muitos trabalhos têm se focado no estudo do comportamento das redes secundárias e alguns poucos na sua implementação física. Essa situação tende a mudar

com a iniciativa do FCC para regulamentação do acesso oportunístico à banda de TV analógica nos EUA [12].

Variando um pouco do modelo de rede primária onde existe um transmissor com múltiplos receptores passivos, nossos resultados, com duas redes *ad hoc* e nós fixos e móveis, mostram que podemos implementar um controle (simples) da interferência sobre os nós primários apenas com um mecanismo de posicionamento individual e um sistema de detecção de fonte de sinal (radiogoniômetro). E simultaneamente, manter um nível aceitável de conectividade entre os nós da rede secundária, um indicador simples da qualidade nas comunicações.

Embora não apresente resultados que evitem totalmente a interferência nos usuários primários durante todo o intervalo de variação de  $D$ , entendemos que o fato de serem criadas “fronteiras” para os valores medidos de PI e PEQ sugerem que podemos ajustar os parâmetros das redes a fim de que essas “fronteiras” sejam reduzidas, sem que o funcionamento da rede secundária seja comprometido.

Ainda que não tenha sido efetivamente comparada com outras propostas, os resultados mostram escalabilidade superior àquelas propostas baseadas somente em teoria. Esta falta teve como causa a dificuldade de estabelecimento de métricas unificadas e de cenários equivalentes que permitam uma comparação precisa entre todas as propostas existentes.

Em relação às demais propostas, que também adotam o uso de detecção de usuários primários pela SNR de suas transmissões, os resultados indicam bom desempenho, mesmo frente a mobilidade, principalmente pelo fato de termos utilizado redes *ad hoc* ao invés de um único transmissor primário.

## 6.2 Contribuições

Esta dissertação propõe uma rede *ad hoc* oportunista (secundária) com nós fixos e móveis, composta por rádios cognitivos, que efetuam a detecção cooperativa das transmissões de uma rede licenciada (primária) e mostramos as condições que permitem a um conjunto deles manter a conectividade entre si enquanto limitam a interferência causada pelas suas transmissões.

No trabalho tomou-se como métrica de avaliação do protocolo proposto, a conec-

tividade, uma vez que pode ser encarada como um indicador simples da qualidade nas comunicações.

E por fim, propomos um *controle de potência de transmissão* na rede secundária que considera sua distância para os nós primários detectados e ajusta sua potência de acordo com um modelo de propagação, regulando a sua interferência.

Iniciamos observando que para garantir a não-interferência nos usuários primários precisamos, primeiramente, detectá-los. Fizemos, então, uma pesquisa sobre os métodos de detecção, baseados na interferência e no transmissor, e concluímos que se o detector não possui informação sobre o sinal transmitido e/ou se forem usados um conjunto de símbolos com valor esperado de transmissão nulo e a SNR for baixa, o detector ótimo comporta-se como um detector por energia.

Para garantir a não-interferência nos usuários primários, os rádios cognitivos devem ajustar a sua potência de transmissão com base na proximidade para com eles. Nesse caso, o valor da SNR local do sinal transmitido de um primário fornece uma métrica viável para uma regra de controle de potência de transmissão para os usuários secundários.

Analisamos, então, a potência máxima de transmissão permitida para os usuários secundários de forma que seja possível aumentar o valor dessa potência com a distância para os usuários primários.

Vimos também que a interferência agregada de múltiplos usuários secundários torna a redução da interferência mais demorada. Além disso, vimos que a sensibilidade do receptor secundário é um requisito fundamental para o bom funcionamento da rede secundária, mostrando que a limitação principal para as transmissões secundárias está diretamente relacionada à sua capacidade de detectar sinais de baixa SNR.

A contribuição principal desta dissertação é a apresentação da arquitetura em si, indicando detalhadamente seu comportamento e forma de funcionamento.

Finalmente, uma importante contribuição é a implementação da arquitetura em ambiente de simulação no Matlab e a avaliação dos diversos mecanismos e resultados.

## 6.3 Trabalhos Futuros

A implementação da arquitetura em ambiente de simulação abre um grande conjunto de possibilidades de trabalhos futuros.

Como principal possibilidade, indicamos a incorporação de um mecanismo de posicionamento estabelecido na literatura e, a partir da percepção que a janela de tempo necessária para o mecanismo de localização obter a posição estimada do nó primário transmissor influencia bastante no aumento da interferência, pois nesse ínterim, os nós operacionais (rede secundária) continuam transmitindo (e interferindo), incorporar também um mecanismo estabelecido utilizado para essa finalidade, como um feixe de antenas, por exemplo.

Uma outra evolução indicada seria a utilização de comunicação ponto-a-multiponto na rede secundária e a avaliação do roteamento de pacotes na rede secundária, através de protocolos devidamente implementados.

Também poderia ser computado os efeitos de sombreamento e múltiplos caminhos no algoritmo de controle de potência de transmissão dos usuários secundários e a possibilidade de variação dinâmica do limite de interferência  $I$ .

# Referências Bibliográficas

- [1] ANATEL, “Quadro de atribuição de faixas de frequência no Brasil”, <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalRedireciona.do?codigoDocumento=98580>.
- [2] M. A. MCHENRY, *NSF Spectrum Occupancy Measurements Project Summary*, Tech. rep., Shared Spectrum Company report, 2005.
- [3] FETTE, B., (ed), *Cognitive Radio Technology*. Newnes Elsevier, Inc., 2006.
- [4] RONDEAU, T. W., BOSTIAN, C. W., MIDKIFF, S., “Cognitive Radios in Public Safety and Spectrum Management”. In: *Telecommunication Policy Research Conference*, 2005.
- [5] MITOLA, J., “Software Radios: Survey, Critical Evaluation and Future Directions”, *IEEE AES System Magazine*, April 1993.
- [6] SDRF, “Wireless Innovation Forum”, <http://www.wirelessinnovation.org/>.
- [7] MITOLA, J., JR., G. Q. M., “Cognitive Radio: making software radio more personal”, *IEEE Personal Communications*, v. 6, n. 4, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [8] FCC, *FCC 03-322 - Notice of Proposed Rule Making and Order*, Tech. rep., Federal Communications Commission, Dec. 2003.
- [9] HAYKIN, S., “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”. In: *Journal on Selected Areas in Communications*, February 2005.
- [10] CABRIC, D., MISHRA, S. M., WILLKOMM, D., “A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum”. In: *14th IST Mobile Wireless Communications Summit*, 2005.

- [11] STRASSNER, J., DEMESTICHAS, P., DIMITRAKOPOULOS, G., “Introducing Reconfigurability and Cognitive Networks Concepts in the Wireless Networks”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2006.
- [12] FCC, *FCC 08-260 - Second Reporter and Order - Inquiry Concerning Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band*, Tech. rep., Federal Communications Commission, Nov. 2008.
- [13] ZHAO, Q., “Spectrum opportunity and interference constraint in opportunistic spectrum access”. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2007.
- [14] WANG, W., PENG, T., “Optimal power control under interference temperature constraints in cognitive radio network”. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2007.
- [15] HAMDI, K., ZHANG, W., LETAIEF, K. B., “Power control in cognitive radio systems based on spectrum sensing side information”. In: *IEEE International Conference on Communications*, pp. 5161–5165, 2007.
- [16] LE, L., HOSSAIN, E., “OSA-MAC: A MAC protocol for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks”. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2008.
- [17] XING, Y., MATHUR, C. N., “Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints”. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 6, n. 4, 2007.
- [18] CLANCY, T. C., “Formalizing the Interference Temperature Model”, In: *Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile Computing*, 2006.
- [19] LE, L., HOSSAIN, E., “Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008.
- [20] THOMAS, R. W., KOMALI, R. S., MACKENZIE, A. B., DA SILVA, L. A., “Joint Power and Channel Minimization in Topology Control: a Cognitive

- Network Approach”. In: *IEEE International Conference on Communications*, pp. 6538–6543, June 2007.
- [21] MENDES, A. C., DE REZENDE, J. F., “Detecção Cooperativa em Redes Cognitivas para o Controle da Interferência em Sistemas Licenciados”. In: *XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Sept. 2009.
- [22] IEEE, *802.11a - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5GHz Band*, Tech. rep., IEEE, 1999.
- [23] IEEE, *802.11b - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4GHz Band*, Tech. rep., IEEE, 1999.
- [24] IEEE, *802.11g - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4GHz Band*, Tech. rep., IEEE, 2003.
- [25] KWEREL, E., WILLIAMS, J., *A Proposal for a Rapid Transition to Market Allocation of Spectrum*, Tech. rep., Federal Communications Commission, Nov. 2002.
- [26] SNIDER, J. H., CALABRESE, M., FELD, H., SCHWARTZMAN, A. J., *Reply Comments on Unlicensed Access to TV Band*, Tech. rep., New America Foundation, Jan. 2005.
- [27] FCC, *Docket 02-135 - Spectrum Management in the USA*, Tech. rep., Federal Communications Commission, 11 2002.
- [28] FCC, *FCC 02-48 Ultra-wideband Transmission Systems*, Tech. rep., Federal Communications Commission, April 2002.
- [29] MITOLA, J., *Cognitive Radio: An integrated agent architecture for software defined radio*, Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, 2000.
- [30] PRILL, R. S., “Programmable Digital Radio”. In: *IEEE Military Communication Conference*, v. 3, pp. 1202–1206, Nov. 1997.

- [31] MITOLA, J., “The Software Radio”. In: *IEEE National Telesystems Conference*, 1992.
- [32] First International Workshop on Software Radio - 1998.
- [33] “Liaison statement to ITU-R Study group 3 and Working Parties 4a, 4c, 5a, 5b, 6a, 7c, 7d on the study of Software-Defined Radio and Cognitive Radio systems”. In: *ITU-R - The 6th Meeting of the APT Wireless Forum*, March 2009.
- [34] HARRIS, M., “Mapping Computational Concepts to GPUs”. In: *ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques*, p. 50, 2005.
- [35] IBM, “The CELL Project at IBM Research”, <http://www.research.ibm.com/cell/home.html>.
- [36] LACKEY, R. J., UPMAL, D. W., “SPEAKeasy: the military software radio”, *IEEE Communications Magazine*, May 1995.
- [37] COOK, P. G., BONSER, W., “Architectural Overview of SPEAKeasy System”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, April 1999.
- [38] FEICKERT, A., “The Joint Tactical Radio System (JTRS) and the Army’s Future Combat System (FCS): Issues for Congress”, 11 2005.
- [39] OF DEFENSE, U. S. D., “Joint Tactical Radio System”, <http://jpeojtrs.mil/>.
- [40] U.S. GOVERNMENT, “Joint Vision 2020: America’s Military - Preparing for Tomorrow”, Printing Office, June 2000.
- [41] U. S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, “Report to Congressional Committees: Defense Acquisitions - Restructured JTRS Program Reduces Risk, but Significant Challenges Remain”, Printing Office, September 2006.
- [42] SANCHES, R. J., EVANS, J. B., MINDEN, G. J., SHANMUGAN, K. S., “RDRN: a Prototype for Rapidly Deployable Radio Network”. In: *SIGMOBILE Mobile Computing Communications Review*, 1998.

- [43] BOSE, V., “Vanu Inc. - Where software meets the Spectrum”, <http://www.vanu.com/>.
- [44] BOSE, V., *Design and Implementation of Software Radios Using a GPP*, Ph.D. Thesis, MIT, 1999.
- [45] BOSE, V., “History”, <http://www.vanu.com/about/history.html>.
- [46] KUMAGAI, J., “Radio Revolutionaries”, *IEEE Spectrum*, v. 44, n. 1, pp. 28–32, January 2007.
- [47] MUCK, M., BURSE, D., DEMESTICHAS, P., “End-to-End Reconfigurability in Heterogeneous Wireless Systems - Software and Cognitive Radio Solutions enriched by Policy- and Context-based Decision Making”. In: *16th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, pp. 1–5, July 2007.
- [48] UNIVERSITY, C., “SoftMAC at trac.” <https://systems.cs.colorado.edu/projects/softmac>.
- [49] NEUFELD, M., FIFIELD, J., DOERR, C., “SoftMAC: Flexible Wireless Research Platform”. In: *Hot Topics in Network Workshop*, 2005.
- [50] DOERR, C., NEUFELD, M., FIFIELD, J., “MultiMAC: an Adaptive MAC Framework for Dynamic Radio Networking”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, 2005.
- [51] BLOSSOM, E., FREE SOFTWARE FOUNDATION, “GNU Radio”, <http://gnuradio.org/>.
- [52] TENNENHOUSE, D. L., BOSE, V. G., “The Spectrumware Approach to Wireless Signal Processing”. In: *IEEE Wireless Communications and Networking*, 1996.
- [53] ETTUS, M., “Ettus Research LLC”, <http://www.ettus.com/>.
- [54] GRUBER, T. R., “Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing”, *International Journal Human-Computer Studies*, 1995.
- [55] HAYKIN, S., “Cognitive Dynamic Systems”, *IEEE Communications Magazine*, 2007.

- [56] FCC, *FCC 00-47 - In the Matter of Inquiry Regarding Software Defined Radios*, Tech. rep., Federal Communications Commission, January 2003.
- [57] FCC, *FCC 04-186 - In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band.*, Tech. rep., Federal Communications Commission, May 2004.
- [58] FCC BUREAU OF PUBLIC SAFETY AND HOMELAND SECURITY, *Docket 06-229 - In the Matter of Implementing a Nationwide, Broadband, Interoperable Public Safety Network in the 700 MHz Band. Development of Operational, Technical and Spectrum Requirements for Meeting Federal, State and Local Public Safety Communication.*, Tech. rep., Federal Communications Commission, September 2008.
- [59] DEFENSE ADVANCED RESEARCH PROJECTS AGENCY (DARPA), “The neXt Generation Communications (XG) Project”, <http://www.darpa.mil/sto/smallunitops/xg.html>.
- [60] CORDEIRO, C., CHALLAPALI, K., BIRRU, D., “IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, v. 1, n. 1, April 2006.
- [61] SENGUPTA, S., BRAHMA, S., CHATTERJEE, M., N., S. S., “Enhancements to cognitive radio based IEEE 802.22 air-interface”, 2006.
- [62] IEEE, “IEEE Standards Coordinating Committee (SCC) 41”, <http://www.scc41.org/>.
- [63] KURAN, M. S., TUGCU, T., “A Survey on Emerging Broadband Wireless Access Technologies”, *ELSEVIER Computer Networks*, 2007.
- [64] STEVENSON, C., CHOUINARD, G., ZHONGDING, L., “IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard”, *IEEE Communications Magazine*, Jan. 2009.

- [65] IEEE 802.22 WORKING GROUP, *IEEE Starts Standard to Tap Open Regions in the New TV Spectrum for Wireless Broadband Services*, Tech. rep., [http://standards.ieee.org/announcements/pr\\_80222.html](http://standards.ieee.org/announcements/pr_80222.html), Oct. 2004.
- [66] IEEE 802.22 WORKING GROUP, *IEEE P802.22/D1.0 Draft Standard for Wireless Regional Area Networks (WRAN) Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands*, Tech. rep., April 2008.
- [67] HU, W., WILLKOMM, D., VLANTIS, G., “Dynamic Frequency Hopping Communities for Efficient IEEE 802.22 Operation”, *IEEE Communications Magazine*, 2007.
- [68] THOMAS, R. W., DA SILVA, L. A., MACKENZIE, A. B., “Cognitive Networks”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, 2005.
- [69] FCC, *Docket 03-237 - Notice of Proposed Rulemaking: Establishment of an Interference Temperature Metric to Quantify and Manage Interference and to Expand Available Unlicensed Operation in Certain Fixed, Mobile and Satellite Frequency Bands*, Tech. rep., Federal Communications Commission, Nov. 2003.
- [70] KAILATH, T., POOR, V., “Detection of stochastic processes”, *IEEE Transaction on Information Theory*, Oct. 1998.
- [71] MIDDLETON, D., “On the detection of stochastic signals in additive normal noise”, *IEEE Transaction on Information Theory*, June 1957.
- [72] SHANKAR, S., CORDEIRO, C., CHALLAPALI, K., “Spectrum agile radio: utilization and sensing architectures”. In: *IEEE Symposium on New Frontiers in DSA Networks*, Nov. 2005.
- [73] TANG, H., “Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems”. In: *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Nov. 2005.

- [74] TANDRA, R., SAHAI, A., “Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty”. In: *International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, 2005.
- [75] ABRAMSON, N., PRICE, R., “Detection Theory”, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1961.
- [76] SLEPIAN, D., “Some Comments on the Detection of Gaussian Signals in Gaussian Noise”, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1958.
- [77] DIGHAM, F., ALOUINI, M., SIMON, M., “On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels”. In: *IEEE International Conference on Communications*, pp. 3575–3579, May 2005.
- [78] GHASEMI, A., SOUZA, E. S., “Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environment”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, pp. 131–136, November 2005.
- [79] SAHAI, A., HOVEN, N., TANDRA, R., “Some Fundamental Limits on Cognitive Radio”, 2004.
- [80] YUAN, Y., BAHL, P., “KNOWS: Cognitive Radio Networks over White Spaces”. In: *IEEE New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 416–427, April 2007.
- [81] SUTTON, P. D., LOTZE, J., NOLAN, K. E., DOYLE, L. E., “Cyclostationary Signature Detection in Rayleigh Fading Environments”. In: *IEEE Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communication*, August 2007.
- [82] GARDNER, W. A., “Exploitation of Spectral Redundancy in Cyclostationary Signals”, *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 14–36, 1991.
- [83] CABRIC, D., MISHRA, S. M., BRODERSEN, R. W., “Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios”. In: *38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 772–776, November 2004.

- [84] FEHSKE, A., GAEDDERT, J. D., REED, J. H., “A New Approach to Signal Classification Using Spectral Correlation and Neural Networks”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, pp. 144–150, November 2005.
- [85] TANG, H., “Some Physical Layer Issues of Wide-Band Cognitive Radio Systems”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, pp. 151–159, November 2005.
- [86] MISHRA, S. M., BRINK, S., MAHADEVAPPA, R., BRODERSEN, R. W., “Cognitive Technology for UWB/WiMAX Coexistence”. In: *IEEE New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 179–186, April 2007.
- [87] CABRIC, D., TKACHENKO, A., BRODERSEN, R., “Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy and Collaborative Detection”. In: *IEEE Military Communication Conference*, pp. 1–7, October 2006.
- [88] YUCEK, T., ARSLAN, H., “Spectrum Characterization for Opportunistic Cognitive Radio System”. In: *IEEE Military Communication Conference*, October 2006.
- [89] FARNHAM, T., CLEMO, G., “IST-TRUST: a perspective on the reconfiguration of future mobile terminals using software download”. In: *IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, September 2000.
- [90] CHALLAPALI, K., MANGOLD, S., ZHONG, Z., “Spectrum Agile Radio: Detecting Spectrum Opportunities”. In: *International Symposium on Advanced Radio Technologies*, March 2004.
- [91] TIAN, Z., GIANNAKIS, G. B., “A Wavelet Approach to Wideband Spectrum Sensing for Cognitive Radios”. In: *IEEE Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communication*, June 2006.
- [92] CABRIC, D., TKACHENKO, A., BRODERSEN, R. W., “Cyclostationarity Feature Detector Experiments Using Reconfigurable BEE2”. In: *IEEE New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, April 2007.

- [93] TANDRA, R., SAHAI, A., “SNR Walls for Feature Detectors”. In: *IEEE New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, April 2007.
- [94] ZHENG, H., CAO, L., “Device-centric Spectrum Management”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, pp. 56–65, November 2005.
- [95] GANESAN, G., LI, Y., “Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, pp. 137–143, November 2005.
- [96] MISHRA, S. M., CABRIC, D., BRODERSEN, B. W., “A Real Time Cognitive Radio Testbed for Physical and Link Layer Experiments”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, pp. 562–567, November 2005.
- [97] LIU, X., SHANKAR, S., “Sensing-based Opportunistic Channel Access”. In: *ACM Mobile Networks and Applications*, March 2005.
- [98] GHASEMI, A., SOUZA, E. S., “Asymptotic Performance of Collaborative Spectrum Sensing under Correlated Log-normal Shadowing”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 34–36, January 2007.
- [99] PEH, E., LIANG, Y. C., “Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks”. In: *IEEE Wireless Communications and Networking*, pp. 27–32, March 2007.
- [100] SHANKAR, S., “Spectrum Agile Radio: Utilization and Sensing Architecture”. In: *IEEE Dynamic Spectrum Allocation Networks*, pp. 160–169, November 2005.
- [101] U.S. GOVERNMENT, “NAVSTAR GPS”, <http://www.gps.gov/>.
- [102] CAFFERY, J., STUBER, G. L., “Overview of radiolocation CDMA cellular systems”, *IEEE Communications Magazine*, v. 36, n. 4, April 1998.
- [103] GEZICI, S., “A Survey on Wireless Position Estimation”, *Wireless Personal Communication*, Oct. 2007.
- [104] P.-C. CHEN, “A N-LOS error mitigation algorithm”. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 1999.

- [105] WYLIE, M. P., HOLTZMAN, J., “The N-LOS problem in mobile location estimation”. In: *International Conference on Universal Personal Communications*, 1996.
- [106] PATWARI, N., ASH, J. N., KYPEROUNTAS, S., III, A. O. H., MOSES, R. L., CORREAL, N. S., “Locating the Nodes”, *IEEE Signal Processing Magazine*, July 2005.
- [107] RAPPAPORT, T. S., *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, Inc., 2001.
- [108] CHEN, Y., ZHAO, Q., SWAMI, A., “Joint Design and Separation Principle for Opportunistic Spectrum Access”. In: *IEEE Conference on Signals, Systems and Computers*, October 2006.
- [109] FCC, *Part 15 - Radio Frequency Devices*, Tech. rep., Federal Communications Commission, 2006.
- [110] MATHWORKS, I., “MATLAB - The Language of Technical Computing”, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [111] NS-2, “The Network Simulator - ns-2”, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [112] QUIMING, L., “The Scenario Generator: a tool to generate MANET mobility scenarios for ns-2”, <http://isis.poly.edu/qiming/scengen/index.html>.
- [113] CAMP, T., BOLENG, J., DAVIES, V., “A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research”, Sept. 2002.