



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CAMPUS DE SOBRAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

**Jéssica de Paulo Rodrigues**

**SISTEMA COOPERATIVO COGNITIVO COM COMPARTILHAMENTO  
ESPECTRAL USANDO RETRANSMISSÃO INCREMENTAL HÍBRIDA**

**SOBRAL - CEARÁ  
DEZEMBRO/2017**

JÉSSICA DE PAULO RODRIGUES

SISTEMA COOPERATIVO COGNITIVO COM COMPARTILHAMENTO  
ESPECTRAL USANDO RETRANSMISSÃO INCREMENTAL HÍBRIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de concentração: Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa

SOBRAL - CEARÁ  
DEZEMBRO/2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- R613s Rodrigues, Jéssica de Paulo.  
Sistema Cooperativo Cognitivo com Compartilhamento Espectral Usando Retransmissão Incremental Híbrida / Jéssica de Paulo Rodrigues. – 2017.  
80 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Sobral, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa.
1. Rádio Cognitivo. 2. Comunicação Cooperativa. 3. Compartilhamento Espectral. 4. Retransmissão Incremental Híbrida. 5. Probabilidade de Outage. I. Título.

CDD 621.3

---

JÉSSICA DE PAULO RODRIGUES

SISTEMA COOPERATIVO COGNITIVO COM COMPARTILHAMENTO  
ESPECTRAL USANDO RETRANSMISSÃO INCREMENTAL HÍBRIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de concentração: Sistemas de Informação.

Aprovada em: 14 / 12 / 2017.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Tarcisio Ferreira Maciel  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, a minha família e ao meu amado esposo, por estarem sempre ao meu lado durante esta longa jornada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que durante toda minha vida derramou suas bênçãos sobre mim e me deu saúde, força e confiança para que eu pudesse concluir essa fase importante da minha vida e da minha carreira.

Agradeço a toda a minha família, em especial aos meus pais, que sempre me ensinaram o valor do conhecimento e me apoiaram em todos os momentos. Aos meus irmãos, agradeço por todo amor e carinho dedicados durante esta trajetória.

Agradeço a meu esposo, pelo incentivo, pela paciência, pela companhia e por abraçar junto comigo esta meta.

Ao meu orientador, Daniel Benevides da Costa, pelo comprometimento e paciência no desenvolvimento desse trabalho e pela orientação dedicada para que ele pudesse ser concluído com êxito.

Por fim, agradeço ao corpo docente e discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFC Campus Sobral, pela disponibilidade e ensinamentos que contribuíram para minha formação ao longo destes anos no curso de mestrado.

## RESUMO

Rádio cognitivo e comunicação cooperativa são consideradas duas tecnologias chave para o futuro dos sistemas de comunicação sem fio. A comunicação cooperativa, durante as últimas décadas, tem recebido atenção considerável e é hoje uma técnica bem estabelecida para melhorar o desempenho dos sistemas sem fio por proporcionar enormes ganhos de desempenho, obtidos sem a necessidade de múltiplas antenas implementadas nos terminais. Por outro lado, a comunidade sem fio vê a necessidade do uso dos recursos sem fio de forma mais eficiente. Dentro desse âmbito, o rádio cognitivo surgiu como uma técnica promissora para aliviar o problema de escassez e subutilização do espectro, ao permitir que usuários não licenciados acessem porções de espectro inicialmente alocadas para um usuário licenciado. Motivado pelos ganhos promissores adquiridos com o uso de comunicação cooperativa e pelo conceito de compartilhamento de espectro cognitivo, um estudo conjunto dessas duas tecnologias promissoras é de extrema relevância para as próximas gerações das redes sem fio. Neste trabalho, o comportamento de *outage* para um sistema cooperativo cognitivo com compartilhamento espectral e retransmissão incremental híbrida no nó *relay* é investigado. Esse sistema é formado por uma rede secundária composta por três nós secundários: a fonte, o *relay* e o destino; e um usuário primário. A cooperação ocorre para a transmissão entre os usuários secundários, em que um protocolo de retransmissão incremental híbrida é utilizado pelo *relay*. Neste cenário, a retransmissão pelo *relay* só ocorre caso haja necessidade, ora utilizando o protocolo amplifica-e-encaminha (do inglês, *Amplify-and-Forward* (AF)), ora utilizando o protocolo decodifica-e-encaminha (do inglês, *Decode-and-Forward* (DF)), a partir da avaliação dos canais fonte-destino e fonte-*relay*-destino. Adotamos uma abordagem *underlay* na comunicação secundária, em que a transmissão é governada pela interferência de recepção do usuário primário. A expressão analítica e em forma fechada para a probabilidade de *outage* é derivada. Os resultados analíticos são corroborados pelas simulações de Monte Carlo, validando a expressão teórica desenvolvida e são fornecidas discussões pertinentes.

**Palavras-chave:** Rádio cognitivo. Comunicação cooperativa. Compartilhamento espectral. Retransmissão incremental híbrida. Probabilidade de *outage*.

## ABSTRACT

Cognitive radio and cooperative communication are considered two key technologies for the future of wireless communication systems. Cooperative communication over the last few decades has received considerable attention and is now a well-established technique for improving the performance of wireless systems by providing enormous performance gains obtained without the need for multiple antennas implemented at the terminals. On the other hand, the wireless community sees the need to use wireless resources more efficiently. Within this framework, cognitive radio emerged as a promising technique to alleviate the problem of spectrum scarcity and under utilization by allowing unlicensed users to access portions of spectrum initially allocated to a licensed user. Motivated by the promising gains acquired through the use of cooperative communication and the concept of cognitive spectrum sharing, a joint study of these two promising technologies is of extreme relevance to the next generations of wireless networks. In this work, the outage behavior for a cognitive cooperative system with spectral sharing and incremental hybrid retransmission in the relay node is investigated. This system is formed by a secondary network composed by three secondary nodes: the source, the relay and the destination; and a primary user. The cooperation occurs for transmission between secondary users, in which an incremental hybrid relay protocol is used by the relay. In this scenario, relay relaying occurs only in case of need, either using the Amplify-and-Forward protocol (AF) or using the Decode-and-Forward protocol (DF), from the evaluation of source-destination channel and source-relay-destination channel. We adopt an underlay approach in the secondary communication, in which the transmission is governed by the reception interference of the primary user. The analytic and closed-form expression for the probability of outage is derived. The analytical results are corroborated by the Monte Carlo simulations, validating the theoretical expression developed and relevant discussions are provided.

**Keywords:** Cognitive radio. Cooperative communication. Spectral sharing. Incremental hybrid retransmission. Outage probability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo simplificado de sistema cooperativo. . . . .	25
Figura 2.2 Esquema protocolo Amplifica-e-Encaminha (Extraído de (Nosratinia, Hedayat, and Hunter (2004))). . . . .	27
Figura 2.3 Esquema protocolo Decodifica-e-Encaminha (Extraído de (Nosratinia, Hedayat, and Hunter (2004))). . . . .	27
Figura 2.4 Modelo simplificado de sistema cooperativo. . . . .	30
Figura 3.1 Alocação de espectro NTIA. . . . .	36
Figura 3.2 Ciclo Cognitivo. . . . .	42
Figura 3.3 Uma taxonomia do Acesso Dinâmico ao Espectro. . . . .	44
Figura 3.4 Comparação das Técnicas de Rádio Cognitiva <i>Underlay</i> , <i>Overlay</i> e <i>Interweave</i> . Tradução livre de (Goldsmith <i>et al.</i> (2009)). . . . .	49
Figura 3.5 Detecção Cooperativa em uma rede sem fio cognitiva simples com um <i>link</i> primário e uma rede secundária de três nós (Simeone <i>et al.</i> (2007)). . . . .	52
Figura 3.6 Transmissão Cooperativa entre usuários secundários em uma rede sem fio cognitiva simples com um <i>link</i> primário e uma rede secundária de três nós (Simeone <i>et al.</i> (2007)). . . . .	53
Figura 3.7 <i>Relay</i> Cognitivo em uma rede sem fio cognitiva simples com um <i>link</i> primário e uma rede secundária de três nós (Simeone <i>et al.</i> (2007)). . . . .	54
Figura 4.1 Modelo sistêmico de uma rede cooperativa cognitiva com compartilhamento espectral. . . . .	57
Figura 4.2 Fluxograma do protocolo de retransmissão IHDAF. . . . .	58
Figura 5.1 Modelo do sistema da rede cooperativa cognitiva com compartilhamento espectral. . . . .	66
Figura 5.2 Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com compartilhamento espectral para diferentes coeficientes de perda de percurso. . . . .	66
Figura 5.3 Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com compartilhamento espectral para diferentes distâncias entre o usuário primário P e a fonte secundária S. . . . .	67

- Figura 5.4 Probabilidade de *outage* versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com compartilhamento espectral para diferentes distâncias entre o usuário primário P e o *relay* secundário R. . . . . 68
- Figura 5.5 Probabilidade de *outage* versus  $1/N_0$  para o protocolo IHDAF em um ambiente com compartilhamento espectral para diferentes valores de  $I_p$ . . . 68
- Figura 5.6 Probabilidade de *outage* versus  $I_p/N_0$  para três protocolos de retransmissão incremental em um ambiente de compartilhamento espectral. . . . 69
- Figura 5.7 Probabilidade de *outage* versus Distância *Relay*-Destino normalizada para três protocolos de retransmissão incremental em um ambiente de compartilhamento espectral para diferentes distâncias entre R e D,  $d_{RD}$ . . . . 70

## LISTA DE ACRÔNIMOS

<b>AF</b>	<i>Amplify-and-Forward</i>
<b>AWGN</b>	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
<b>CDF</b>	<i>Cumulative Distribution Function</i>
<b>CF</b>	<i>Compress-and-Forward</i>
<b>CR</b>	<i>Cognitive Radio</i>
<b>CSI</b>	<i>Channel State Information</i>
<b>D</b>	<i>Destination</i>
<b>DF</b>	<i>Decode-and-Forward</i>
<b>EF</b>	<i>Estimate-and-Forward</i>
<b>FCC</b>	<i>Federal Communications Commission</i>
<b>FDM</b>	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
<b>IDF</b>	<i>Incremental Decode-and-Forward</i>
<b>IHDAF</b>	<i>Incremental Hybrid Decode-Amplify-Forward</i>
<b>ISDF</b>	<i>Incremental Selective Decode-and-Forward</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i>
<b>MIMO</b>	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
<b>MRC</b>	<i>Maximal Ratio Combining</i>
<b>NTIA</b>	<i>National Telecommunication and Information Administration</i>
<b>PDF</b>	<i>Probability Density Function</i>
<b>RD</b>	<i>Relay-Destination</i>
<b>S</b>	<i>Source</i>
<b>SC</b>	<i>Selection Combining</i>
<b>SNR</b>	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
<b>SPTF</b>	<i>Spectrum Policy Task Force</i>
<b>SR</b>	<i>Source-Relay</i>
<b>SRD</b>	<i>Source-Relay-Destination</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<b>UWB</b>	<i>Ultra-wide-band</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G$	Fator de ganho
$P_S$	Potência de transmissão da fonte
$P_R$	Potência de transmissão do <i>relay</i>
$y_{SD}$	Sinal recebido pelo destino
$y_{SR}$	Sinal recebido pelo <i>relay</i>
$x$	Sinal de informação
$h_{SD}$	Coefficiente do canal Fonte-Destino
$h_{SR}$	Coefficiente do canal Fonte- <i>Relay</i>
$n_{SD}$	Ruído do canal Fonte-Destino
$n_{SR}$	Ruído do canal Fonte- <i>Relay</i>
$\sigma_{SD}$	Variância do canal Fonte-Destino
$\sigma_{SR}$	Variância do canal Fonte- <i>Relay</i>
$N_0$	Variância dos ruídos
$y_{RD}$	Sinal recebido do <i>relay</i> no destino
$h_{RD}$	Coefficiente do canal <i>Relay</i> -Destino
$n_{RD}$	Ruído do canal <i>Relay</i> -Destino
$a_1$	Pesos para o MRC associados aos sinais recebidos da fonte
$a_2$	Pesos para o MRC associados aos sinais recebidos do <i>relay</i>
$\hat{x}$	Sinal decodificado pelo <i>relay</i>
$\gamma_{th}$	Limiar de decisão
$I_p$	Pico máximo de interferência em um receptor primário
S	Fonte secundária
R	<i>Relay</i> secundário
D	Destino secundário
P	Receptor primário
$h_{SP}$	Coefficiente do canal S-P
$h_{RP}$	Coefficiente do canal R-P
$\gamma_{SD}$	SNR instantânea do <i>link</i> S-D
$\gamma_{SR}$	SNR instantânea do <i>link</i> S-R
$\gamma_{RD}$	SNR instantânea do <i>link</i> R-D
$\bar{\gamma}$	SNR média
$F_X(\cdot)$	Função de distribuição acumulada (CDF)
$f_X(\cdot)$	Função de densidade de probabilidade (PDF)
$\Pr\{\cdot\}$	Probabilidade
$\gamma_{DDF}$	SNR fim-a-fim para o <i>relay</i> utilizando o protocolo DF
$\gamma_{DAF}$	SNR fim-a-fim para o <i>relay</i> utilizando o protocolo AF
$K_0(\cdot)$	Função de Bessel modificada de ordem 0

$(x_i, y_i)$	Coordenadas do nó $i$ de uma rede
$l$	Distância entre nós
$\eta$	Coefficiente de perda de percurso
$d_{RD}$	Distancia entre o <i>relay</i> e o destino

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	Contexto do Problema . . . . .	15
1.2	Revisão de Literatura . . . . .	18
1.3	Motivação e Objetivos . . . . .	20
1.4	Produção Científica . . . . .	21
1.5	Estrutura do Trabalho . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Comunicação Cooperativa</b>	<b>23</b>
2.1	Introdução . . . . .	23
2.2	Protocolos de Cooperação . . . . .	24
2.2.1	Protocolo Amplifica-e-Encaminha . . . . .	26
2.2.2	Protocolo Decodifica-e-Encaminha Fixo e Seletivo . . . . .	26
2.2.3	Protocolo de Retransmissão Incremental . . . . .	28
2.2.4	Outros Protocolos de Cooperação . . . . .	28
2.3	Vantagens e Desvantagens da Comunicação Cooperativa . . . . .	29
2.4	Modelo de Sistema Cooperativo . . . . .	30
2.4.1	Protocolo Amplifica-e-Encaminha . . . . .	31
2.4.2	Protocolo Decodifica-e-Encaminha . . . . .	33
2.5	Conclusão . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Rádio Cognitivo</b>	<b>35</b>
3.1	Introdução . . . . .	35
3.2	Fundamentos do Rádio Cognitivo . . . . .	37
3.2.1	Furo Espectral . . . . .	37
3.2.2	Temperatura de Interferência . . . . .	38
3.2.3	Oportunidade de Espectro . . . . .	40
3.3	Rádio Cognitivo . . . . .	40
3.3.1	Características do Rádio Cognitivo . . . . .	41
3.3.2	Funções do Rádio Cognitivo . . . . .	42
3.3.3	Arquitetura de Redes Rádio Cognitivas . . . . .	43
3.4	Modelos de Rádio Cognitivo . . . . .	43
3.4.1	Sistemas <i>Underlay</i> . . . . .	45

		14
3.4.2	Sistemas <i>Overlay</i> . . . . .	46
3.4.3	Sistemas <i>Interweave</i> . . . . .	48
3.5	Aplicações de Rádio Cognitivo . . . . .	50
3.6	Rádios Cognitivos e Redes Cooperativas . . . . .	51
3.7	Conclusão . . . . .	55
4	Análise de Outage em Sistemas Cooperativos Cognitivos com Com- partilhamento Espectral Usando Retransmissão Incremental Híbrida	56
4.1	Modelo Sistêmico . . . . .	56
4.2	Probabilidade de <i>Outage</i> . . . . .	60
4.3	Conclusão . . . . .	64
5	Resultados de Simulação	65
5.1	Conclusão . . . . .	71
6	Conclusões e Perspectivas	72
	BIBLIOGRAFIA . . . . .	74

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contexto do Problema

Os sistemas de comunicação sem fio têm evoluído bastante nos últimos anos e se tornaram elemento indispensável na vida moderna. Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para garantir diferentes serviços, cada vez mais rápidos e confiáveis e com uma qualidade mínima aceitável. Entretanto, para um sistema sem fio, prover serviços satisfatórios e acomodar novos serviços é uma tarefa complicada, pois a qualidade dos serviços e a capacidade do canal é severamente limitada por dois recursos fundamentais para as comunicações: a energia e a escassez de largura de banda. Diante disso, os pesquisadores atualmente estão concentrando sua atenção em novos paradigmas de comunicação e de redes que podem utilizar de maneira inteligente e eficiente esses recursos escassos. O rádio cognitivo (do inglês, *Cognitive Radio* (CR)) é uma tecnologia promissora para as futuras comunicações que podem utilizar os recursos de rede limitados de uma forma mais eficiente e flexível. Além do rádio cognitivo, as comunicações cooperativas surgiram como uma outra tecnologia emergente que traz importantes benefícios para os futuros padrões de comunicação sem fio devido a seus potenciais ganhos de cobertura, aumento da confiabilidade na detecção do sinal, da eficiência espectral, da capacidade e da vazão do sistema (Pabst and et al. (2004)). Estes benefícios são obtidos sem a necessidade de altos níveis de potência transmitida e múltiplas antenas nos terminais (Laneman, Tse, and Wornell (2004); Bletsas, Shin, and Win (2007)). Vários trabalhos na literatura têm investigado o uso conjunto destas duas tecnologias promissoras.

Devido ao aumento crescente dos serviços sem fio, cada vez mais o uso completo do espectro de rádio se torna necessário. Porém, dentro do atual quadro de regulamentação espectral, todas as bandas de frequência devem ser exclusivamente alocadas para serviços específicos e nenhuma violação por parte de usuários não-licenciados é permitida. Pesquisas de 2002 sobre a utilização do espectro feita pela Comissão Federal de Comunicações (do inglês, *Federal Communications Commission* (FCC)) têm indicado

que o atual espectro licenciado é pouco utilizado em boa parte do tempo e espaço (FCC (2002)). O uso ineficiente do espectro limitado requer o desenvolvimento de técnicas dinâmicas de acesso ao espectro, em que a um usuário que não possui licença de espectro, também conhecido como usuário secundário, seja permitido utilizar temporariamente a banda licenciada de um outro usuário se este não a estiver ocupando. O rádio cognitivo tem sido proposto para este fim, ou seja, para prover o uso mais flexível e abrangente do espectro disponível, tornando seu uso mais eficiente, permitindo que usuários sem licença utilizem o espectro de forma oportunista sem interferir com os usuários primários (Mitola (2000)).

Desde a sua introdução em (Mitola (1999)), a definição de rádio cognitivo evoluiu ao longo dos anos para tornar o rádio mais capaz e mais poderoso. Consequentemente, existem hoje diferentes interpretações do rádio cognitivo e visões diferentes para o seu futuro. De uma forma geral, essa tecnologia é definida como um rádio que pode monitorar o ambiente em que opera e adaptar dinamicamente os parâmetros do sistema de acordo com as interações com esse ambiente, sendo capaz de preencher os espaços vazios e servir seus usuários sem causar interferência aos usuários licenciados. O que difere essa tecnologia dos paradigmas de comunicação convencionais são as capacidades cognitivas e de reconfigurabilidade (Haykin (2005)). A capacidade cognitiva refere-se à capacidade de detectar e reunir informações do ambiente circundante, permitindo que os dispositivos CR sejam conscientes de informações como, forma de onda transmitida, frequência de transmissão, largura de banda, potência, modulação, do tipo/protocolo da rede de comunicação, da informação geográfica, da política de segurança, etc. De posse dessas informações, os dispositivos CR podem identificar o melhor espectro disponível e alterar dinamicamente seus parâmetros operacionais, tais como a potência de transmissão, a frequência, o tipo de modulação, e assim por diante, para alcançar um desempenho ideal, o que é chamado de reconfigurabilidade.

Ao explorar o espectro de forma oportunista, o rádio cognitivo permite aos usuários secundários detectar qual parte do espectro está disponível, selecionar o melhor canal disponível, coordenar o acesso ao espectro com outros usuários e desocupar o canal quando um usuário primário reivindica o uso do espectro de direito (Wang and Liu (2011)). Existem três principais paradigmas de redes de rádio cognitivas: Sistemas *Underlay*, Sistemas *Overlay* e Sistemas *Interweave*. Em sistemas *Underlay*, os usuários secundários podem usar a banda de frequência licenciada do usuário principal somente quando a interferência do usuário secundário é menor que o nível de interferência que o usuário primário pode tolerar. Portanto, a potência de transmissão do usuário secundário é limitada para não exceder o nível de interferência. Em sistemas *Overlay*, o usuário secundário usa simultaneamente o mesmo espectro que o usuário primário enquanto mantém ou melhora a transmissão deste, aplicando processamento e codificação de sinal sofisticados. Finalmente, em sistemas *Interweave*, o usuário secundário detecta

um furo de espectro e utiliza os espaços brancos que são porções do espectro atualmente não utilizados pelo usuário primário (Goldsmith *et al.* (2009)).

Do outro lado, as comunicações cooperativas surgiram como uma solução promissora para os futuros padrões de comunicação sem fio como forma de aumentar a taxa de transferência total e a cobertura das redes sem fio. Devido a essas vantagens, sistemas cooperativos têm sido recentemente explorados em trabalhos que tratam da tecnologia cooperativa em redes rádio cognitivas. Estudos recentes mostraram grandes benefícios que podem ser obtidos com a cooperação entre diferentes terminais. A cooperação em redes rádio cognitivas pode ser utilizadas em duas situações distintas: para exploração da atividade primária através de detecção cooperativa; e para exploração da oportunidade de transmissão através da transmissão cooperativa entre usuários secundários ou entre usuários secundários e primários.

A transmissão cooperativa explora a diversidade espacial sem precisar utilizar múltiplas antenas em um mesmo terminal. Nesse tipo de sistema, em contraste com a forma convencional de diversidade espacial, os terminais compartilham suas antenas e outros recursos, criando um arranjo virtual de antenas com transmissão e processamento distribuído de sinais. A ideia por trás da transmissão cooperativa é que, dentro de um ambiente sem fio, o sinal transmitido por uma fonte para um terminal de destino se propaga em *broadcast* e pode ser recebido por outros terminais. Esses terminais são denominados *relays* e podem colaborar com a comunicação. Os *relays* processam e retraduzem o sinal que recebem e o retransmitem ao destino. O destino então combina os sinais provenientes da fonte e do(s) *relay(s)*, explorando assim a diversidade espacial.

Na configuração das comunicações cooperativas, uma questão fundamental é a forma de processamento da informação realizada no *relay*. De acordo com a forma como o *relay* processa a informação para a retransmissão até o destino, tem-se a definição de diversos protocolos de retransmissão. Atualmente existem vários destes protocolos para sistemas cooperativos, entre os quais destacam-se os protocolos Amplifica-e-Encaminha (do inglês, *Amplify-and-Forward(AF)*) e o Decodifica-e-Encaminha (do inglês, *Decode-and-Forward(DF)*). Outra estratégia em sistemas cooperativos é a retransmissão incremental, em que o *relay* pode ou não transmitir o sinal recebido da fonte. Essa transmissão é realizada a partir da avaliação da qualidade do canal entre a fonte e o destino. A estratégia de retransmissão incremental torna o sistema ainda mais eficiente espectralmente (Liu *et al.* (2008)).

Uma das vantagens das redes cooperativas consiste em reduzir a perda de caminho geral obtida usando um *relay* entre uma fonte e um destino. O uso da cooperação em tecnologia sem fio tem sido amplamente estudado, especialmente no que diz respeito à obtenção de ganhos de diversidade e redução de probabilidades de *outage* através da cooperação de usuários móveis. Além disso, as implementações práticas do rádio cognitivo podem se beneficiar com o uso de cooperação entre os diferentes terminais. Unindo as

redes rádio cognitivas e as redes cooperativas, as redes de retransmissão cognitiva (CRN) surgiram e foram recentemente investigadas como uma maneira potencial de melhorar a taxa de transferência de usuários secundários. Assim, a cooperação tem se tornado uma tecnologia chave para ser abordada juntamente com rádio cognitivo. Portanto, estudar cenários específicos em que essas duas tecnologias trabalham de forma conjunta, torna-se extremamente importante para avaliar o comportamento das próximas gerações de comunicação sem fio.

## 1.2 Revisão de Literatura

A comunicação cooperativa fornece diversidade através de um sistema que permite que nós equipados com uma única antena retransmitam a informação utilizando as antenas de outros usuários presentes na rede. Esse conceito de cooperação foi inicialmente introduzido em (Laneman, Tse, and Wornell (2004); Sendonaris, Erkip, and Aazhang (2003a,b)). Desde esses estudos até os dias atuais várias pesquisas e cenários foram propostos para decidir "quando cooperar" e "como cooperar". Esquemas de retransmissão híbridos, que podem escolher de forma adaptativa os protocolos AF e DF com base nos resultados de decodificação no *relay* se mostraram muito eficazes para obter desempenho robusto em redes de retransmissão sem fio, como por exemplo em (Liu *et al.* (2012); Duong and Zepernick (2009)). Além disso, foi demonstrado que redes cooperativas com técnica de retransmissão incremental baseadas em limiar de SNR que exploram um canal de retorno limitado do destino podem atingir uma melhoria significativa da eficiência espectral em relação aos esquemas de retransmissão fixos. Os autores em (Ikki and Ahmed (2011)) investigaram o desempenho das redes de diversidade cooperativa de retransmissão incremental, considerando os protocolos de retransmissão AF e DF separadamente com canais independentes de desvanecimento Rayleigh. Um esquema de retransmissão combinando o DF incremental (do inglês, *Incremental Decode-and-Forward* (IDF)) com estratégias de retransmissão seletiva DF, denominado retransmissão incremental DF seletivo (do inglês, *Incremental Selective Decode-and-Forward* (ISDF)), foi apresentado em (Chen *et al.* (2009)). Finalmente, um esquema que engloba a retransmissão incremental e a retransmissão híbrida foi proposto em (Bai *et al.* (2015)), mostrando-se superior aos trabalhos anteriores. Nesse esquema, denominado retransmissão incremental híbrida (do inglês, *Incremental Hybrid Decode-Amplify-Forward* (IHDAF)), o *relay* pode optar por manter-se em silêncio ou transmitir mensagens no modo DF ou no modo AF com base nas qualidades dos canais entre a fonte, o *relay* e o destino.

A análise teórica de sistemas rádio cognitivo começou a ser investigada a partir de 1999 por Mitola em (Mitola (1999)) e em sua dissertação de doutorado em (Mitola (2000)), em que define o rádio cognitivo como uma tecnologia emergente para melhorar a

eficiência de utilização de recursos do espectro sem fio. Essa tecnologia pode ser utilizada sob três paradigmas diferentes, como mostra (Goldsmith *et al.* (2009)): a abordagem *Underlay*, a abordagem *Overlay* e a abordagem *Interweave*. A abordagem *Underlay* foi investigada em (Li, Zhang, and Yuan (2011)), a abordagem *Overlay* em (Manna *et al.* (2011)) e a abordagem *Interweave* foi investigada em (Letaief and Zhang (2009)) e (Wang and Zhang (2010)).

Vários trabalhos na literatura exploram a atuação conjunta da tecnologia cooperativa e cognitiva. Alguns destes artigos são discutidos brevemente na sequência. O desempenho de sistemas cooperativos cognitivos com compartilhamento espectral foi estudado em (Asghari and Aissa (2012); Maham *et al.* (2011); Zhong, Ratnarajah, and Wong (2011); Duong *et al.* (2012a,b, 2011)). Nesses trabalhos, a abordagem *Underlay* foi utilizada para a rede cognitiva. Em Asghari and Aissa (2012), tem-se uma comunicação entre usuários secundários assistidos por um *relay* AF em que restrições de potência média (e não a de pico) de interferência são consideradas para os receptores primários. Em (Maham *et al.* (2011)), é investigado o uso de técnicas de cancelamento de interferência oportunística na rede secundária. Os trabalhos (Zhong, Ratnarajah, and Wong (2011); Duong *et al.* (2012a)) exploram canais com desvanecimento Nakagami- $m$ , a ausência de enlace direto entre os terminais fonte-destino, e protocolos decodifica-e-encaminha e amplifica-e-encaminha, respectivamente. Finalmente em (Duong *et al.* (2012b, 2011)), o enlace direto é considerado em conjunto com a retransmissão pelo *relay* utilizando o protocolo DF e os sinais são combinados através de combinação por seleção no terminal destino.

Vale salientar que os trabalhos citados anteriormente consideraram um protocolo de retransmissão fixo no nó *relay*, de forma que este sempre é utilizado, independente da qualidade dos *links*, o que pode levar ao seu uso desnecessário em certos instantes de tempo, ocasionando conseqüentemente um desperdício de recursos da rede. Assim, a fim de melhorar a eficiência espectral de sistemas rádio cognitivos com compartilhamento espectral, alguns trabalhos têm considerado um protocolo de retransmissão incremental no nó *relay* (Tourki, Qaraqe, and Alouini (2013); Chang *et al.* (2014); Jaafar, Ajib, and Haccoun (2012)). Em (Tourki, Qaraqe, and Alouini (2013)) a expressão exata da probabilidade de *outage* é derivada para a rede de retransmissão cognitiva com o protocolo DF incremental (IDF) em canais com desvanecimento Rayleigh. Em (Chang *et al.* (2014)), o mesmo cenário é utilizado, mas são considerados canais com desvanecimentos independentes não idênticos Nakagami- $m$ . O trabalho (Jaafar, Ajib, and Haccoun (2012)), avalia a retransmissão incremental DF e o desempenho da seleção de *relay* para auxiliar a transmissão primária. Como podemos observar, comum a estes trabalhos é o emprego do protocolo DF quando a retransmissão é necessária. Tal hipótese pode implicar em uma perda de desempenho, pois sob certas condições o protocolo AF possui desempenho melhor que o protocolo DF.

Em comparação com os trabalhos citados anteriormente que realizaram a

análise de desempenho de sistemas cooperativos cognitivos, o presente trabalho tem o diferencial de realizar um estudo de desempenho para sistemas de retransmissão com compartilhamento espectral seguindo a abordagem *underlay*, em que um protocolo de retransmissão incremental híbrido (IHDAF) é utilizado para melhorar o desempenho do sistema. Esse protocolo segue a ideia proposta em (Bai *et al.* (2015)), em que o *relay* retransmite o sinal ora utilizando o protocolo AF, ora o protocolo DF. Em particular, o sistema emprega a técnica de combinação por razão máxima (do inglês, *Maximal Ratio Combining* (MRC)) no terminal destino e considera o desvanecimento Rayleigh, para fim de simplificações de resultados. Uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* fim-a-fim é obtida e validada através de simulação Monte Carlo. Resultados numéricos são apresentados com o intuito de avaliar o efeito da perda de percurso, distância entre nós e o limiar de interferência da rede primária no desempenho sistêmico. Além disso, comparações com trabalhos anteriores foram também realizadas.

### 1.3 Motivação e Objetivos

Diante das diversas pesquisas realizadas, e da importância de duas das principais tecnologias promissoras para o futuro das comunicações sem fio, esta dissertação propõe a análise de um sistema que utilize em conjunto as redes rádio cognitivas e redes cooperativas. Nosso objetivo neste trabalho é avaliar o desempenho das redes de retransmissão cognitiva usando uma abordagem incremental para a cooperação entre usuários secundários com base no paradigma *underlay*, ao aderir a uma restrição de interferência no usuário primário. Embora outros trabalhos utilizem estrutura semelhante, este é o primeiro a explorar a retransmissão incremental híbrida no contexto de CR para melhorar a diversidade do espectro de forma inteligente. Primeiro, fornecemos o cenário de retransmissão incremental cognitiva adequado e, em seguida, derivamos a probabilidade de *outage* da rede cooperativa cognitiva com compartilhamento espectral com protocolo de retransmissão híbrido. Desta forma, a análise proposta por esse trabalho pode ser de oportuno proveito acadêmico e científico.

Nossas principais contribuições com esse trabalho são:

- Propor um sistema de comunicação cooperativo cognitivo com compartilhamento espectral considerando uma rede de retransmissão cognitiva usando uma abordagem incremental para a cooperação entre usuários secundários com base no paradigma *underlay*. Nesse cenário usuários secundários coexistem com usuários primários, mas limitam sua potência de transmissão para não causar interferência nos usuários licenciados. A cooperação existe na transmissão secundária, mas a retransmissão só acontece se o canal fonte-destino não apresentar boas condições. Caso a retransmissão seja necessária, o *relay* retransmite o sinal ora utilizando o modo DF, ora

o modo AF, dependendo das condições do canal. Além disso, é assumido que os canais sem fio têm desvanecimento de pequena escala do tipo Rayleigh e que o nó de destino combina os sinais recebidos a partir do *relay* e da fonte usando o método de combinação de razão máxima (MRC);

- Desenvolver a expressão analítica fechada para a probabilidade *outage* para o sistema proposto, utilizando o protocolo de retransmissão incremental, e o método MRC no destino, levando em consideração a rede primária e o nível de interferência tolerado pelo usuário primário;
- Fornecer uma análise do sistema proposto com base na expressão analítica desenvolvida através de simulações computacionais, mostrando os efeitos da perda de percurso, da distância entre os nós primários e secundários, do limiar de interferência, etc.;
- Comparar o sistema proposto através de simulações computacionais com outros sistemas que apresentam cenários semelhantes, como a retransmissão cognitiva com compartilhamento espectral que utiliza DF incremental e DF seletivo incremental.

## 1.4 Produção Científica

J. P. Rodrigues, D. B. Costa, R. T. Sousa Jr. e F. L. G. Deus, “*Protocolo de Retransmissão Incremental Híbrido em Sistemas Cooperativos de Dois Saltos com Compartilhamento Espectral*”, XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2016), pp. 1 - 5, Agosto, 2016.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

O restante dessa dissertação está dividida da seguinte forma:

**Capítulo 2** - Trata das principais teorias sobre sistemas de comunicação cooperativos, mostrando os modelos básicos mais relevantes e apresentando suas principais vantagens e desvantagens. Além disso, o capítulo expõe as diferenças entre as principais abordagens de cooperação e desenvolve os protocolos pertinentes e os modelos que serão aplicados no trabalho.

**Capítulo 3** - Trata das redes rádio cognitivas como um meio para promover o uso eficiente do espectro. Os principais conceitos para entender como pode ocorrer o compartilhamento do espectro de maneira oportunística são apresentados. Além disso, os principais paradigmas de rádio cognitivos são definidos e diferenciados. Finalmente, é mostrado como a cooperação e o rádio cognitivo podem trabalhar em conjunto.

**Capítulo 4** - Apresenta o modelo de sistema proposto e desenvolve a equação analítica

em forma fechada para a probabilidade de *outage* do sistema.

**Capítulo 5** - Verifica, através de simulações computacionais, a validade da equação analítica desenvolvida no Capítulo 4 e avalia como a probabilidade de *outage* do sistema proposto se comporta diante da variação de parâmetros.

**Capítulo 6** - Apresenta as conclusões deste trabalho e as perspectivas futuras.

# Capítulo 2

## Comunicação Cooperativa

Neste capítulo as teorias e conceitos relativos a comunicação cooperativa são abordados, expondo as principais abordagens de cooperação e desenvolvendo os protocolos e modelos pertinentes que serão aplicados no trabalho. Na Seção 2.1, é discutida a contextualização da cooperação dentro de um ambiente de rede sem fio e mostrado como a cooperação funciona em seu ambiente mais básico. Na Seção 2.2, pontua-se as principais categorias de protocolos de retransmissão, mostrando as diferenças entre eles. Ainda nesta Seção, destacam-se três desses protocolos de retransmissão que serão usados no contexto do trabalho: Protocolo AF, Protocolo DF e a retransmissão incremental, Subseções 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, respectivamente. Na Seção 2.3, são apresentadas as principais vantagens e desvantagens da abordagem cooperativa. Por fim, a Seção 2.4 mostrará o modelo de sistema e as formulações matemáticas para os protocolos de cooperação mais difundidos na literatura.

### 2.1 Introdução

Devido às características físicas das ondas eletromagnéticas o sinal é transmitido através do canal sem fio de maneira *broadcast*, distribuindo múltiplas cópias da informação no meio. Dessa forma todos os terminais presentes na rede podem, em tese, receber essas informações que ao invés de serem consideradas como interferência podem colaborar com a comunicação fornecendo um ganho no desempenho do sistema. Além disso, por causa de efeitos como reflexão, refração, difração e espalhamento, provocados pela presença de objetos no meio e pela movimentação dos terminais, o sinal transmitido segue por diferentes percursos experimentando diferentes desvanecimentos até a chegada ao destino final (Nosratinia, Hedayat, and Hunter (2004); Laneman).

Diversas técnicas para contornar e explorar o desvanecimento provocado por esses multipercursos são fundamentais para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio. Uma das maneiras mais eficazes de se combater esse efeito é com a

utilização de diversidade. De fato existem inúmeras técnicas de diversidade, tais como: diversidade espacial, temporal, na frequência, etc. Em especial, a diversidade espacial baseia-se no princípio de que sinais transmitidos a partir de transmissores separados geograficamente e/ou para receptores separados geograficamente experimentam desvanecimentos independentes, ou seja, a ideia de se aplicar múltiplas antenas para obtenção de ganho em diversidade espacial. Entretanto, devido ao tamanho dos dispositivos, utilizar múltiplas antenas torna-se uma tarefa difícil. Uma forma de contornar essa limitação, mas ainda sendo capaz de simular uma diversidade de antena alcançando os ganhos em diversidade espacial, é utilizar a cooperação entre os usuários em uma célula (Liu *et al.* (2008); Cottatellucci *et al.* (2009)).

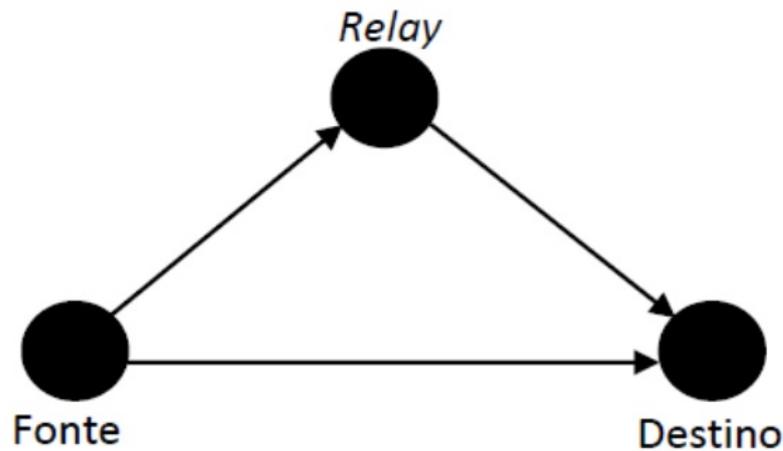
A ideia da comunicação cooperativa consiste no compartilhamento das antenas dos múltiplos usuários presentes no ambiente da comunicação de modo a formar uma matriz virtual de antenas capazes de transmitir dados para um receptor (Laneman, Tse, and Wornell (2004); Sendonaris, Erkip, and Aazhang (2003a)). Ou seja, em uma célula do sistema de comunicação, um usuário é auxiliado por dispositivos colaboradores, denominados *relays*, que são capazes de retransmitir uma informação recebida, auxiliando o processo de comunicação. Dessa forma, as informações de um usuário podem ser transmitidas não apenas pelo próprio usuário, mas também retransmitida através da cooperação de outros usuários na mesma transmissão. O canal via *relay* pode ser visto como um canal auxiliar ao canal direto da comunicação entre a origem e o destino. Da mesma forma que os transmissores com múltiplas antenas, os *relays* fornecem diversidade criando várias réplicas do sinal de interesse. Além disso, quando o *link* direto não está disponível em um dado momento da comunicação, os *relays* podem fornecer a cobertura da rede (Sendonaris, Erkip, and Aazhang (2003a); Meier and Thompson (2005); Chakrabarti, Sabharwal, and Aazhang (2006)).

O conceito por trás da comunicação cooperativa pode ser explicada através de um modelo simplificado mostrado na Figura 2.1. A Figura 2.1 mostra um terminal fonte, um *relay* e um terminal destino. Cada dispositivo do sistema tem uma única antena e não pode, individualmente, gerar diversidade espacial. Entretanto, com a colaboração do *relay* a informação pode ser retransmitida e o terminal de destino pode receber pelo menos duas versões da informação transmitida, visto que os caminhos percorridos pelas diferentes versões são estatisticamente independentes, gerando diversidade espacial (Liu *et al.* (2008); Menghwar and Mecklenbrauker (2009); Chakrabarti, Sabharwal, and Aazhang (2006)).

## 2.2 Protocolos de Cooperação

Em um sistema de comunicação cooperativo, a transmissão da informação pode ser descrita em duas fases ortogonais no tempo ou na frequência. Na primeira fase,

Figura 2.1 – Modelo simplificado de sistema cooperativo.



a fonte envia a informação simultaneamente para o destino e para o *relay*. Na segunda fase, o *relay* colabora com a transmissão encaminhando uma versão processada do sinal para o destino.

O aspecto principal das comunicações cooperativas é a forma de processamento do sinal recebido da fonte por um *relay*. De acordo com os esquemas de processamento realizados pelos *relays*, surgem os diferentes protocolos de retransmissão. Existem diversas formas de classificação dos protocolos de retransmissão nas comunicações cooperativas, dentre as quais temos: transparentes (não-regenerativos) ou regenerativos e; fixos ou adaptativos.

Nos protocolos de retransmissão transparentes o *relay* não modifica a forma de onda da informação recebida. Nesses protocolos algumas operações simples podem ser desenvolvidas, como uma simples amplificação do sinal ou rotação de fase. Um exemplo de protocolo de retransmissão transparente é o protocolo Amplifica-e-Encaminha (AF). Nos protocolos de retransmissão regenerativos a informação (bits) ou forma de onda (amostras) são modificadas. Nesses protocolos operações lineares e não-lineares podem ser executadas no sinal a ser retransmitido. Os protocolos: Estima-e-Encaminha (do inglês, *Estimate-and-Forward* (EF)), Decodifica-e-Encaminha (DF) e o Comprime-e-Encaminha (do inglês, *Compress-and-Forward* (CF)) são exemplos de protocolos de retransmissão regenerativos (Dohler and Li (2010)).

Como já mencionada, outra forma de classificação dos protocolos de comunicação cooperativos são os protocolos fixos e adaptativos. Nos protocolos de retransmissão fixos os recursos do canal são divididos entre o terminal fonte e o *relay* de forma determinística. Estes protocolos têm como vantagem a baixa complexidade, porém a eficiência espectral da transmissão das informações diminui. Isso ocorre porque parte dos recursos do canal são alocados para o *relay*. Ou seja, quando o caminho direto entre a fonte e o destino é considerado bom não haveria a necessidade da utilização do caminho

via *relay*. Os protocolos adaptativos tentam contornar esses problemas. Alguns exemplos de protocolos de retransmissão fixos são: Amplifica-e-Encaminha (AF), o Decodifica-e-Encaminha (DF) e o Comprime-e-Encaminha (CF). Nos protocolos de retransmissão adaptativos o *relay* decide quando transmitir ou não o sinal recebido da fonte. Tal decisão é baseada em métricas que geralmente levam em consideração a Relação Sinal-Ruído (do inglês, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR)) do sinal recebido ou a qualidade do canal entre a fonte e o destino. Como exemplo desse tipo de protocolo tem-se o protocolo Decodifica-e-Encaminha Seletivo e o protocolo de Retransmissão Incremental (Liu *et al.* (2008)).

Nas seções seguintes serão descritos em mais detalhes alguns dos principais protocolos existentes na literatura.

### 2.2.1 Protocolo Amplifica-e-Encaminha

O primeiro protocolo cooperativo abordado trata-se do Amplifica-e-Encaminha. Como o próprio nome sugere, esse protocolo transmite uma versão amplificada do sinal para o terminal de destino. Cada usuário deste método recebe uma versão ruidosa do sinal transmitido, que será multiplicado por um ganho  $G$ , amplificando o sinal, que será retransmitido pelo *relay* para o destino. De acordo com o fator de ganho  $G$ , o *relay* pode ser classificado como *relay* de ganho fixo ou de ganho variável. O primeiro é determinado em casos onde não há informação sobre o estado do canal, sendo calculado em função do valor médio dos coeficientes dos canais fonte-*relay*. No ganho variável, o fator  $G$  é definido em função dos valores instantâneos dos coeficientes dos canais (Liu *et al.* (2008)).

O protocolo AF é representado graficamente através da Figura 2.2. Nesse protocolo, apesar do ruído ser amplificado pela cooperação, o terminal de destino recebe duas versões do sinal com desvanecimentos independentes e pode tomar a melhor decisão sobre a detecção da informação. Além disso, o protocolo AF é um método simples e de fácil implementação (Nosratinia, Hedayat, and Hunter (2004)).

### 2.2.2 Protocolo Decodifica-e-Encaminha Fixo e Seletivo

Existem dois tipos de protocolo DF: o protocolo DF Fixo e o DF Seletivo. Para o protocolo DF Fixo, o *relay* aplica alguma forma de detecção e/ou de decodificação do sinal recebido e recodifica a informação para então retransmiti-la à fonte. Esses processos de decodificação e recodificação correspondem à transformações não-lineares do sinal recebido. O protocolo DF é representado pela Figura 2.3 (Laneman).

A principal vantagem do protocolo DF Fixo é que através da decodificação não há propagação dos efeitos do canal no sinal transmitido, ou seja, os efeitos do ruído são reduzidos. Entretanto, pode ocorrer a detecção incorreta da informação transmitida resultando na propagação de erro até o destino. Dessa forma, o protocolo DF Fixo sofre com

Figura 2.2 – Esquema protocolo Amplifica-e-Encaminha (Extraído de (Nosratinia, Hedayat, and Hunter (2004))).

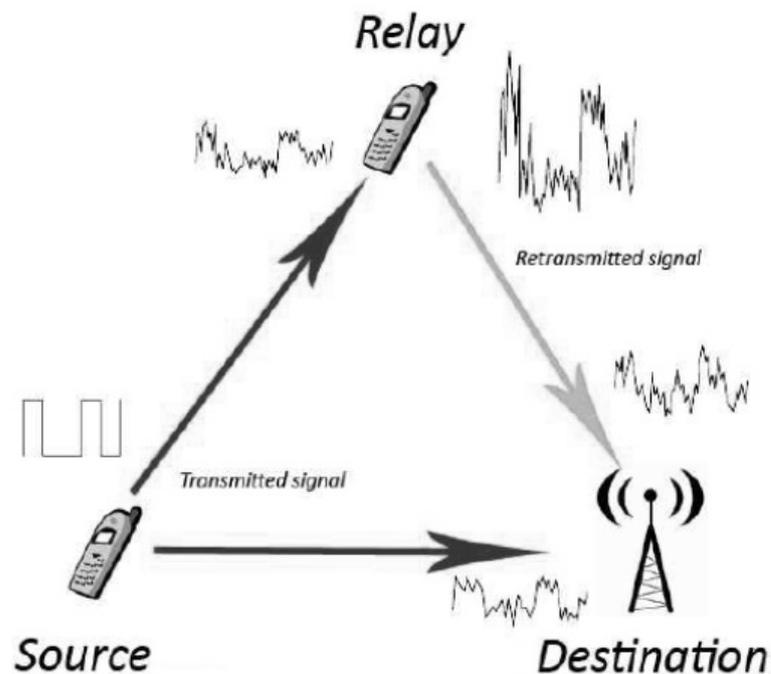
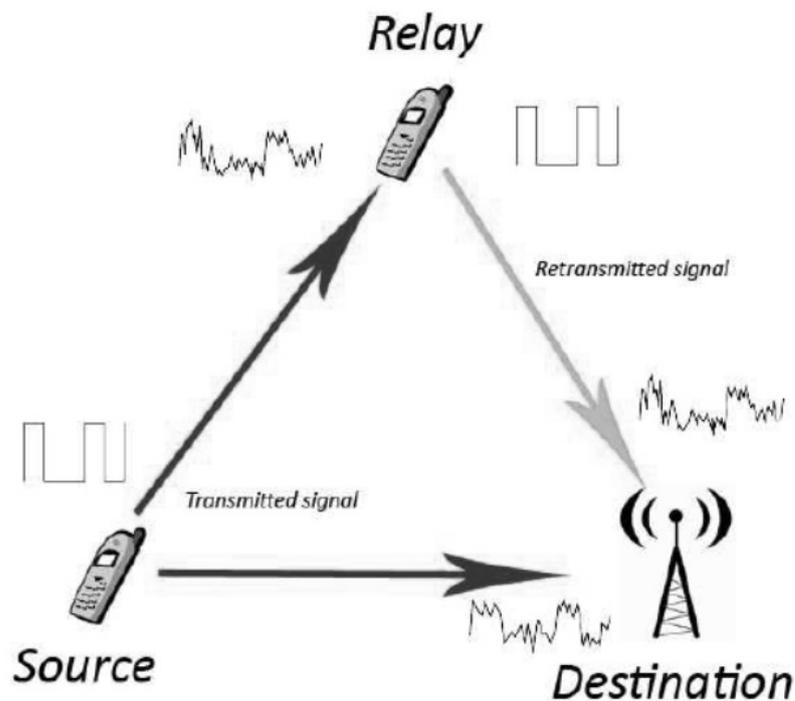


Figura 2.3 – Esquema protocolo Decodifica-e-Encaminha (Extraído de (Nosratinia, Hedayat, and Hunter (2004))).



uma perda de desempenho em canais fonte-*relay* ruins, causando uma redução no ganho em diversidade. Para aumentar a resistência desse protocolo e reduzir a probabilidade de propagação e ocorrência de erros utiliza-se o protocolo DF Seletivo.

No protocolo DF Seletivo se a SNR do sinal recebido pelo *relay* excede certo

limiar o *relay* irá decodificar esse sinal e retransmitir a informação recodificada para o destino. De forma contrária, se o canal entre a fonte e o *relay* sofre um desvanecimento profundo, fazendo com que a SNR fique abaixo de um limiar preestabelecido, o *relay* permanece inativo. Dessa forma, o protocolo DF Seletivo apresenta um desempenho superior ao protocolo DF Fixo visto que esse último encaminha todos os sinais decodificados, podendo haver propagação do erro ao destino (Liu *et al.* (2008)).

### 2.2.3 Protocolo de Retransmissão Incremental

Os protocolos de retransmissão fixos podem ser ineficientes espectralmente, principalmente para altas taxas de dados porque os *relays* retransmitem o tempo todo. Se o *link* direto entre fonte e o destino possui uma boa qualidade e o destino é capaz de receber corretamente o sinal proveniente da fonte, não há necessidade de cooperação. Este é o princípio da retransmissão incremental (Laneman).

Os protocolos de retransmissão incremental exploram a existência de um canal de *feedback* a partir do terminal de destino que indica o sucesso ou o fracasso da transmissão direta. Através desse canal de retorno, o destino envia uma confirmação para o *relay* se a mensagem foi recebida corretamente da fonte na primeira fase da transmissão, de modo que o *relay* não necessita retransmitir a informação. Ou seja, se a transmissão da fonte na primeira fase foi bem sucedida, não há a necessidade da retransmissão e a fonte pode transmitir novas informações no próximo *slot* de tempo. Por outro lado, se a transmissão na primeira fase não foi bem sucedida, o *relay* pode usar qualquer um dos protocolos de retransmissão para encaminhar o sinal ao destino (Liu *et al.* (2008); Laneman).

Os protocolos de retransmissão incremental são melhores espectralmente que os outros protocolos descritos anteriormente e a segunda fase da transmissão torna-se oportunística dependendo das condições do estado do canal direto entre a fonte e o destino (Liu *et al.* (2008)).

### 2.2.4 Outros Protocolos de Cooperação

- **Estima-e-Encaminha:** Esse protocolo é utilizado quando os canais fonte-*relay* e fonte-destino são comparáveis e o canal *relay*-destino é bom. Nessa situação, o *relay* pode não ser capaz de decodificar o sinal da fonte, no entanto tem uma observação independente do sinal da fonte que pode auxiliar na decodificação no destino. Nesse protocolo o sinal é amplificado e convertido para banda-base, depois alguns algoritmos de detecção tentam recuperar a representação original do sinal. Essa estimativa é então retransmitida (Chakrabarti, Sabharwal, and Aazhang (2006); Dohler and Li (2010)).

- **Comprime-e-Encaminha:** Esse protocolo é semelhante ao protocolo EF acima descrito no sentido de que o *relay* transmite uma versão comprimida da informação detectada para o destino. No protocolo CF, o *relay* transmite uma versão quantizada e comprimida do sinal de mensagem. No destino, o sinal recebido proveniente da fonte e sua versão quantizada e comprimida pelo *relay* serão combinados (Liu *et al.* (2008); Dohler and Li (2010)).

## 2.3 Vantagens e Desvantagens da Comunicação Cooperativa

Nos sistemas de comunicações móveis é importante analisar a disponibilidade, a infraestrutura e os pré-requisitos da rede para utilizar uma determinada técnica de comunicação. Em meio a isso, torna-se necessário a análise das vantagens e desvantagens dos sistemas cooperativos comparados aos sistemas de comunicação tradicional para determinar a eficiência ou não desse sistema em uma dada aplicação de rede sem fio.

As principais vantagens dos sistemas cooperativos podem ser resumidas como segue (Dohler and Li (2010)):

- **Ganho em desempenho:** Maiores capacidades de transmissão podem ser alcançadas com a exploração da diversidade espacial e os ganhos de multiplexação proporcionados pelos sistemas cooperativos. Além disso, tem-se uma menor perda de percurso devido a proximidade entre a fonte e o *relay*. Isso acarreta uma menor potência para a transmissão, aumento da capacidade e melhor cobertura celular.
- **Qualidade de serviço equilibrada:** diferentemente dos sistemas tradicionais, com sistemas cooperativos os usuários de bordas de células podem ter praticamente a mesma qualidade de serviço que todos os outros usuários da célula.
- **Infraestrutura reduzida:** com o uso de usuários como *relays*, nenhuma estrutura adicional é exigida para a implantação do sistema.
- **Redução de custos:** para fornecer um determinado nível de qualidade de serviço, por não necessitar de infraestrutura adicional, os sistemas cooperativos necessitam de menos investimento financeiro se comparados aos sistemas tradicionais.

Os sistemas cooperativos apresentam algumas desvantagens descritas sucintamente a seguir (Dohler and Li (2010)):

- **Gerenciamento complexo:** Manter um único *link* cooperativo é, em geral, uma tarefa bastante simples. Entretanto em sistemas com muitos usuários, e consequentemente com muitos *relays*, o controle e agendamento das informações exige maior esforço computacional, devido ao fato de que não só o tráfego dos diferentes usuários, mas também os dados retransmitidos, precisam ser escalonados e roteados.
- **Aumento da sobrecarga:** o sistema cooperativo requer programas para sincro-

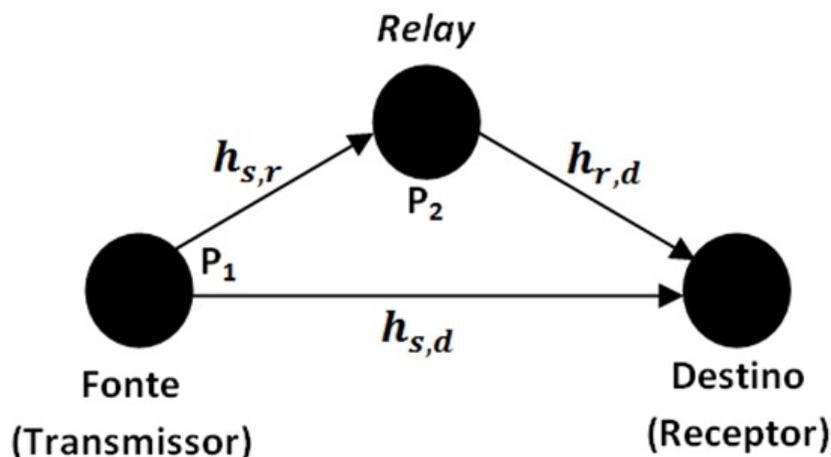
nização e para segurança extra, entre outras rotinas, o que provoca um aumento da sobrecarga do sistema.

- **Escolha do terminal colaborador:** nesse sistema, determinar o *relay* ideal para a cooperação que garante a melhor transmissão e, portanto, a menor taxa de erros, em determinado momento é uma tarefa complicada e que também aumenta a sobrecarga do sistema.
- **Aumento de tráfego:** o envio de informação redundante diminui o rendimento do sistema.
- **Mais canais estimados:** o uso de *relays* aumenta o número de canais sem fio. Isso requer a estimativa de mais coeficientes de canal.
- **Aumento da interferência:** A potência de transmissão dos *relays* deve ser controlada para evitar o aumento das interferências intra- e inter-celular.

## 2.4 Modelo de Sistema Cooperativo

Considere uma rede de comunicação sem fio com um *relay*, em que a informação deve ser transmitida de um terminal fonte para um terminal destino, conforme ilustrado na Figura 2.4. Devido à natureza *broadcast* da transmissão em canais sem fio, o *relay* é capaz de receber a informação transmitida e enviar os dados recebidos para o destino, cooperando com a comunicação. O canal sem fio entre quaisquer dois nós da rede (fonte-destino, fonte-*relay* e *relay*-destino) são modelados como canais com desvanecimento Rayleigh e com ruído aditivo branco gaussiano (do inglês, *Additive White Gaussian Noise* (AWGN)). Além disso, o desvanecimento do canal para *links* diferentes são considerados estatisticamente independentes.

Figura 2.4 – Modelo simplificado de sistema cooperativo.



A estratégia de comunicação cooperativa utilizada é modelada em duas fases ortogonais. A primeira fase consiste do envio da informação da fonte para o destino e para o *relay* ao mesmo tempo. Na segunda fase, o *relay* colabora com a comunicação encaminhando ou retransmitindo a informação para o destino. Na fase 1 a fonte envia a informação em *broadcast* para o destino e para o *relay* com potência  $P_S$ . Os sinais  $y_{SD}$  e  $y_{SR}$  recebidos pelo destino e pelo *relay* respectivamente são descritos por (Liu *et al.* (2008)):

$$y_{SD} = \sqrt{P_S} h_{SD} x + n_{SD} \quad (2.1)$$

e

$$y_{SR} = \sqrt{P_S} h_{SR} x + n_{SR}, \quad (2.2)$$

em que  $x$  é o sinal de informação,  $h_{SD}$  e  $h_{SR}$  são os coeficientes do canal entre a fonte e o destino e a fonte e o *relay*, respectivamente, e  $n_{SD}$  e  $n_{SR}$  são ruídos. As componentes em fase e quadratura dos coeficientes do canal são modeladas como variáveis aleatórias gaussianas com média zero e variância  $\delta_{SD}$  (fonte-destino) e  $\delta_{SR}$  (fonte-relay). Os ruídos são modelados como variáveis aleatórias gaussianas, com média zero e variância  $N_0$ .

Na segunda fase da comunicação, o *relay* colabora com a fonte encaminhando uma versão processada da informação para o destino com potência  $P_R$ . No receptor, o sinal recebido  $y_{RD}$  do *relay* é dado por (Liu *et al.* (2008)):

$$y_{RD} = h_{RD} q(y_{SR}) + n_{RD}, \quad (2.3)$$

em que  $h_{RD}$  é o coeficiente do canal entre o *relay* e o destino,  $n_{RD}$  é o ruído aditivo e  $q(\cdot)$  é uma função que depende do processamento do sinal pelo *relay*.

Como já mencionado, o principal aspecto da comunicação cooperativa é a forma de processamento do sinal recebido da fonte por um *relay*. De acordo com o esquema de processamento surgem os diferentes protocolos de comunicação, que afetarão diretamente a função  $q(\cdot)$  na segunda fase da transmissão para cada protocolo diferente.

### 2.4.1 Protocolo Amplifica-e-Encaminha

Para o protocolo AF, o *relay* multiplica o sinal recebido por um ganho  $G$ , retransmitindo uma versão amplificada da informação para o destino. A primeira fase da transmissão para este protocolo segue o modelo descrito pelas Equações (2.1) e (2.2). Na segunda fase da transmissão o *relay* aplica no sinal recebido um fator de amplificação  $G$ , onde o sinal transmitido pelo *relay* passa a ser representado por  $G y_{SR}$  (Liu *et al.* (2008); Liu and Zhou (2010); Fei *et al.* (2007)). Utilizando-se um *relay* AF com ganho variável, o fator de escala  $G$  introduzido pelo *relay* tem como objetivo compensar os efeitos do desvanecimento do canal sendo inversamente proporcional à raiz quadrada da potência

do sinal recebido pelo *relay* e é dado por (Liu *et al.* (2008)):

$$G = \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_S|h_{SR}|^2 + N_0}}. \quad (2.4)$$

Além disso, o fator  $\sqrt{P_R}$  em (2.4) faz com que o sinal transmitido pelo *relay* tenha potência  $P_R$ . O sinal recebido pelo destino na segunda fase de transmissão utilizando o ganho descrito em (2.4) é dado por:

$$y_{RD} = Gh_{RD}y_{SR} + n_{RD},$$

$$y_{RD} = \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_S|h_{SR}|^2 + N_0}}h_{RD}y_{SR} + n_{RD}. \quad (2.5)$$

Fazendo a substituição de (2.2) em (2.5), tem-se:

$$y_{RD} = \frac{P_R}{\sqrt{P_S|h_{SR}|^2 + N_0}}h_{RD}h_{SR}\sqrt{P_S}x + n'_{RD}, \quad (2.6)$$

em que  $n'_{RD}$  pode ser descrito por:

$$n'_{RD} = \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_S|h_{SR}|^2 + N_0}}h_{RD}n_{SR} + n_{RD}. \quad (2.7)$$

Assumindo que os termos do ruído  $n_{SR}$  e  $n_{RD}$  são independentes, então o ruído equivalente  $n'_{RD}$  é uma variável aleatória gaussiana com média zero e variância dada por:

$$N'_0 = \left( \frac{P_R|h_{RD}|^2}{P_S|h_{SR}|^2 + N_0} + 1 \right) N_0. \quad (2.8)$$

O destino recebe duas cópias da mesma informação provenientes, uma diretamente da fonte ( $y_{SD}$  dado pela Equação (2.1)), e outra do *relay* ( $y_{RD}$  dado pela Equação (2.6)). Esses sinais devem ser combinados por algum algoritmo adequado (método de combinação) para obtenção do sinal de informação final. Utilizando a combinação por seleção (do inglês, *Selection Combining* (SC)), a saída do combinador é dada pelo sinal com a maior SNR do canal. Utilizando a combinação por razão máxima (MRC), a saída do combinador no receptor é dada por:

$$y = a_1y_{SD} + a_2y_{RD}, \quad (2.9)$$

onde  $a_1$  e  $a_2$  são pesos associados aos sinais recebidos da fonte e do *relay*, respectivamente, que devem ser escolhidos de forma que maximize a SNR combinada, como os valores descritos em (Liu *et al.* (2008)).

### 2.4.2 Protocolo Decodifica-e-Encaminha

No protocolo DF o *relay* decodifica a informação recebida da fonte, codifica-a novamente e a retransmite para o destino. Neste protocolo a comunicação também ocorre em duas etapas de transmissão. Na primeira etapa a informação é transmitida pela fonte e os sinais recebidos pelo destino e pelo *relay* são descritos pelas equações (2.1) e (2.2), respectivamente. Na segunda etapa, o *relay* processa e retransmite a informação. Se o sinal decodificado pelo *relay* é denotado por  $\hat{x}$ , o sinal transmitido pelo *relay* para o destino é denotado por  $\sqrt{P_R}\hat{x}$ . O sinal  $y_{RD}$  recebido pelo destino na segunda fase da transmissão é dado por:

$$y_{RD} = \sqrt{P_R}h_{RD}\hat{x} + n_{RD}. \quad (2.10)$$

em que  $h_{RD}$  é o coeficiente do canal *relay*-destino,  $n_{RD}$  é o ruído AWGN associado ao canal *relay*-destino e  $\hat{x}$  é o sinal decodificado e recodificado pelo *relay*.

Nesse protocolo, é importante observar que o sinal decodificado pelo *relay* pode conter erros e o sinal incorreto pode ser propagado para o destino. A propagação de erros pode ser um fator de degradação do desempenho do protocolo DF. O protocolo DF Seletivo pode contornar esse problema através da utilização de um limiar de SNR de forma que o sinal a ser transmitido ao receptor é dado por (Lee and Kim (2007); Quoc *et al.* (2008)):

$$x_R = \begin{cases} \sqrt{P_R}\hat{x} & , \text{ se } \gamma_{SR} \geq \gamma_{th} \\ 0 & , \text{ caso contrário,} \end{cases} \quad (2.11)$$

em que  $\gamma_{SR}$  é a SNR do enlace entre a fonte e o *relay* e  $\gamma_{th}$  é um limiar de decisão.

Assim, se a SNR do sinal recebido pelo *relay* estiver acima de um determinado limiar pré-estabelecido, o *relay* decodifica, recodifica e encaminha a informação ao destino. Caso a SNR esteja abaixo do limiar, o *relay* fica inativo. Deste modo, o protocolo DF Seletivo reduz a probabilidade de transmitir informações incorretas a partir da exclusão de sinais cujas SNRs estejam reduzidas, resultando assim em menores probabilidades de erro no receptor. Para o protocolo DF Seletivo, quando a SNR do link fonte-*relay* excede um limiar, o destino recebe duas cópias da mesma informação provenientes da fonte e do *relay*, dados por (2.1) e por (2.10), respectivamente. Da mesma forma que para o protocolo AF, esses sinais devem ser combinados por algum método adequado para obtenção do sinal de informação desejado. Utilizando a combinação por seleção, a saída do combinador no receptor será composta pelo sinal com maior SNR. Utilizando a combinação por razão máxima, a saída do combinador no receptor é dada por (2.9), onde também os valores de  $a_1$  e  $a_2$  devem ser escolhidos de tal forma que maximize a SNR combinada (Liu *et al.*

(2008)).

## 2.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos inerentes à abordagem cooperativa de comunicação. Inicialmente, apresentamos em que contexto a cooperação pode ser explorada em um ambiente sem fio e como é possível essa cooperação. Ilustramos a ideia básica de cooperação através de um modelo simplificado do sistema, onde um terminal colaborador está presente para retransmitir a informação processada até o destino. As principais classificações de protocolos foram mostradas e alguns dos principais protocolos de cooperação foram abordados em maiores detalhes, destacando-se as principais características e diferenças entre cada um deles. As vantagens e desvantagens da utilização dos sistemas de comunicação cooperativos foram também tratadas neste capítulo como importantes características para o projeto de sistemas de comunicação sem fio.

# Capítulo 3

## Rádio Cognitivo

Este capítulo trata de uma tecnologia emergente para o uso eficiente do espectro: o Rádio Cognitivo. O capítulo inicia, Seção 3.1, com o contexto do problema para o surgimento da ideia de rádio cognitivo e segue na Seção 3.2 com algumas definições importantes para o entendimento de como a tecnologia funciona, como: furo de espectro, descrito na Subseção 3.2.1, temperatura de interferência, descrita na Subseção 3.2.2 e oportunidade de espectro, descrita na Subseção 3.2.3. A Seção 3.3 define onde o rádio cognitivo surgiu e qual o objetivo dessa tecnologia. A Subseção 3.3.1 estabelece as duas principais características que um rádio cognitivo deve possuir, que são: a cognição e a reconfigurabilidade. As funções específicas de um sistema rádio cognitivo são apresentadas na Subseção 3.3.2 e a arquitetura básica é descrita na Subseção 3.3.3. A Seção 3.4 apresenta as estratégias de acesso dinâmicas ao espectro, no qual o rádio cognitivo está inserido e, define e diferencia os três principais paradigmas de rádio cognitivo (*Underlay*, subseção 3.4.1; *Overlay*, subseção 3.4.2; *Interweave*, subseção 3.4.3). Finalmente, o capítulo encerra apresentando na Seção 3.6 como as tecnologias de cooperação e de rádio cognitivo podem ser incorporadas para trabalharem juntas.

### 3.1 Introdução

Nos últimos anos, o número de sistemas e serviços sem fio cresceu exponencialmente. O surgimento de novas aplicações, novos serviços, o crescente interesse dos consumidores em dispositivos e redes móveis, o aumento do número de usuários, etc., vêm impulsionando a evolução das redes sem fio para redes de dados de ultra velocidade. Essa aceitação generalizada das tecnologias sem fio desencadeou uma enorme demanda por largura de banda. E nos próximos anos espera-se que essa demanda por espectro radioelétrico testemunhe um crescimento ainda maior (Srinivasa and Jafar (2007)).

O espectro radioelétrico é um recurso natural, cujo uso por usuários, sejam transmissores ou receptores, é licenciado por agências governamentais de forma rígida,



de bandas de frequência não as estão usando o tempo todo e em todos os lugares. Ao mesmo tempo, outros usuários que necessitam usar o espectro localmente não têm o direito de usar essas frequências correspondentes (Mishra, Sahai, and Brodersen (2006)). Esse paradoxo sugere que a escassez de espectro resulta da política de gerenciamento ineficiente e rígida e não da escassez física de frequências utilizáveis (Haykin (2005); Ghasemi and Sousa (2007)).

Devido a esse contra-senso, surgem diversas iniciativas e grandes projetos de diferentes organizações que incentivam uma mudança de paradigma na política de acesso ao espectro. A subutilização do espectro incentivou diversas atividades em comunidades de engenharia, economia e regulação na busca de melhores políticas e técnicas de gerenciamento de rádio.

De fato, uma questão que surgiu é se há espaços nas bandas de espectro licenciadas para serem explorados e acomodar dispositivos sem fio sem licença (também chamados de dispositivos secundários) sem interromper as comunicações dos usuários primários (licenciados) do espectro. Dentro desse âmbito nasceu a ideia de Rádio Cognitivo (CR).

O rádio cognitivo (Mitola (2000, 1999)) foi proposto como um meio para promover o uso eficiente do espectro, permitindo que outros usuários secundários tenham acesso a bandas de frequência já alocadas aos usuários principais, enquanto estes não as estão utilizando. As redes CR são projetadas para fornecer grande largura de banda para usuários móveis através de arquiteturas sem fio heterogêneas e técnicas dinâmicas de acesso ao espectro. Esses dispositivos utilizam novas técnicas de alocação de espectro e avançada tecnologia de processamento de sinal e rádio para garantir que novos usuários sem fio operem no espectro atual sem degradar o desempenho de usuários licenciados (Haykin (2005)).

Para entendermos melhor como o rádio cognitivo pode funcionar precisamos entender alguns conceitos fundamentais, como: furo espectral, temperatura de interferência e oportunidade de espectro. Estes tópicos serão descritos brevemente a seguir.

## 3.2 Fundamentos do Rádio Cognitivo

### 3.2.1 Furo Espectral

Como mostram os estudos de (FCC (2002); Kolodzy (2001); Group (2003); McHenry (2003); NeT (2003)), observando passivamente o ambiente de rádio e, assim, estimando os espectros de potência dos estímulos de rádio frequência recebidos, temos três faixas de frequências bem definidas: uma porção do espectro que é desocupada a maior parte do tempo; alguma outra porção do espectro que é apenas parcialmente ocupada e a porção restante que é muito utilizada. Esse comportamento pode ser observado mesmo em um ambiente rico de dispositivos móveis. Dessa forma, podemos classificar os espectros de

rádio em três tipos amplamente definidos, conforme resumido a seguir (Haykin (2005)):

- 1) Espaços negros, que são ocupados por interferentes "locais" de alta potência o tempo todo.
- 2) Espaços cinzas, que são parcialmente ocupados por interferentes de baixa potência.
- 3) Espaços brancos, que são livres de interferências de rádio-frequência, exceto pelo ruído ambiente, constituído por formas naturais e artificiais de ruído, a saber:
  - ruído térmico de banda larga produzido por fenômenos físicos externos, como a radiação solar;
  - reflexões transitórias de iluminação, luzes de plasma (fluorescentes) e aeronaves;
  - ruído impulsivo produzido por ignições, comutadores e aparelhos de microondas;
  - ruído térmico devido a flutuações espontâneas internas de elétrons na parte frontal de receptores individuais.

Diante das análises citadas acima, é possível verificar que algumas faixas de frequência são subutilizadas, o que leva ao termo conhecido como furo de espectro, cuja definição é (Kolodzy (2001)):

*"Um furo de espectro é uma faixa de frequências atribuída a um usuário primário, mas, em um determinado momento e local geográfico específico, a banda não está sendo utilizada por esse usuário."*

Para mitigar o efeito da subutilização de certas faixas de frequências, pode-se permitir a um usuário secundário, que não esteja sendo atendido, em determinado local e tempo, acessar um furo de espectro desocupado por um usuário primário. O rádio cognitivo tem esse objetivo de explorar a existência de furos espectrais, melhorando significativamente a utilização da banda disponível. Os usuários não licenciados podem sempre utilizar o que denominamos espaços brancos, e de maneira controlada, os espaços cinzas. Os espaços negros não devem ser utilizados quando usuários licenciados estiverem ligados. No entanto, quando os dispositivos primários são desligados, os espaços negros assumem o novo papel de "furos de espectro". O rádio cognitivo deve permitir o compartilhamento de espectro através de sua capacidade dinâmica em gerenciar esses "espaços brancos" (Haykin (2005)).

### 3.2.2 Temperatura de Interferência

Na abordagem tradicional, o ambiente de rádio é centrado no transmissor, de forma que a energia transmitida é projetada para se aproximar de um piso de ruído prescrito a uma certa distância do transmissor. Diferente da abordagem tradicional, a FCC recomendou em (FCC (2002)) um deslocamento das operações no ambiente de rádio centradas no transmissor para interações em tempo real entre o transmissor e o receptor de forma adaptativa, ocasionando mudanças de paradigmas na avaliação de interferências. A ideia da FCC foi criar uma métrica denominada temperatura de interferência, que se

destina a quantificar e gerenciar as fontes de interferência em um ambiente de rádio.

A temperatura de interferência é uma medida da potência de radiofrequência disponível em uma antena de recepção para ser entregue a um receptor refletindo a energia gerada por outros transmissores e fontes de ruído. Ou seja, é a potência de radiofrequência medida em uma antena receptora por unidade de largura de banda (Wang and Liu (2011); Xing *et al.* (2007)). Além disso, a FCC especificou um limite de temperatura de interferência que fornece a quantidade máxima de interferência tolerável em uma determinada faixa de frequência em uma localização geográfica particular. Esse limite de interferência caracteriza o pior caso do ambiente de rádio em que um receptor pode funcionar de forma satisfatória (Haykin (2005)). Qualquer transmissor secundário que utilize uma determinada banda licenciada deve garantir que sua transmissão mais o ruído e as interferências existentes não excedam o limite de temperatura de interferência de um receptor licenciado de forma que qualquer transmissão naquela banda é considerada prejudicial se aumentar o piso do ruído acima do limiar de temperatura de interferência.

Segundo (Haykin (2005)), destacam-se dois benefícios principais com o conceito de temperatura de interferência:

- 1) Como já mencionado, a temperatura de interferência em uma antena de recepção fornece uma medida precisa para o nível aceitável de interferência na faixa de frequência de interesse, sendo considerada prejudicial qualquer transmissão acima do limite.
- 2) Dada uma banda específica, em que a temperatura de interferência não é excedida, essa banda pode ser disponibilizada para usuários não licenciados. O limite de interferência serve como uma tampa colocada sobre um potencial de energia de radiofrequência, que poderia aparecer naquela faixa de frequência.

Utilizando esses conceitos, torna-se possível que um dispositivo secundário possa tentar coexistir com um primário, de modo que a presença desse dispositivo secundário passe despercebida.

Essa restrição de temperatura de interferência pode ser definida através de pelo menos dois parâmetros, de forma implícita ou explícita: o nível máximo de energia de interferência ( $I_p$ ), percebido por um receptor primário ativo; e a probabilidade máxima de que o nível de interferência em um receptor ativo pode exceder  $I_p$ . A interferência abaixo de  $I_p$  não afeta os usuários primários, enquanto que a interferência acima de  $I_p$  resulta em colisão. Esses parâmetros podem ser estabelecidos por um órgão regulador para uma banda de frequência específica, e os transmissores secundários devem conhecer a restrição do nível do nó para escolher a potência de transmissão e tomar decisões de acesso, mantendo a interferência média abaixo do limiar para não afetar os usuários primários. A definição de uma restrição do nível de interferência de uma rede, para um determinado nó, depende da localização geográfica, do tráfego dos usuários secundários, bem como do modelo de atenuação do sinal no ambiente de comunicação como sombreamento e desvanecimento (Zhao and Sadler (2007)).

### 3.2.3 Oportunidade de Espectro

Intuitivamente, um canal pode ser considerado uma oportunidade de espectro se não for usado atualmente pelos usuários primários. De forma mais ampla, em uma rede com transmissores e receptores primários geograficamente distribuídos, o conceito de oportunidade de espectro vai mais além. Considerando um par de usuários secundários, transmissor e receptor pretendido, podemos identificar as condições para que um canal seja considerado uma oportunidade. Se transmissor e receptor podem se comunicar com êxito através de um canal, limitando a interferência aos usuários primários abaixo de um nível prescrito determinado por alguma política de regulamentação, esse canal é considerado oportunidade de espectro. Ou seja, o receptor secundário não terá sua comunicação comprometida pelos transmissores primários, nem o transmissor secundário afetará os receptores primários.

Podemos destacar algumas observações sobre a oportunidade de espectro (Zhao and Sadler (2007)):

- Oportunidade de espectro é um conceito local definido em relação a um determinado par de usuários secundários. Depende da localização não apenas do transmissor secundário, mas também do receptor secundário.
- A oportunidade de espectro é determinada pelas atividades de comunicação dos usuários primários e não dos usuários secundários. As comunicações com falhas causadas por colisões entre os usuários secundários não desqualificam que um canal seja uma oportunidade.

## 3.3 Rádio Cognitivo

O desenvolvimento de rádio cognitivo ainda está em processo de construção e estudo para a próxima geração de redes, quando comparado ao rádio convencional, que remonta ao século XVIII, ano de 1901, com o trabalho de Guglielmo Marconi. Um dos trabalhos pioneiros onde o termo rádio cognitivo surgiu foi o de Joseph Mitola, em sua dissertação de doutorado apresentada em maio de 2000, no Royal Institute of Technology, na Suécia (Mitola (2000)). A sua dissertação mostra uma visão conceitual em que descreve como um rádio cognitivo poderia aumentar a flexibilidade dos serviços sem fio pessoais.

O rádio cognitivo é um sistema de comunicação que tem dois objetivos principais: comunicação altamente confiável em qualquer lugar e a qualquer tempo; e utilização eficiente do espectro de rádio. Para alcançar esses objetivos, o rádio cognitivo conhece o meio em que está inserido atuando de forma inteligente e utilizando tecnologias que permitam o aprendizado do ambiente circundante e a adaptabilidade de seus estados internos a partir de estatísticas concebidas através de estímulos de rádio-frequência recebidos e fazendo as alterações necessárias em determinados parâmetros, como por exemplo:

potência de transmissão, frequência de portadoras, estratégias de modulação, etc., para operar corretamente em tempo real (Haykin (2005)).

O ambiente de rádio cognitivo é naturalmente variável no tempo, mas apresenta um conjunto de características que se destacam: adaptabilidade, conscientização, inteligência, aprendizagem, cooperação, competição, exploração, confiabilidade e eficiência.

Esse conjunto de características pode ser implementado de forma viável nos dias de hoje, graças aos espetaculares avanços no processamento de sinais digitais, redes, aprendizado de máquina, *softwares* de computador e *hardwares*.

Esse novo paradigma foi proposto como um meio de mitigar a escassez do espectro utilizando uma tecnologia de compartilhamento oportunístico, uma vez que é capaz de detectar o espectro e adaptar seu uso de acordo. Esse compartilhamento de espectro deve ser realizado de forma controlada, causando danos mínimos para o usuário primário, de forma que a operação na faixa de frequência do licenciado primário não seja comprometida. Dentro do ambiente cognitivo, um usuário não licenciado que explora a oportunidade de transmissão, deve maximizar seu próprio desempenho sem interferir na qualidade de recepção de usuários licenciados. Para este fim, a potência de interferência total no receptor licenciado deve estar abaixo de um determinado limite. Este conceito que indica o nível de interferência tolerável de recepção no usuário primário é denominado temperatura de interferência e é determinante para a utilização de rádio cognitivo, fazendo com que o acesso secundário não afete a operação do licenciado primário (Mishra, Sahai, and Brodersen (2006)). Portanto, a energia emitida por um transmissor secundário não precisa ser limitada, desde que a interferência infligida no receptor primário esteja abaixo do limite (Ghasemi and Sousa (2007)).

### 3.3.1 Características do Rádio Cognitivo

A tecnologia de rádio cognitivo proporciona a capacidade de compartilhar o espectro de maneira oportunística, portanto é um sistema promissor para as futuras comunicações que podem utilizar os recursos de redes limitados de uma forma mais eficiente e inteligente. Os terminais cognitivos são diferentes dos terminais tradicionais, uma vez que podem alterar seus parâmetros operacionais, como por exemplo: a potência de transmissão, a frequência, o tipo de modulação, etc., com base na interação com o ambiente em que está inserido. Diante dessa definição, podemos determinar duas características do rádio cognitivo: a capacidade cognitiva e a reconfigurabilidade. Para que os terminais cognitivos adaptem seus parâmetros operacionais eles precisam obter as informações necessárias do ambiente de rádio. A capacidade cognitiva permite que os terminais cognitivos sejam conscientes da forma de onda transmitida, do espectro de rádio, do tipo/protocolo da rede de comunicação, da informação geográfica, dos recursos e serviços disponíveis localmente, das necessidades dos usuários, da política de segurança e

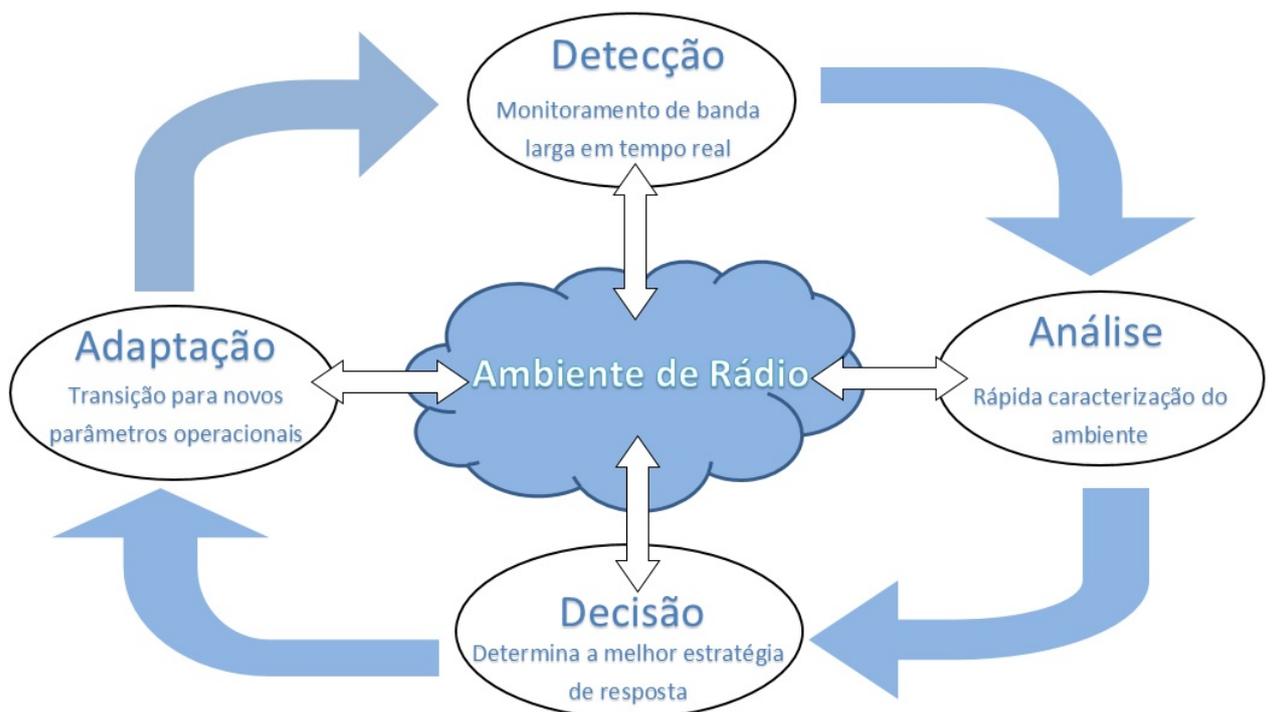
assim por diante. De posse das informações detectadas do ambiente de rádio, os terminais cognitivos podem alterar dinamicamente seus parâmetros de transmissão para alcançar um desempenho ideal, e isso caracteriza a capacidade de reconfigurabilidade do rádio cognitivo (Wang and Liu (2011); Akyildiz *et al.* (2008)).

### 3.3.2 Funções do Rádio Cognitivo

Um sistema de rádio cognitivo inclui algumas funções específicas que devem ser modeladas para que ele funcione corretamente. Um ciclo cognitivo pode ter as seguintes funções (ver Figura 3.2) (Wang and Liu (2011)):

- Detecção e análise do espectro;
- Gerenciamento do espectro;
- Alocação e compartilhamento de espectro.

Figura 3.2 – Ciclo Cognitivo.



Na detecção e análise do espectro um terminal cognitivo detecta espaço em branco selecionando a melhor oportunidade de transmissão. Na detecção, o rádio cognitivo também pode detectar atividades de usuários primários de modo que nenhuma interferência prejudicial é gerada. Depois do reconhecimento da oportunidade de espectro, no gerenciamento do espectro os rádios cognitivos podem escolher a melhor forma de transmissão de acordo com as características do ambiente para atender os vários requisitos da qualidade de serviço. No acesso ao espectro dinâmico, um usuário secundário pode compartilhar os recursos do espectro com usuários primários, outros usuários secundários

ou ambos. Então, uma boa alocação de espectro e um mecanismo de compartilhamento é uma função crítica para alcançar a alta eficiência espectral. Como os usuários secundários coexistem com usuários primários dentro de uma banda licenciada, o nível de interferência devido ao uso do espectro secundário deve ser limitado por um determinado limite, já que os usuários primários possuem o direito do espectro. Quando vários usuários secundários compartilham uma faixa de frequência o acesso deve ser coordenado para evitar colisões e aliviar interferências.

### 3.3.3 Arquitetura de Redes Rádio Cognitivas

A arquitetura das redes rádio cognitivas é composta por dois grupos básicos: uma rede secundária e uma rede primária. A rede primária é composta por um conjunto de usuários primários e é referenciada como a rede licenciada em que seus usuários têm a licença para operar em uma faixa de espectro definida. As redes primárias podem também ser controladas através de estações base primárias. Como essas redes têm prioridade de acesso, sua transmissão não pode ser interferida pelas redes secundárias. Usuários primários e estações base primárias podem ou não estar equipados com funções cognitivas. A rede secundária é composta por um conjunto de usuários secundários, com ou sem estações base secundárias. Essa rede é referenciada como rede não licenciada, pois não possui uma licença para operar em uma faixa de frequência determinada. Os usuários secundários compartilham a faixa de frequência licenciada com os usuários primários de forma oportunística. Esse acesso oportunístico ao espectro pode ser coordenado por uma estação base secundária com funções cognitivas. Finalmente, se várias redes secundárias compartilham uma banda de espectro comum, as redes de rádio cognitivo podem incluir corretores de espectro, que desempenham um papel de distribuição e coordenação dos recursos de espectro entre diferentes redes de rádio cognitivo (Wang and Liu (2011); Akyildiz *et al.* (2008)).

## 3.4 Modelos de Rádio Cognitivo

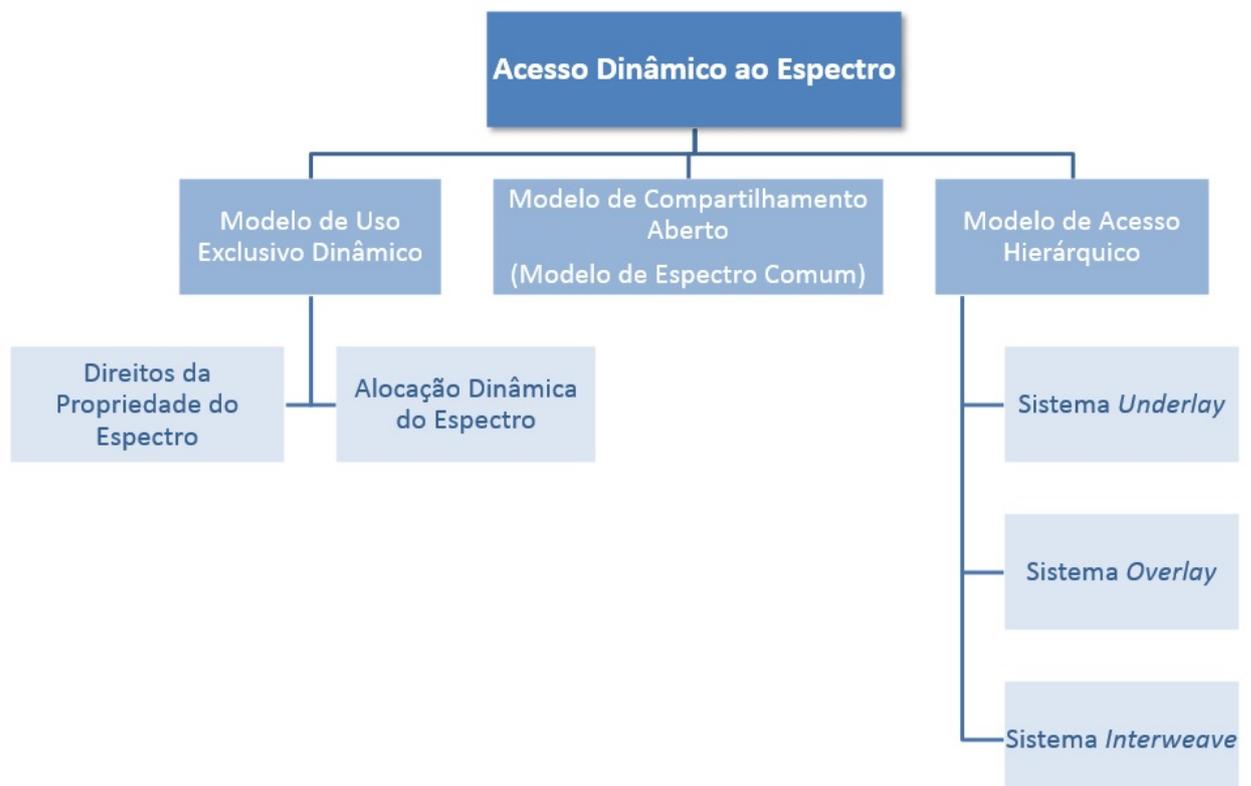
Como já mencionado, rádio cognitivo foi introduzido em 1999 por Mitola (Mitola (1999)), e de lá até os dias atuais a definição de rádio cognitivo evoluiu para tornar o rádio mais capaz e mais poderoso. Nos dias de hoje, existem diferentes interpretações para rádio cognitivo e diferentes visões para o seu futuro. Nesta sessão, serão descritos alguns paradigmas de comunicação que foram descritos para o rádio cognitivo.

Antes de falarmos sobre os diferentes modelos de rádio cognitivo, mencionaremos as estratégias de acesso dinâmicas ao espectro, nas quais o rádio cognitivo está inserido, que visam mitigar os efeitos da escassez de espectro. Essas estratégias dinâmicas podem ser amplamente categorizadas em três modelos (ver Figura 3.3) (Zhao and Sadler

(2007)):

- 1) **Modelo de uso exclusivo dinâmico:** neste modelo, a estrutura básica da atual política de regulamentação do espectro é mantida, ou seja, as faixas de frequência são licenciadas para serviços de uso exclusivo. Neste caso, temos duas abordagens diferentes. Uma denominada **direitos da propriedade do espectro**, que permite que os licenciados vendam ou comercializem o espectro e escolham a tecnologia correspondente. A outra, denominada **alocação dinâmica do espectro**, que foi trazida pelo projeto europeu Drive (Xu *et al.* (2000)), em que as estatísticas do tráfego espacial e temporal de diferentes serviços são exploradas para melhorar a eficiência do espectro. Na primeira abordagem, a eficiência do espectro é determinada pela economia e pelo mercado para tornar o recurso limitado mais lucrativo. Nessa abordagem, os licenciados tem o direito de alugar ou compartilhar o espectro com fins lucrativos, mas não necessariamente é exigida pela política de regulamentação que os façam. Na segunda abordagem, o espectro é alocado para serviços de uso exclusivo em uma escala muito mais rápida do que a política atual, em determinada região e em um determinado momento. Essas duas abordagens do modelo de uso exclusivo, não conseguem eliminar os espaços brancos do espectro resultantes da natureza intermitente do tráfego sem fio.
- 2) **Modelo de compartilhamento aberto:** também denominado como **modelo de espectro comum**, refere-se as bandas de espectro que os usuários secundários estão usando. Os usuários secundários empregam o compartilhamento aberto em uma deter-

Figura 3.3 – Uma taxonomia do Acesso Dinâmico ao Espectro.



minada região espectral não licenciada. Um exemplo é o compartilhamento de espectro aberto na Banda Industrial Científica e Médica. Nessa estratégia, uma vez que nenhum usuário possui licença de espectro, todos eles possuem os mesmos direitos em usar o espectro não licenciado.

- 3) **Modelo de acesso hierárquico:** o compartilhamento de espectro entre usuários secundários e primários dentro de faixas de frequências licenciadas é denominado **modelo de acesso hierárquico**, ou **compartilhamento de espectro licenciado**. A ideia é adotar uma estrutura de acesso hierárquico para usuários primários e secundários, em que esses últimos acessem o espectro licenciado ao mesmo tempo que limitam a interferência percebida pelos usuários primários. Os usuários primários geralmente não são equipados com rádio cognitivo, pois tem prioridade no uso da banda do espectro. Sempre que o uso do espectro é reivindicado pelos usuários licenciados, os usuários secundários devem reajustar seus parâmetros operacionais, como energia, frequência e largura de banda, para evitar a interrupção dos usuários primários. Ao consideramos o acesso dos usuários secundários, este modelo pode ser dividido em três categorias: sobreposição do espectro, subjacência de espectro e entrelaçamento de espectro.

A ideia de rádio cognitivo pertence ao terceiro modelo de estratégia dinâmica de acesso ao espectro. Em um sentido amplo, o termo radio cognitivo refere-se a várias soluções para o problema de escassez de espectro que procuram sobrepor (*overlay*), subjugar (*underlay*) ou entrelaçar (*interweave*) os sinais do usuário secundário com os usuários primários de tal forma que as transmissões dos usuários primários do espectro sejam tão inalteradas quanto possível (Srinivasa and Jafar (2007)).

Existem três principais paradigmas de redes de rádio cognitivas: *underlay* (subjacente), *overlay* (sobreposição) e *interweave* (entrelaçamento). O paradigma *underlay* permite a operação de usuários cognitivos se a interferência causada a usuários não cognitivos estiver abaixo de um determinado limite. Em sistemas *overlay*, os rádios cognitivos usam processamento e codificação de sinal sofisticados para manter ou melhorar a comunicação de rádios não cognitivos, ao mesmo tempo em que obtém uma largura de banda adicional para sua própria comunicação. Finalmente, no paradigma *interweave* os rádios cognitivos aproveitam oportunisticamente os furos do espectro para se comunicar sem interromper outras transmissões. A seguir descreveremos em maiores detalhes cada um cada um desses três paradigmas.

### 3.4.1 Sistemas *Underlay*

Os sistemas *Underlay* englobam técnicas que permitem a comunicação através de rádio cognitivo assumindo que se tem conhecimento da interferência causada pelo seu transmissor para os receptores de todos os usuários não cognitivos. Nesse paradigma, os rádios não licenciados coexistem na mesma banda com licenciados primários, ou seja,

os usuários secundários podem transmitir seus dados na faixa de frequência licenciada quando os usuários primários também estão transmitindo, para isso são regulados para causar interferência abaixo dos limites prescritos (Zhao and Swami (2007)).

As transmissões simultâneas dos usuários primários e secundários ocorrem na forma de sistemas de Banda Ultra Larga (do inglês, *Ultra-wide-band* (UWB)) com restrições severas de potência. Ao espalhar os sinais transmitidos através de uma ampla faixa de frequência UWB, os usuários secundários podem potencialmente obter uma taxa de dados elevada de curto alcance com potência de transmissão extremamente baixa. Nesse caso, o modelo de temperatura de interferência é imposto à potência de transmissão secundária para que a interferência no receptor de um usuário primário esteja dentro do limite de temperatura de interferência e os usuários primários podem entregar seus pacotes ao receptor com sucesso. Devido à limitação de potência, os usuários secundários adotam técnicas de compartilhamento de espectro que utilizam ampla largura de banda, sobre o qual o sinal secundário pode ser espalhado e desdobrado para fornecer uma relação SNR útil para as comunicações secundárias. E dessa forma, só podem alcançar uma comunicação de curto alcance. Para o pior caso, em que os usuários primários transmitem o tempo todo em um modo constante, essa abordagem não irá depender da detecção e exploração para encontrar uma banda de espectro disponível (Wang and Liu (2011); Srinivasa and Jafar (2007); Zhao and Sadler (2007)).

A vantagem dos sistemas *Underlay* é que eles não precisam sentir o canal para perceber transmissões de usuários primários, ou seja, pode-se ter rádios "burros". O princípio dos sistemas *Underlay* é que os usuários primários são suficientemente de banda estreita, ou de alta potência, ou os rádios *underlay* são suficientemente rápidos em salto de frequência, utilizando largura de banda estreita em cada salto, de modo que há pouca interferência dos rádios *underlay* (Zhao and Sadler (2007)).

### 3.4.2 Sistemas *Overlay*

O segundo modelo de rádio cognitivo são os Sistemas *Overlay*, que foram inicialmente imaginados por Mitola em (Mitola (1999)) sob o termo agrupamento de espectro. Nesse modelo, também conhecido como acesso oportunista ao espectro, são permitidas transmissões primárias e secundárias simultâneas, assim como no modelo *Underlay*. Mas diferentes deste, essa abordagem não impõe necessariamente restrições severas de potência de transmissão aos usuários secundários, mas sim quando e onde eles podem transmitir. Neste caso, a ideia é utilizar os espaços brancos do espectro espacialmente ou temporalmente, permitindo que os usuários secundários identifiquem e explorem a disponibilidade local e instantânea do espectro de forma não intrusiva. Ou seja, os sistemas podem ser aplicados no domínio temporal ou espacial. No domínio do tempo os usuários secundários exploram espaços brancos do espectro de forma temporal, que resultam do grande tráfego

dos usuários primários. No domínio espacial as bandas de frequência que não são usadas por usuários primários em determinada localização geográfica, são utilizadas pelos usuários secundários (Zhao and Sadler (2007); Zhao and Swami (2007)). Um exemplo de aplicação do modelo *overlay* é a reutilização de certas bandas de TV que não são usadas para transmissão de TV em uma região específica. Nos sistemas de transmissão de TV, bandas de TV atribuídas à regiões adjacentes são diferentes para evitar interferência de co-localização. Isso resulta em bandas de frequência não utilizadas que variam em relação ao espaço.

Considerando um sistema de comunicação com um transmissor primário em comunicação com um receptor primário, um transmissor secundário em comunicação com um receptor secundário, todos sob a mesma faixa de frequência, no modelo *overlay*, supõe-se que a transmissão do usuário primário (mensagem primária) é conhecida pelo transmissor secundário, além dos ganhos dos canais serem conhecidos por todos os nós da rede. Nesse cenário, o transmissor secundário poderá adotar duas estratégias:

- 1) Na primeira estratégia o transmissor secundário usa o conhecimento da mensagem primária para anular a interferência no receptor secundário utilizando alguma técnica de codificação. Dessa forma, o usuário secundário utiliza toda a energia disponível para enviar sua própria mensagem ao receptor secundário. Para o receptor secundário, a existência do usuário primário é desconhecida. Essa abordagem viola o princípio do rádio cognitivo de proteger o usuário primário, mas fornece um limite superior teórico sobre o rendimento máximo alcançado pelo usuário secundário.
- 2) Na segunda estratégia, a energia disponível é dividida, sendo parte para retransmitir a mensagem do usuário primário para o receptor primário, e parte para transmitir a mensagem do usuário secundário. A divisão da energia é calculada para que a SNR no receptor primário permaneça a mesma com ou sem a presença do usuário secundário. O receptor primário é inconsciente da presença do usuário secundário. Como a mensagem do usuário primário é conhecida pelo transmissor secundário, uma codificação é utilizada na mensagem secundária para eliminar a interferência no receptor secundário (Srinivasa and Jafar (2007)).

Sem violar o princípio de rádio cognitivo, a ideia para utilização de Sistemas *Overlay* é que os usuários secundários possam utilizar parte de sua energia para a própria comunicação e o restante da energia para auxiliar as transmissões primárias, fazendo retransmissão. Para isso, o transmissor cognitivo deve possuir o conhecimento das palavras-código e das mensagens dos usuários não cognitivos. A informação das palavras-código podem ser obtidas, por exemplo, de duas maneiras: se os usuários primários seguem um padrão uniforme para a comunicação com a base em uma palavra-código divulgada, ou se os usuários primários transmitem suas palavras-código periodicamente. Já a informação da mensagem primária pode ser obtida através da retransmissão da mensagem, onde o usuário cognitivo ouve a primeira transmissão e a decodifica, ou simplesmente através da

transmissão direta do usuário não cognitivo para o cognitivo. O conhecimento desses dois parâmetros pode ser explorado para mitigar ou cancelar completamente a interferência experimentada nos receptores primários e secundários. Os usuários secundários também podem utilizar essa informação e utilizar parte de sua potência para transmitir sua própria mensagem e o restante para retransmitir as transmissões não cognitivas (Goldsmith *et al.* (2009)).

Escolhendo cuidadosamente a divisão de energia, o aumento da SNR do receptor primário devido à assistência da retransmissão cognitiva é exatamente compensado pela diminuição da SNR do receptor primário devido à interferência causada pelo restante da energia de transmissão secundária que é usada para sua própria comunicação. Isso garante que a taxa do usuário não cognitivo permaneça inalterada, enquanto que o usuário cognitivo atribua parte de sua potência para suas próprias transmissões (Goldsmith *et al.* (2009); Srinivasa and Jafar (2007)).

O paradigma *overlay* pode operar tanto em bandas licenciadas, quando em não licenciadas. Nas faixas sem licença, os usuários secundários conseguiriam a maior eficiência espectral através do conhecimento da mensagem e das palavras códigos para reduzir a interferência. Nas faixas licenciadas, os usuários secundários compartilham a banda com usuários primários uma vez que não interfeririam, nem melhorariam, suas comunicações (Goldsmith *et al.* (2009)).

### 3.4.3 Sistemas *Interweave*

O paradigma *interweave* foi a motivação original para o rádio cognitivo e baseia-se na ideia de comunicação oportunística. Como já mencionado anteriormente, grande parte do espectro não é utilizada a maior parte do tempo, dando origem ao que denominamos furos de espectro. Dessa forma, a utilização do espectro é melhorada através de reuso de frequência oportunista sobre os vazios de espectro (Srinivasa and Jafar (2007)).

Segundo (Goldsmith *et al.* (2009)), um rádio cognitivo *interweave* é um sistema de comunicação sem fio inteligente que monitora periodicamente o espectro de rádio, detecta de forma inteligente a ocupação nas diferentes partes do espectro e, depois se comunica oportunisticamente utilizando os furos de espectro causando interferência mínima nos usuários primários ativos.

A Figura 3.4 resume as principais características e diferenças entre os três paradigmas. As abordagens *Overlay* e *Underlay* permitem a comunicação cognitiva e não-cognitiva simultaneamente, enquanto que na abordagem *Interweave* as transmissões simultâneas com usuários não-cognitivos e cognitivos são evitadas. Outras diferenças destas técnicas é com relação à quantidade de informação necessária: nos Sistemas *Underlay* é necessário o conhecimento da interferência causada pelo transmissor secundário no receptor primário; nos Sistemas *Interweave* é necessário as informações sobre as atividades

Figura 3.4 – Comparação das Técnicas de Rádio Cognitiva *Underlay*, *Overlay* e *Interweave*. Tradução livre de (Goldsmith *et al.* (2009)).

<i>Underlay</i>	<i>Overlay</i>	<i>Interweave</i>
Informação do Estado do Canal: o transmissor cognitivo (secundário) conhece as informações do canal do(s) receptor(es) não cognitivo(s).	Informação da Palavra-Código: Os nós cognitivos conhecem os ganhos do canal, as palavras-códigos e as mensagens dos usuários não-cognitivos.	Informação da Atividade Primária: os usuários cognitivos conhecem os furos espectrais no espaço, tempo, ou frequência, quando o usuário não-cognitivo não está usando estes furos.
O usuário cognitivo pode transmitir simultaneamente com o usuário não-cognitivo enquanto a interferência for inferior a um limite aceitável.	O usuário cognitivo pode transmitir simultaneamente com o usuário não-cognitivo; A interferência do usuário não cognitivo pode ser utilizada para usar parte da potência do usuário cognitivo para retransmitir a mensagem do usuário não cognitivo.	O usuário cognitivo transmite simultaneamente com o usuário não cognitivo somente no caso de uma falsa detecção de furo espectral.
A potência de transmissão dos usuários cognitivos é limitada por uma restrição de interferência.	O usuário cognitivo pode transmitir em qualquer potência e a interferência do usuário não cognitivo pode ser utilizada para retransmitir a mensagem do usuário não cognitivo.	A potência de transmissão do usuário cognitivo é limitada dentro da faixa de detecção de furo espectral.

de usuários primários ativos; e nos Sistemas *Overlay* é necessário o conhecimento das palavras-código e possivelmente da mensagem primária. Outra diferença é com relação aos níveis de potência dos dispositivos. A potência transmitida dos usuários cognitivos em *Underlay* e *Interweave* é determinada pela restrição de interferência e alcance de detecção.

Essas três redes de rádio cognitivas (*Underlay*, *Overlay* e *Interweave*) são paradigmas distintos, mas que podem ser combinados em esquemas híbridos para agregar as vantagens das diferentes abordagens (Goldsmith *et al.* (2009)). E em comparação com o uso exclusivo dinâmico e os modelos de compartilhamento aberto, os modelos hierárquicos são, talvez, os mais compatíveis com as políticas atuais de gerenciamento de espectro e os sistemas sem fio legados.

### 3.5 Aplicações de Rádio Cognitivo

As redes rádio cognitivas podem ser empregadas em várias situações, como para comunicações militares, para melhorar a segurança pública e a segurança interna e para tecnologias sem fio comerciais, por exemplo.

No modelo tradicional, a atribuição de frequências de forma estática determina de forma fixa o espectro de rádio em aplicações improdutivas. Assim uma grande quantidade de espectro pode estar ociosa causando a escassez do espectro radioelétrico para outras aplicações importantes. Esse problema limita, por exemplo, a capacidade das comunicações militares. Com o uso de rádio cognitivo os efeitos da escassez de espectro podem ser mitigados, através da alocação eficiente de largura de banda e do acesso flexível ao espectro, fornecendo comunicações militares transparentes, seguras e com maiores capacidades.

Em situações de emergência, como desastres naturais e ataques terroristas, as redes de comunicação existentes podem ficar inoperantes, sendo necessária uma rede de emergência para ajudar em situações de busca e resgate. Nesse caso, a rede rádio cognitiva pode ser implementada. Essas redes são capazes de detectar a disponibilidade de espectro e reconfigurar suas próprias características para uma comunicação mais eficiente, permitindo aos agentes de segurança pública uma comunicação de banda larga confiável que minimize os atrasos nas informações. Outra característica do rádio cognitivo é facilitar a interoperabilidade entre os sistemas de comunicação. Pela capacidade cognitiva de adaptação e reconfigurabilidade, os rádios cognitivos podem suportar vários tipos de serviços, como voz, dados, vídeo, etc., e assim atuar em situações de emergência.

Outra aplicação de rádio cognitivo são as tecnologias sem fio comerciais emergentes. Os terminais cognitivos são sistemas inteligentes que conseguem determinar os canais disponíveis para a comunicação e transmitir em um canal desocupado. Essa característica fornece largura de banda adicional e versatilidade para aplicações de dados em rápido crescimento. Dessa forma, as redes cognitivas são promissoras para tecnologias sem fio comerciais emergentes.

Além disso, pela sua capacidade de adaptabilidade e reconfigurabilidade, quando as mudanças de frequência são necessárias devido a conflitos ou interferências, o *software* de gerenciamento de frequência de rádios cognitivos mudará a frequência de operação automaticamente mesmo sem intervenção humana. Ainda mais, o *software* de rádio pode alterar a largura de banda do serviço remotamente para acomodar novas aplicações e as atualizações do produto ou as alterações de configuração podem ser completadas simplesmente baixando o *software* de gerenciamento de rádio recém-lançado. Portanto, o rádio cognitivo é considerado uma tecnologia chave para futuros serviços móveis sem fio em qualquer lugar, a qualquer momento e com qualquer dispositivo.

### 3.6 Rádios Cognitivos e Redes Cooperativas

O espectro de rádio é um recurso limitado e valioso que é regulamentado pelos governos. Como já mencionado, alguns estudos mostram o uso desequilibrado deste recurso, em que uma pequena porção é utilizada em grande escala e a porção restante alocada está subutilizada. O rádio cognitivo surgiu como um novo paradigma dentro das comunicações sem fio que promete melhorar a utilização do recurso espectral limitado. A utilização eficiente do espectro pode ser conseguida permitindo a coexistência de usuários licenciados primariamente e usuários secundários não licenciados dentro do mesmo espectro de frequência. Os usuários primários têm acesso privilegiado ao canal comum e podem descartá-lo de acordo com as necessidades de tráfego e qualidade de serviço, limitados apenas pelas interfaces e regulamentos de rádio disponíveis (Simeone *et al.* (2007); Zhang, Jia, and Zhang (2009)). Neste cenário, os usuários secundários podem se comunicar utilizando a banda licenciada, desde que os usuários primários sejam inconscientes da sua presença, comportando-se como se tivessem acesso exclusivo ao espectro (Lee *et al.* (2011)).

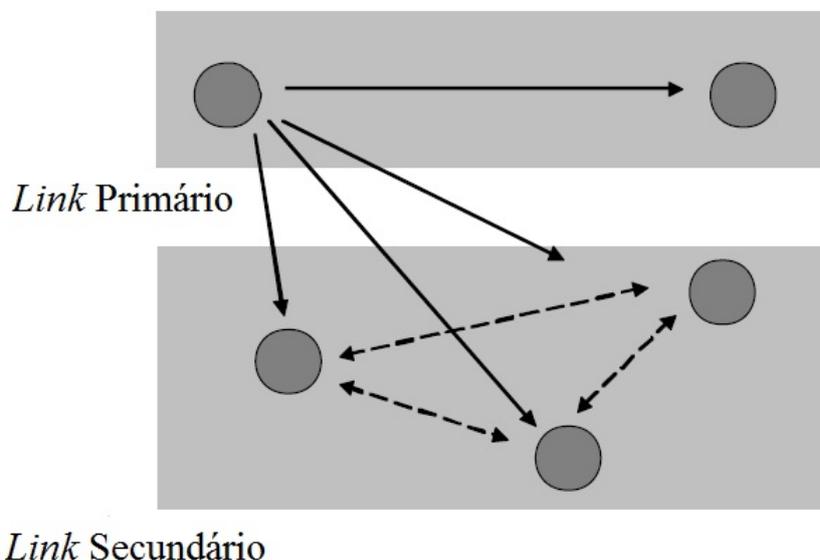
Os principais desafios para o desenvolvimento eficiente de redes rádio cognitivas incluem a detecção de usuários primários e a exploração de oportunidades de transmissão. Os usuários secundários precisam monitorar constantemente o espectro disponível para poder detectar furos do espectro e identificar oportunidades de transmissão. Uma maneira típica de abordar o problema é procurar transmissões primárias usando um detector de sinal. Uma vez que foram identificadas oportunidades de transmissão, há dois objetivos a serem alcançados: os usuários secundários devem fazer sua atividade transparente para os usuários primários (de acordo com um critério definido para a transparência, como manter o nível de interferência abaixo de um determinado limite) e também maximizar seu próprio desempenho em termos do indicador de qualidade de serviço desejado (por exemplo, taxa, atraso, etc.) (Simeone *et al.* (2007)).

Os desafios citados podem ser superados e as implementações práticas do rádio cognitivo podem se beneficiar enormemente com o uso de cooperação entre os diferentes terminais. Assim, a cooperação tem se tornado uma tecnologia chave para ser abordada juntamente com rádio cognitivo. O uso da cooperação em tecnologia sem fio tem sido amplamente estudado, especialmente no que diz respeito à obtenção de ganhos de diversidade e redução de probabilidades de *outage* através da cooperação de usuários móveis.

Uma das primeiras alternativas de utilização de cooperação em rádios cognitivos foi para a exploração da atividade primária através da detecção cooperativa. Os sistemas cognitivos exploram de forma oportunista o canal de comunicação, então devem ser capazes de detectar o espectro e adaptar seu uso de acordo, causando danos mínimos aos usuários primários. A detecção do espectro de forma confiável é uma tarefa desafiadora. Um usuário secundário pode sofrer com os efeitos do multipercorso

e sombreamento em relação ao transmissor primário. Dessa forma, o nível de energia percebido em determinada banda pode não ser confiável e um rádio cognitivo não pode assumir que um usuário primário não está presente naquela banda. Outra questão é que suas próprias transmissões podem interferir com um receptor primário se ele decidir transmitir. Levando em consideração possíveis perdas por multipercursos, sombreamento e penetração nas construções, o usuário secundário deve ser significativamente mais sensível na detecção do que o usuário primário. A fim de melhorar o desempenho dos detectores primários (transmissor), uma solução natural capaz de lidar com diferentes condições de sombreamento e desvanecimento é a cooperação. Como a cooperação fornece múltiplas realizações independentes de variáveis aleatórias relacionadas, a probabilidade de que todos os usuários experimentem desvanecimento profundo é extremamente baixa. A solução por traz da cooperação é o emprego de uma detecção distribuída nos nós secundários: cada nó mede (por exemplo, através de um detector de energia) o sinal local recebido, então os sinais locais são trocados (possivelmente para um ponto de decisão central) e, finalmente, uma decisão global sobre a atividade primária é alcançada. O esquema está representado na Figura 3.5. Resumindo, a cooperação permite que os rádios desvanecidos independentemente obtenham, coletivamente, robustez a desvanecimentos graves, mantendo níveis de sensibilidade individuais próximos da perda de caminho nominal. Essa abordagem torna o espectro sensível ao possível desequilíbrio das qualidades do canal de diferentes usuários secundários e a ambientes de desvanecimento severos ou mal modelados, sem exigências drásticas em rádios individuais (Simeone *et al.* (2007); Mishra, Sahai, and Brodersen (2006)).

Figura 3.5 – Detecção Cooperativa em uma rede sem fio cognitiva simples com um *link* primário e uma rede secundária de três nós (Simeone *et al.* (2007)).



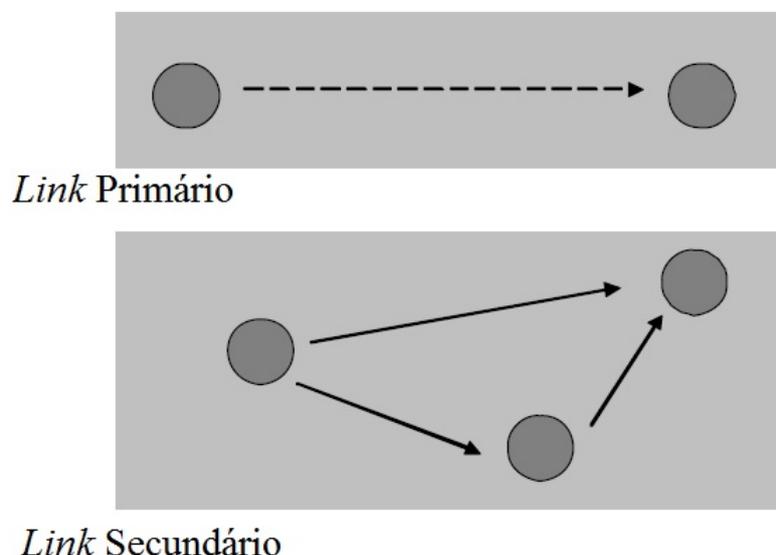
Uma segunda alternativa da utilização de cooperação em sistemas cognitivos é a exploração da oportunidade de transmissão, através da transmissão cooperativa.

A forma mais básica de transmissão cooperativa consiste em três terminais distintos: uma fonte S, um *relay* R e um destino D. Essa tecnologia emprega a ideia de um canal de retransmissão onde um nó (o *relay*) encaminha a transmissão do nó fonte em direção ao destino pretendido. O nó *relay* processa, transforma e retransmite os sinais que recebe. O destino, então, combina os sinais provenientes da fonte e dos colaboradores, criando diversidade espacial aproveitando as múltiplas recepções dos mesmos dados nos vários terminais e os múltiplos caminhos de transmissão. Além disso, a interferência entre os terminais pode ser drasticamente suprimida pela tecnologia de processamento espacial distribuído. As vantagens de desempenho alcançáveis pela colaboração resultam de: ganhos de potência, que podem ser aproveitados se o *relay* estiver em uma localização conveniente, geralmente a meio caminho entre a fonte e o destino; ganhos de diversidade, que alavancam o caminho seguido pelo sinal (Simeone *et al.* (2007); Letaief and Zhang (2009)).

No contexto do rádio cognitivo, a transmissão cooperativa pode dar origem a dois cenários básicos diferentes (Simeone *et al.* (2007); Zhang, Jia, and Zhang (2009)):

- 1) **Transmissão cooperativa entre usuários secundários:** Nesse cenário, temos dois sistemas atuando conjuntamente, o sistema primário e o secundário. Mas só o sistema secundário atua com cooperação. Nesse sistema, um dos terminais secundários atua como *relay* para a retransmissão do sinal do terminal fonte secundário até o terminal de destino secundário, conforme ilustrado na Figura 3.6. Assim, tem-se uma comu-

Figura 3.6 – Transmissão Cooperativa entre usuários secundários em uma rede sem fio cognitiva simples com um *link* primário e uma rede secundária de três nós (Simeone *et al.* (2007)).

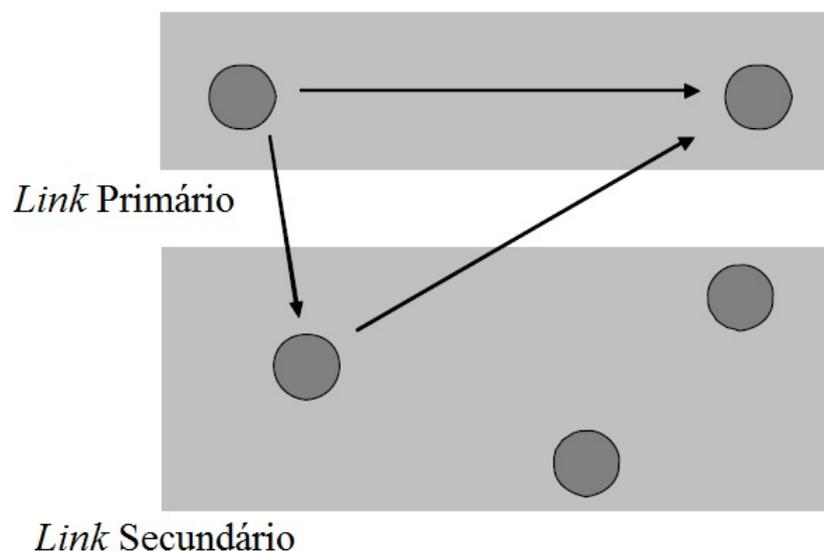


nicação cooperativa tradicional e todas as considerações gerais válidas para transmissão cooperativa mencionadas no Capítulo 2 podem ser aplicadas neste caso. A diferença importante é que os nós secundários precisam observar o canal para possíveis transmissões pelos usuários primários, fazendo com que as atividades secundárias sejam transparentes para os mesmos.

- 2) **Transmissão cooperativa entre usuários primários e secundários:** Nesse cenário a cooperação é realizada entre o sistema secundário e o sistema primário. Os usuários secundários atuam como *relays* e podem retransmitir as mensagens de um transmissor primário para o destino primário pretendido, ver Figura 3.7. Essa possibilidade de retransmissão permite que os terminais primários terminem suas transmissões o mais rápido possível, o que, por sua vez, levará a mais oportunidades de transmissão para usuários secundários.

Podemos ver que a transmissão cooperativa entre usuários secundários tem como objetivo aumentar o rendimento secundário para um determinado espaço espectral, enquanto que a transmissão cooperativa entre usuários primários e usuários secundários tem como objetivo aumentar a probabilidade de oportunidades de transmissão. Em resumo, ambas as transmissões de cooperação acima tentam melhorar a diversidade espacial para a mesma faixa de frequência do espectro (Simeone *et al.* (2007)).

Figura 3.7 – *Relay* Cognitivo em uma rede sem fio cognitiva simples com um *link* primário e uma rede secundária de três nós (Simeone *et al.* (2007)).



### 3.7 Conclusão

Este capítulo foi dedicado a tecnologia de rádio cognitivo. O rádio cognitivo foi recentemente proposto como uma das principais tecnologias de comunicação sem fio que trata o congestionamento do espectro e os problemas de subutilização de bandas de frequência. Este capítulo mostrou as circunstâncias desses problemas. Para mostrar como o rádio cognitivo contorna esses problemas, inicialmente definimos alguns aspectos importantes para o funcionamento desta tecnologia. Entendendo esses aspectos, definimos o funcionamento de rádio cognitivo e destacamos as principais características da tecnologia. As funções dos sistemas de rádio cognitivos foram apresentadas e a arquitetura básica foi descrita. Discorreu-se sobre as estratégias de acesso dinâmicas, destacando o modelo de acesso hierárquico, em que acontece o compartilhamento de espectro entre usuários secundários e primários dentro de faixas de frequências licenciadas, mostrando os três principais paradigmas desse modelo. Além disso, expomos três situações interessantes (comunicações militares, segurança pública e interna e tecnologias sem fio comerciais) onde o rádio cognitivo pode ser inserido e se mostra bastante eficaz. Finalizamos o capítulo com a ideia central desse trabalho: a união de duas tecnologias promissoras, cooperação e rádio cognitivo, para maximizar o desempenho dos serviços sem fio.

# Capítulo 4

## Análise de Outage em Sistemas Cooperativos Cognitivos com Compartilhamento Espectral Usando Retransmissão Incremental Híbrida

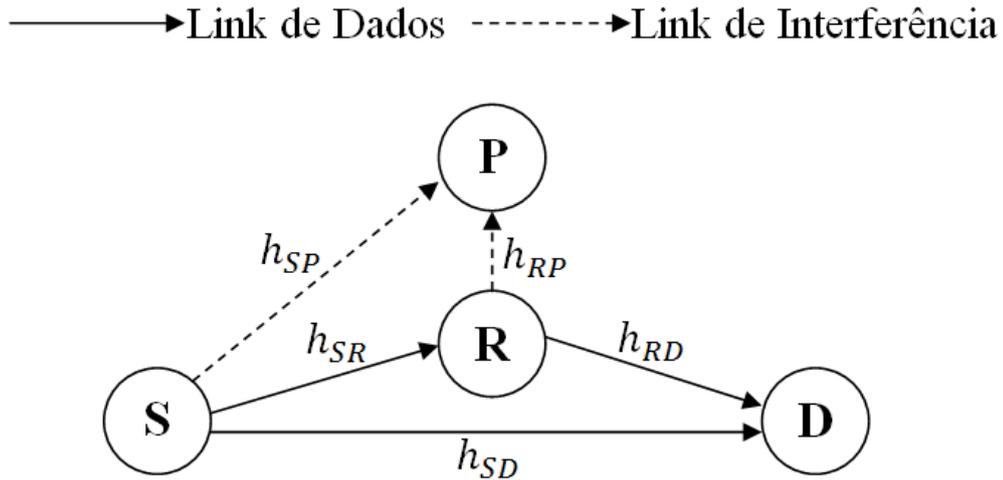
Neste capítulo será apresentada a contribuição original desta dissertação, que consiste na análise de desempenho de uma rede cooperativa cognitiva com compartilhamento espectral e retransmissão incremental híbrida, através da probabilidade de *outage*. A rede de retransmissão cognitiva usa a cooperação entre usuários secundários com base na abordagem *Underlay*, ao aderir à restrição de interferência no usuário primário e assume um protocolo de retransmissão incremental híbrido no nó *relay*. Na Seção 4.1 o modelo de sistema proposto é descrito, em que usuários secundários e primários coexistem na mesma faixa espectral e a cooperação acontece entre os usuários secundários utilizando retransmissão incremental híbrida. Na Seção 4.2 a análise da probabilidade de *outage* é desenvolvida e uma equação analítica e em forma fechada é encontrada para a probabilidade de *outage* do sistema proposto.

### 4.1 Modelo Sistêmico

Considere uma Rede Rádio Cognitiva no modelo *Underlay*, em que uma comunicação secundária coexiste com uma transmissão primária na mesma banda de frequência e ao mesmo tempo. Ou seja, os rádios secundários coexistem na mesma banda com licenciados primários, mas são regulados para causar interferência abaixo dos limites prescritos. A rede secundária é um sistema cooperativo cognitivo de dois saltos com compartilhamento espectral consistindo de um terminal fonte secundário, denotado por  $S$  (do inglês, *Source*), um terminal de retransmissão secundário denotado por  $R$  (do inglês, *Relay*) e um

terminal de destino secundário denotado por  $D$  (do inglês, *Destination*). A rede primária no nosso caso é representada apenas por um usuário receptor primário denotado por  $P$ . O modelo de sistema é apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Modelo sistêmico de uma rede cooperativa cognitiva com compartilhamento espectral.

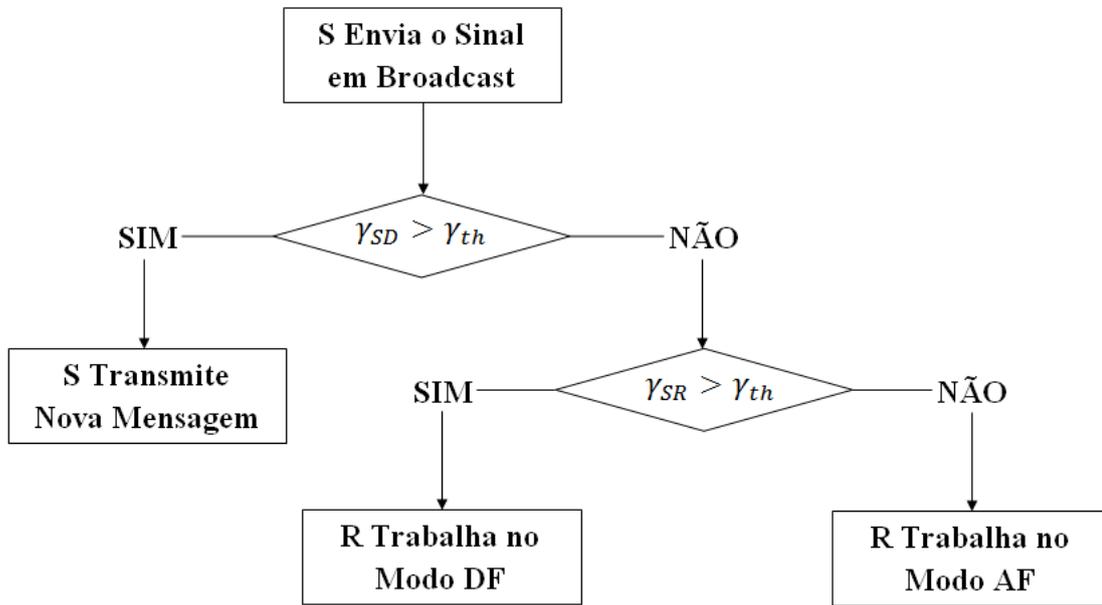


O sistema de comunicação avaliado neste trabalho é de tal forma que, todos os nós são equipados com uma única antena omnidirecional e operam no modo *half-duplex*. Devido a obstáculos ou forte sombreamento, assume-se que o transmissor primário não causa interferência na rede secundária. Além disso, para a simplificação da análise, considera-se que as amplitudes dos coeficientes dos canais obedecem a uma distribuição Rayleigh. Ademais a informação do estado do canal (*Channel State Information (CSI)*) é assumida disponível no nó *Relay* e no nó de destino usando sequências de treinamento. Como os usuários primários e secundários compartilham o mesmo espectro, para não haver interferência com a rede primária, as potências de transmissão de  $S$  e  $R$  são limitadas por um limiar  $I_p$ , definido como o pico máximo de interferência que o receptor primário  $P$  pode tolerar.

A Figura 4.2 ilustra o modo de operação do protocolo de retransmissão IHDAF. Assumimos que o método de acesso ao meio do sistema cooperativo em questão é baseado em *Time Division Multiple Access (TDMA)*. Portanto, a comunicação secundária será realizada em dois *slots* de tempos subsequentes. A escolha pelo método TDMA de acesso ao meio é dada por questões de simplicidade, dado que sua simulação e método de operação são mais triviais. Na primeira fase,  $S$  envia o sinal em *broadcast* para  $R$  e  $D$  simultaneamente com potência de transmissão  $P_S$ . A partir de um limiar pré-estabelecido  $\gamma_{th}$ , o terminal destino decide se é ou não capaz de decodificar corretamente a mensagem enviada pela fonte. Esse limiar é a SNR mínima para que  $D$  consiga decodificar com sucesso o sinal sem a ajuda do *relay*. Em particular, caso a razão sinal-ruído (SNR) instantânea do *link*  $S$ - $D$  exceda o limiar,  $D$  consegue decodificar corretamente a mensagem

enviada pela fonte e R permanece em silêncio; então S envia uma nova mensagem na segunda fase. Caso contrário, a retransmissão torna-se necessária e, na segunda fase, R avalia a qualidade do sinal recebido da fonte com base no limiar  $\gamma_{th}$ . Neste caso, se a SNR do *link* S-R exceder  $\gamma_{th}$ , R decodifica corretamente a mensagem recebida e a encaminha para D. Caso contrário, R comuta para o modo AF, amplificando e encaminhando o sinal com o intuito de melhorar o desempenho sistêmico diante das condições ruins do canal S-R. A retransmissão ocorre com potência  $P_R$ . No terminal destino, os sinais resultantes do *link* direto e do *link* auxiliar são combinados por meio da técnica MRC (Bai *et al.* (2015)).

Figura 4.2 – Fluxograma do protocolo de retransmissão IHDAF.



Podemos descrever os sinais processados desse sistema da seguinte maneira. Na primeira fase, os sinais recebidos pelo destino e pelo *relay* são descritos, respectivamente, por:

$$y_{SD} = \sqrt{P_S}h_{SD}x + n_{SD}, \quad (4.1)$$

e

$$y_{SR} = \sqrt{P_S}h_{SR}x + n_{SR}, \quad (4.2)$$

em que  $h_{SD}$  e  $h_{SR}$  denotam os coeficientes de canal dos *links* S-D e S-R, respectivamente,  $x$  é o sinal de informação transmitido,  $n_{SD}$  e  $n_{SR}$  são os ruídos modelados como variáveis aleatórias gaussianas, com média zero e variância  $N_0$ , e  $P_S$  é a potência de transmissão da fonte secundária.

Na segunda fase, se o *relay* opera no modo DF, o sinal recebido do *relay* no destino é dado por:

$$y_{RD} = \sqrt{P_R}h_{RD}x_R + n_{RD}, \quad (4.3)$$

em que  $h_{RD}$  denota os coeficientes de canal do *links* R-D,  $n_{RD}$  é o ruído modelado como uma variável aleatória gaussiana, com média zero e variância  $N_0$  associado ao canal R-D,  $x_R$  é o sinal decodificado e recodificado pelo *relay* e  $P_R$  é a potência de transmissão do *relay* secundária.

Diferentemente, na segunda fase de transmissão, se o *relay* opera no modo AF, o sinal recebido do *relay* no destino é denotado por:

$$y_{RD} = Gh_{RD}\gamma_{SR} + n_{RD}, \quad (4.4)$$

em que  $G$  é o coeficiente de amplificação dado por  $G = \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_S|h_{SR}|^2 + N_0}}$ .

Um terminal convencional transmite o sinal com uma potência constante, enquanto que sob o paradigma subjacente, a potência de transmissão deve ser otimizada de acordo com o ambiente de rádio. Dessa forma, as potências  $P_S$  e  $P_R$  são determinadas, respectivamente, como

$$P_S = \frac{I_p}{|h_{SP}|^2}, \quad (4.5)$$

e

$$P_R = \frac{I_p}{|h_{RP}|^2}, \quad (4.6)$$

em que  $I_p$  corresponde a interferência de pico máxima que P pode tolerar e,  $h_{SP}$  e  $h_{RP}$  denotam os coeficientes de canal dos *links* S-P e R-P, respectivamente. De acordo com as análises acima, as SNRs instantâneas dos *links* S-D, S-R e R-D são expressas, respectivamente, como

$$\gamma_{SD} = \frac{\bar{\gamma}|h_{SD}|^2}{|h_{SP}|^2}, \quad (4.7)$$

$$\gamma_{SR} = \frac{\bar{\gamma}|h_{SR}|^2}{|h_{SP}|^2} \quad (4.8)$$

e

$$\gamma_{RD} = \frac{\bar{\gamma}|h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2}, \quad (4.9)$$

em que  $h_{SD}$ ,  $h_{SR}$  e  $h_{RD}$  correspondem aos coeficientes de canal dos *links* S-D, S-R e R-D, respectivamente, e  $\bar{\gamma} = \frac{I_p}{N_0}$ . Assumindo desvanecimento Rayleigh, a PDF de  $z_i = |h_i|^2$  ( $i \in \{SR, RD, SD, SP, RP\}$ ) é dada por

$$f_{z_i}(z) = \frac{1}{\bar{z}_i} e^{-\frac{z}{\bar{z}_i}}. \quad (4.10)$$

---

<sup>1</sup>Notações Matemáticas:  $F_X(\cdot)$  e  $f_X(\cdot)$  representam a função de distribuição acumulada (do inglês, *Cumulative Distribution Function* (CDF)) e a função densidade de probabilidade (do inglês, *Probability Density Function* (PDF)) de uma variável aleatória (VA) arbitrária  $X$ ,  $\bar{X}$  simboliza a média estatística de uma VA  $X$ , e  $\Pr\{\}$  denota probabilidade.

## 4.2 Probabilidade de *Outage*

Nesta seção, uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* fim-a-fim de uma rede cooperativa cognitiva de dois saltos com compartilhamento espectral e usando o protocolo de retransmissão IHDAF será derivada. No nosso esquema, a cooperação é desencadeada dependendo da capacidade do link direto S-D. Como é sabido, uma interrupção ocorre quando a SNR instantânea em D está abaixo de um certo limiar  $\gamma_{th}$ . Baseado nessa definição e na funcionalidade do protocolo IHDAF acima mencionada, ocorre um evento de interrupção quando

$$\begin{aligned} & (\{\gamma_{SD} < \gamma_{th}\} \cap \{\gamma_{SR} > \gamma_{th}\} \cap \{\gamma_{D_{DF}} < \gamma_{th}\}) \\ & \cup (\{\gamma_{SD} < \gamma_{th}\} \cap \{\gamma_{SR} < \gamma_{th}\} \cap \{\gamma_{D_{AF}} < \gamma_{th}\}), \end{aligned} \quad (4.11)$$

em que  $\gamma_{D_{DF}}$  e  $\gamma_{D_{AF}}$  correspondem as SNRs fim-a-fim para o caso em que o *relay* utiliza os protocolos DF e AF, respectivamente.

Sendo a probabilidade de *outage* fim-a-fim definida como a probabilidade de ocorrência de um evento de interrupção, ou seja, definida como a probabilidade da SNR instantânea em D está abaixo de um certo limiar  $\gamma_{th}$ . A probabilidade de *outage* do sistema em estudo pode ser matematicamente formulada como:

$$\begin{aligned} P_{out} = & \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}, \gamma_{D_{DF}} < \gamma_{th} \} \\ & + \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{D_{AF}} < \gamma_{th} \}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

em que  $\gamma_{D_{DF}}$  e  $\gamma_{D_{AF}}$  podem ser expressas por:  $\gamma_{D_{DF}} = \gamma_{RD} + \gamma_{SD}$  e  $\gamma_{D_{AF}} = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}} + \gamma_{SD}$ . Perceba que (4.12) é composta da soma de duas parcelas. Na sequência, expressões em forma fechada para cada uma destas parcelas serão determinadas analiticamente.

Da primeira parcela de (4.12), observe que  $\gamma_{SD}$  e  $\gamma_{SR}$  não são estatisticamente independentes devido à variável aleatória comum  $|h_{SP}|^2$ . Assim, fazendo uso do método empregado em (Duong *et al.* (2012c)) e utilizando conceitos de estatísticas condicionais (Garcia (2008)), seja  $|h_{SP}|^2 = X$  tal que a primeira parcela de (4.12) pode ser re-expressa

como

$$\begin{aligned}
& \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} \} \\
&= \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} | x \} f_X(x) dx \\
&= \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SR} > \gamma_{th} | x \} \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} | x \} \\
&\quad \times f_X(x) dx \\
&= \int_0^\infty \underbrace{\Pr \{ \gamma_{SR} > \gamma_{th} | x \}}_{I_1} \underbrace{\Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SD} + \gamma_{RD} < \gamma_{th} | x \}}_{I_2} \\
&\quad \times f_X(x) dx, \tag{4.13}
\end{aligned}$$

em que  $f_X(x)$  é a função de densidade de probabilidade (PDF) de  $|h_{SP}|^2$ .

Analisando o cálculo de  $I_1$ , segue da teoria de probabilidade (Garcia (2008))

que

$$\begin{aligned}
I_1 &= \Pr \{ \gamma_{SR} > \gamma_{th} | x \} = 1 - \Pr \{ \gamma_{SR} < \gamma_{th} | x \} \\
&= 1 - F_W \left( \frac{\gamma_{th} x}{\bar{\gamma}} \right) = 1 - \int_0^{\frac{\gamma_{th} x}{\bar{\gamma}}} f_W(w) dw = e^{-\frac{\gamma_{th} x}{\bar{\gamma} w}}, \tag{4.14}
\end{aligned}$$

onde  $W = |h_{SR}|^2$  e utilizou-se (4.10) para a PDF de  $W$ . Por outro lado,  $I_2$  pode ser escrito como (Garcia (2008))

$$\begin{aligned}
& \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SD} + \gamma_{RD} < \gamma_{th} | x \} \\
&= \Pr \left\{ \frac{\bar{\gamma} |h_{SD}|^2}{x} < \gamma_{th}, \frac{\bar{\gamma} |h_{SD}|^2}{x} + \frac{\bar{\gamma} |h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2} < \gamma_{th} | x \right\} \\
&= \Pr \left\{ \frac{|h_{SD}|^2}{x} < \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}, \frac{|h_{SD}|^2}{x} + \frac{|h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2} < \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} | x \right\} \\
&= \Pr \left\{ \frac{|h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2} < \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} - \frac{|h_{SD}|^2}{x}, \frac{|h_{SD}|^2}{x} < \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} | x \right\}. \tag{4.15}
\end{aligned}$$

Seja  $|h_{RD}|^2 = \phi$ ,  $|h_{RP}|^2 = \psi$  e  $Z = \frac{|h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2} = \frac{\phi}{\psi}$ . Fazendo uso novamente dos conceitos de teoria de probabilidade (Garcia (2008)), a PDF e a CDF de  $Z$  podem ser determinadas como

$$\begin{aligned}
f_Z(z) &= \int_0^\infty \psi f_\psi(\psi) f_\phi(\psi z) d\psi = \int_0^\infty \psi \frac{1}{\psi} e^{-\frac{\psi}{\psi}} \frac{1}{\phi} e^{-\frac{\psi z}{\phi}} d\psi \\
&= \frac{1}{\bar{\psi} \bar{\phi}} \int_0^\infty \psi e^{-\psi \left( \frac{1}{\bar{\psi}} + \frac{z}{\bar{\phi}} \right)} d\psi = \frac{1}{\bar{\psi} \bar{\phi} \left( \frac{1}{\bar{\psi}} + \frac{z}{\bar{\phi}} \right)^2}, \tag{4.16}
\end{aligned}$$

e

$$F_Z(\gamma) = \int_0^\gamma f_Z(z) dz = \int_0^\gamma \frac{1}{\bar{\psi}\bar{\phi} \left(\frac{1}{\bar{\psi}} + \frac{z}{\bar{\phi}}\right)^2} dz = \frac{\bar{\psi}\gamma}{\bar{\phi} + \bar{\psi}\gamma}. \quad (4.17)$$

Sendo  $Y = \frac{|h_{SD}|^2}{x}$  e utilizando transformação de variáveis, a PDF de  $Y$  é dada por

$$f_Y(y) = x \frac{1}{y} e^{-\frac{xy}{y}}. \quad (4.18)$$

Baseado nos resultados acima, uma expressão em forma fechada para a primeira parcela de (4.11), que é representada por (4.12), pode ser determinada como

$$\begin{aligned} & \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} \} = \\ & = \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SR} > \gamma_{th} | x \} \int_0^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}} F_Z \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} - y | x \right) f_Y(y) dy \\ & \times f_X(x) dx \\ & = \int_0^\infty e^{-\frac{\gamma_{th}x}{\bar{\gamma}\bar{w}}} \left( \int_0^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}} \frac{\bar{\psi}(\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} - y)}{\bar{\phi} + \bar{\psi}(\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} - y)} x \frac{1}{y} e^{-\frac{xy}{y}} dy \right) \frac{1}{x} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} dx \\ & = \bar{\gamma}\bar{x}\bar{\psi}\bar{w}^2 \left[ \frac{\gamma_{th}(\bar{x}\bar{\gamma}\bar{w}\bar{\phi} + \bar{\psi}(\bar{y}\bar{\gamma}\bar{w} + \gamma_{th}\bar{x}(\bar{y} + \bar{w})))}{(\bar{x}\gamma_{th} + \bar{\gamma}\bar{w})A_1} \right. \\ & \left. - \frac{A_2 \log \left[ -\frac{\bar{\psi}(\bar{y}\bar{\gamma}\bar{w} + \bar{x}\gamma_{th}(\bar{y} + \bar{w}))}{\bar{\gamma}\bar{x}\bar{w}\bar{\phi}} \right]}{(\bar{x}\gamma_{th} + \bar{\gamma}\bar{w})A_1} + \frac{A_2 \log \left[ -\frac{\bar{y}\bar{\gamma}\bar{\psi}\bar{w} + \bar{y}\bar{x}\gamma_{th}\bar{\psi}}{\bar{x}\gamma_{th}\bar{\psi}\bar{w} + \bar{\gamma}\bar{x}\bar{w}\bar{\phi}} \right]}{(\bar{x}\gamma_{th} + \bar{\gamma}\bar{w})A_1} \right], \end{aligned} \quad (4.19)$$

em que  $A_1 = (\bar{\phi}\bar{\gamma}\bar{x}\bar{w} + \bar{\psi}(\bar{\gamma}\bar{w}\bar{y} + \bar{x}\gamma_{th}(\bar{w} + \bar{y})))^2$  e  $A_2 = \bar{\phi}\bar{\gamma}(\bar{x}\gamma_{th} + \bar{\gamma}\bar{w})\bar{y}$ .

Considerando agora o cálculo da segunda parcela de (4.12), de (Garcia (2008))

segue que

$$\begin{aligned} & \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{DAF} < \gamma_{th} \} \\ & = \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{DAF} < \gamma_{th} | x \} f_X(x) dx \\ & = \int_0^\infty \Pr \left\{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}} + \gamma_{SD} < \gamma_{th} | x \right\} \\ & \times f_X(x) dx \\ & = \int_0^\infty \Pr \left\{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}} < \gamma_{th} - \gamma_{SD} | x \right\} \\ & \times f_X(x) dx \\ & = \int_0^\infty \Pr \left\{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}} < \gamma_{th} - \gamma_{SD} | x \right\} \\ & \times f_X(x) dx. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Seja  $\gamma_{SR}\gamma_{RD} = \theta$ ,  $\gamma_{SR} + \gamma_{RD} = \varphi$  e  $\nu = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}} = \frac{\theta}{\varphi}$ . Assim, a PDF de  $\nu$  condicionada a  $X$  pode ser calculada como

$$f_{\nu|x}(\nu) = \int_0^\infty \varphi f_{\varphi|x}(\varphi) f_{\theta|x}(\nu\varphi) d\varphi. \quad (4.21)$$

Neste caso, a PDF de  $\theta$  condicionada a  $X$  é dada por

$$\begin{aligned} f_{\theta|x}(\theta) &= \int_0^\infty \frac{1}{\gamma_{SR}} f_{\gamma_{SR}|x}(\gamma_{SR}) f_{\gamma_{RD}|x}\left(\frac{\theta}{\gamma_{SR}}\right) d\gamma_{SR} \\ &= \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma_{SR}} e^{-\frac{\gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR}}} e^{-\frac{\theta}{\bar{\gamma}_{RD}\gamma_{SR}}} d\gamma_{SR} \\ &= \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} 2K_0 \left[ \frac{2}{\sqrt{\bar{\gamma}_{SR}}\sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\theta}}} \right] \\ &= \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} 2 \sum_{m=0}^\infty \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \left( \frac{1}{\sqrt{\bar{\gamma}_{SR}}\sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\theta}}} \right)^{2m}, \end{aligned} \quad (4.22)$$

onde  $K_0(\cdot)$  representa a função de Bessel modificada de ordem zero ((Gradshteyn and Ryzhik, 2000, Eq. (8.432.1))). A última igualdade de (4.22) segue da representação em série de *Taylor* para a função  $K_0(\cdot)$  ((Gradshteyn and Ryzhik, 2000, Eq. (8.447.3))). Além disso, perceba que embora as PDFs de  $\gamma_{SR}$  e  $\gamma_{RD}$  não sigam uma distribuição exponencial, quando condicionamos estas variáveis a  $X$ , suas respectivas PDFs condicionais seguem agora uma distribuição exponencial.

Por outro lado, a PDF de  $\varphi$  condicionada a  $X$  pode ser determinada como

$$\begin{aligned} f_{\varphi|x}(\varphi) &= \int_0^\infty f_{\gamma_{SR}|x}(\gamma_{SR}) f_{\gamma_{RD}|x}(\varphi - \gamma_{SR}) d\gamma_{SR} \\ &= \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} \int_0^\infty e^{-\frac{\gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR}}} e^{-\frac{\varphi - \gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{RD}}} d\gamma_{SR} \\ &= \frac{e^{-\frac{\varphi}{\bar{\gamma}_{RD}}}}{-\bar{\gamma}_{SR} + \bar{\gamma}_{RD}}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Substituindo (4.22) e (4.23) em (4.21), segue que

$$\begin{aligned} f_{\nu|x}(\nu) &= \int_0^\infty \varphi \left( \frac{e^{-\frac{\varphi}{\bar{\gamma}_{RD}}}}{-\bar{\gamma}_{SR} + \bar{\gamma}_{RD}} \right) \\ &\quad \times \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} 2 \sum_{m=0}^\infty \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \left( \frac{1}{\sqrt{\bar{\gamma}_{SR}}\sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\nu\varphi}}} \right)^{2m} \right) d\varphi \\ &= -\frac{2e^{-\frac{\nu}{\bar{\gamma}_{SR}}}(\bar{\gamma}_{RD})^2(\bar{\gamma}_{SR} - \nu)}{\bar{\gamma}_{SR}((\bar{\gamma}_{SR})^2\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SR}(\bar{\gamma}_{RD})^2)}, \end{aligned} \quad (4.24)$$

e, conseqüentemente,

$$\begin{aligned}
F_{\nu|x}(\gamma) &= \int_0^\gamma f_{\nu|x}(\nu) d\nu \\
&= \int_0^\infty \frac{2e^{-\frac{\nu}{\bar{\gamma}_{SR}}} (\bar{\gamma}_{RD})^2 (\bar{\gamma}_{SR} - \nu)}{\bar{\gamma}_{SR} ((\bar{\gamma}_{SR})^2 \bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SR} (\bar{\gamma}_{RD})^2)} d\nu \\
&= \frac{2e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}} \bar{\gamma}_{RD} \gamma}{(\bar{\gamma}_{SR})^2 - \bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}}.
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Baseado nos resultados acima, temos que (4.20) pode ser determinada como

$$\begin{aligned}
&\Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{DAF} < \gamma_{th} \} \\
&= \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{th}} \int_0^{\gamma_{th}} F_\nu(\gamma_{th} - a|x) f_{\gamma_{SR}|x}(b) db f_{\gamma_{SD}|x}(a) da \\
&\times f_X(x) dx \\
&= \frac{2e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{SD}} - \frac{2\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{SR}}} \left( -1 + e^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{SR}}} \right) \bar{\gamma}_{RD} A_3}{(\bar{\gamma}_{SD} - \bar{\gamma}_{SR})^2 (\bar{\gamma}_{SR} - \bar{\gamma}_{RD})},
\end{aligned} \tag{4.26}$$

em que  $A_3 = e^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{SR}}} \bar{\gamma}_{SD} \bar{\gamma}_{SR} + e^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{SD}}} (\bar{\gamma}_{SR} \gamma_{th} - \bar{\gamma}_{SD} (\bar{\gamma}_{SR} + \gamma_{th}))$ .

Finalmente, substituindo (4.19) e (4.26) em (4.11), uma expressão em forma exata e em forma fechada para a probabilidade de *outage* fim-a-fim de uma rede cooperativa cognitiva de dois saltos com compartilhamento espectral e usando o protocolo de retransmissão IHDAF é obtida. Vale salientar que tal expressão é fácil de avaliar, sendo computacionalmente muito simples. Até onde o autor está ciente, é a primeira vez que esta expressão é derivada na literatura, servindo assim como referência para futuros trabalhos.

### 4.3 Conclusão

Neste capítulo o modelo de sistema proposto por esta dissertação foi apresentado e uma expressão analítica em forma fechada para a probabilidade de *outage* fim-a-fim foi desenvolvida para uma rede cooperativa cognitiva com compartilhamento espectral, usando o protocolo de retransmissão incremental no nó *relay*. Tal expressão foi desenvolvida considerando canais com desvanecimento Rayleigh, para simplificações de resultados, nós equipados com uma única antena e operando em modo *half-duplex*. Além disso, as potências de transmissão dos nós secundários foram limitadas por um limiar  $I_p$  para não causar interferência na rede primária. É importante destacar que consideramos também que a retransmissão pelo *relay* secundário só será realizada quando a condição do canal fonte-destino for ruim e pode ocorrer utilizando o modo AF ou o modo DF.

# Capítulo 5

## Resultados de Simulação

Nesta seção, com o intuito de avaliar o desempenho do sistema proposto, alguns resultados numéricos serão apresentados e validados por meio de simulação de Monte Carlo. As expressões para as probabilidades de *outage* desenvolvidas no Capítulo 4 serão validadas por meio de comparações de resultados de simulações computacionais. Como será mostrado, uma perfeita concordância entre as curvas analíticas e simuladas é obtida. Sem perda de generalidade, para a geração das curvas considerou-se uma topologia plana  $(x_i, y_i)$  para todos os nós  $i$  da rede primária e secundária. Dessa forma, a potência média do canal desvanecido entre um nó M e um nó N foi denotado como  $l^{-\eta}$ , em que  $\eta$  simboliza o expoente de perda de percurso e  $l = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2}$  representa a distância entre M e N. Para a rede secundária, assumiu-se que a localização dos nós S, R e D estão nas coordenadas  $(0, 0)$ ,  $(1/2, 0)$  e  $(1, 0)$ , respectivamente. Assumiu-se também que o limiar de *outage*  $\gamma_{th}$  é igual a 3 dB e que a posição do usuário primário P é variada em relação aos nós secundários. Assim como trabalhos anteriores (Duong *et al.* (2012c,a)), definiu-se a SNR média do sistema como  $\bar{\gamma} = I_p/N_0$ . O modelo do sistema avaliado com o posicionamento inicial de todos os nós da rede é mostrado na Figura 5.1.

A Figura 5.2 mostra a probabilidade de *outage* versus  $I_p/N_0$  para diferentes valores de coeficiente de perda de percurso, o que implica fisicamente em diferentes regiões de propagação (espaço livre, área urbana ou ambientes domésticos, por exemplo). O nó P foi setado a uma distância de 0,5 de S e R. Como era esperado, o desempenho do sistema piora a medida que o coeficiente de perda de percurso aumenta. Observe também que a ordem de diversidade do sistema não varia com a variação de  $\eta$ , sendo sempre igual a 2. Nestas figuras demonstra-se o quão eficiente são os resultados teóricos desenvolvidos nesse trabalho em comparação aos resultados simulados.

As Figuras 5.3 e 5.4 avaliam o efeito da localização do usuário primário em relação aos nós secundários S e R no desempenho sistêmico. Na Figura 5.3, o nó P foi mantido a uma distância de 0,5 de R e variou-se a posição de P em relação a S. O terminal P foi afastado do terminal S por uma distância de 0,3; 0,5; 0,8 e 1,0. Enquanto que na

Figura 5.1 – Modelo do sistema da rede cooperativa cognitiva com compartilhamento espectral.

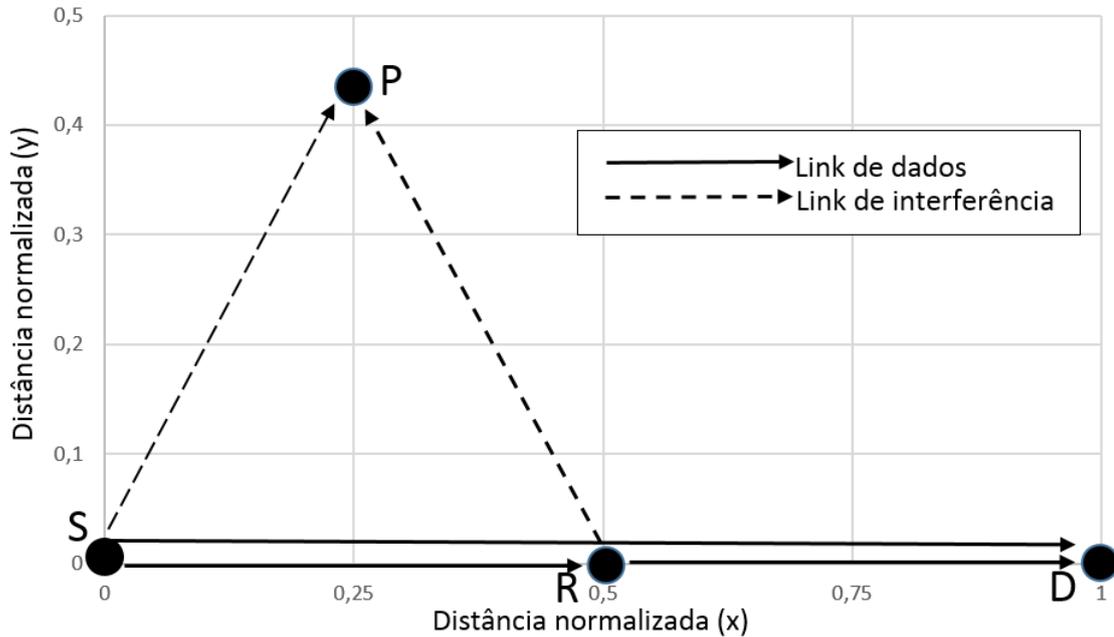


Figura 5.2 – Probabilidade de *outage* versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com compartilhamento espectral para diferentes coeficientes de perda de percurso.

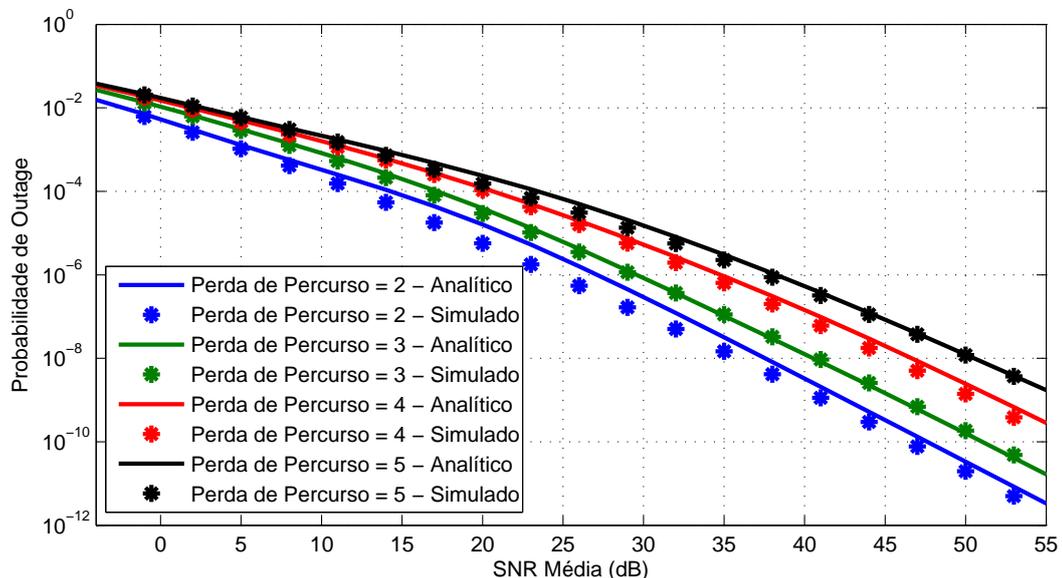
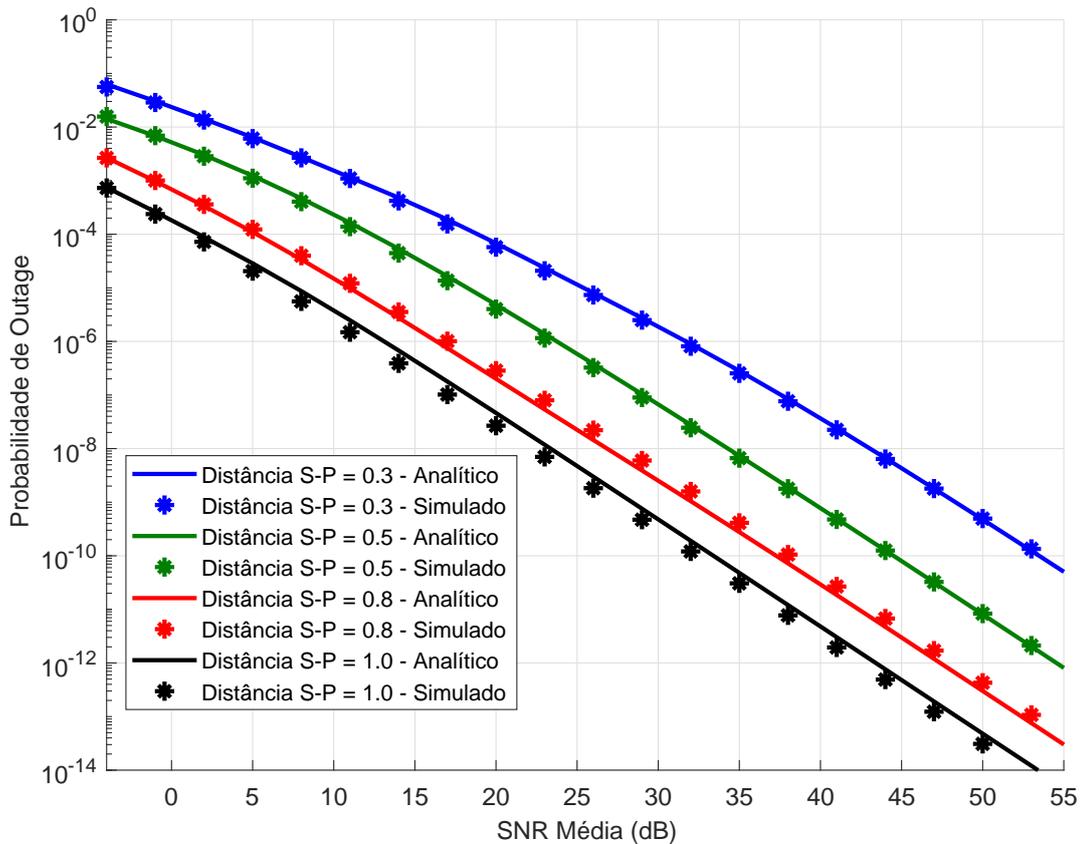


Figura 5.4, manteve-se P e S a uma distância de 0,5 e variou-se a distância entre P e R, de 0,3; 0,5; 0,8 e 1,0. Note que o desempenho do sistema melhora à medida que P se afasta da rede secundária. Este fenômeno ocorre porque, se P se aproxima de S e/ou R o sinal sofre uma maior influência da perda de percurso entre P e S e R e maior será a interferência experimentada pela rede secundária. Note também que, as curvas da Figura 5.3 estão mais afastadas a medida em que a distância entre S e P aumenta, quando comparadas as

curvas da Figura 5.4, à medida que a distância entre R e P aumenta. Isso ocorre porque o sistema proposto é de retransmissão incremental, dessa forma nem sempre o *relay* é utilizado e a probabilidade de *outage* para a variação da distância entre S e P é mais agravada.

Figura 5.3 – Probabilidade de *outage* versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com compartilhamento espectral para diferentes distâncias entre o usuário primário P e a fonte secundária S.



A Figura 5.5 mostra a probabilidade de *outage* versus  $1/N_0$  para diferentes valores do pico máximo de interferência que o receptor primário P pode tolerar,  $I_p$ . Os valores de  $I_p$  são modelados para variar entre 3dB, 5dB, 10dB e 30dB. Com uma restrição de interferência menos severa, a potência de transmissão dos usuários secundários torna-se maior e o desempenho do sistema é melhorado. Esse comportamento é observado pelas curvas da probabilidade de *outage* mostradas na figura. Como era esperado, o desempenho do sistema melhora à medida que o pico máximo de interferência  $I_p$  suportado por P também aumenta.

Podemos comparar o desempenho do sistema cooperativo cognitivo com compartilhamento espectral com a retransmissão incremental híbrida pelo nó *relay* IHDAF proposto neste trabalho com outros sistemas cooperativos cognitivos com diferentes ti-

Figura 5.4 – Probabilidade de *outage* versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com compartilhamento espectral para diferentes distâncias entre o usuário primário P e o *relay* secundário R.

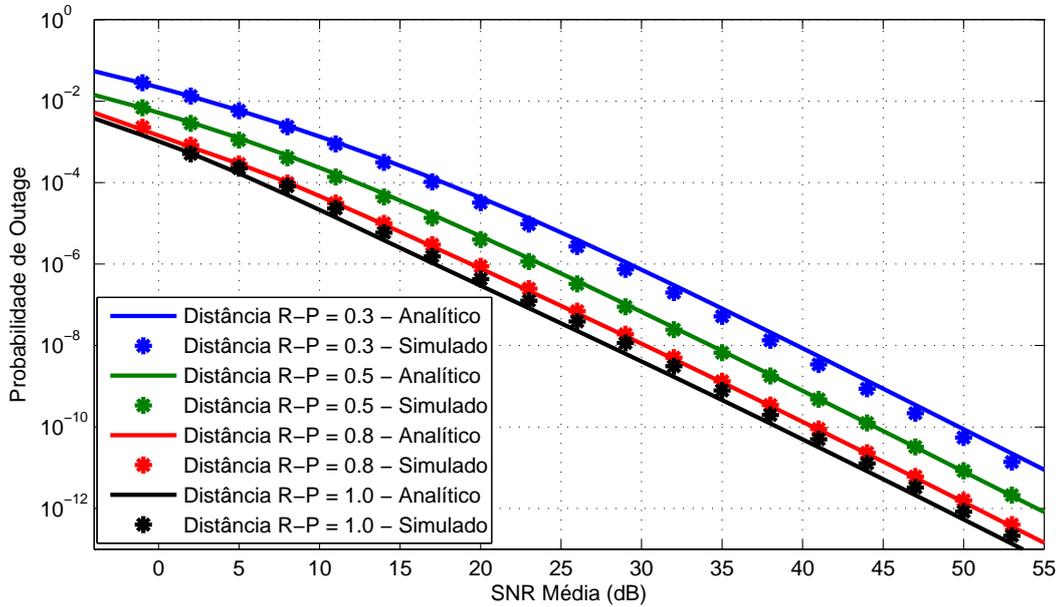
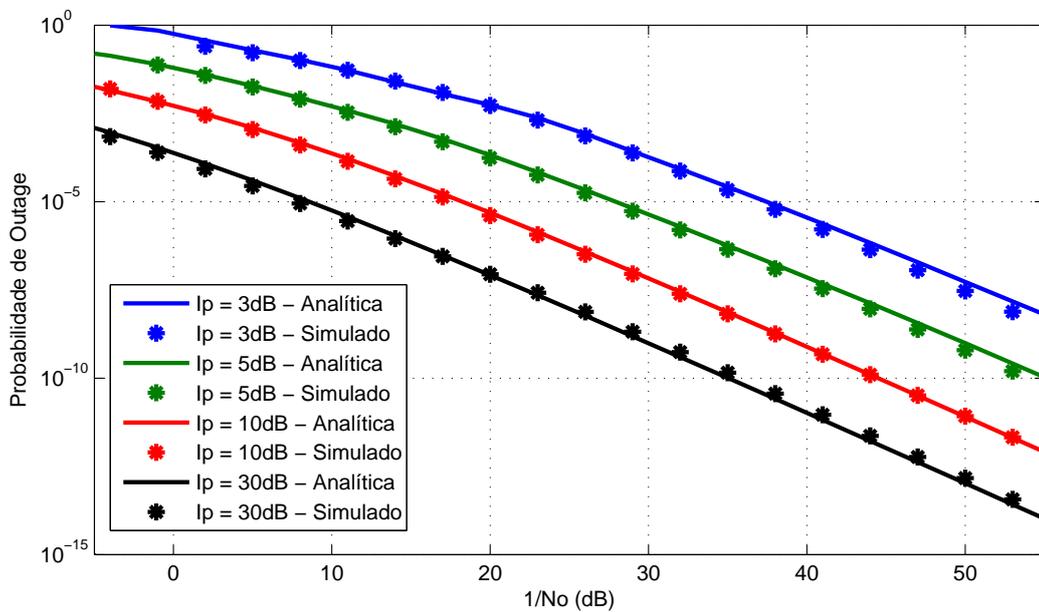
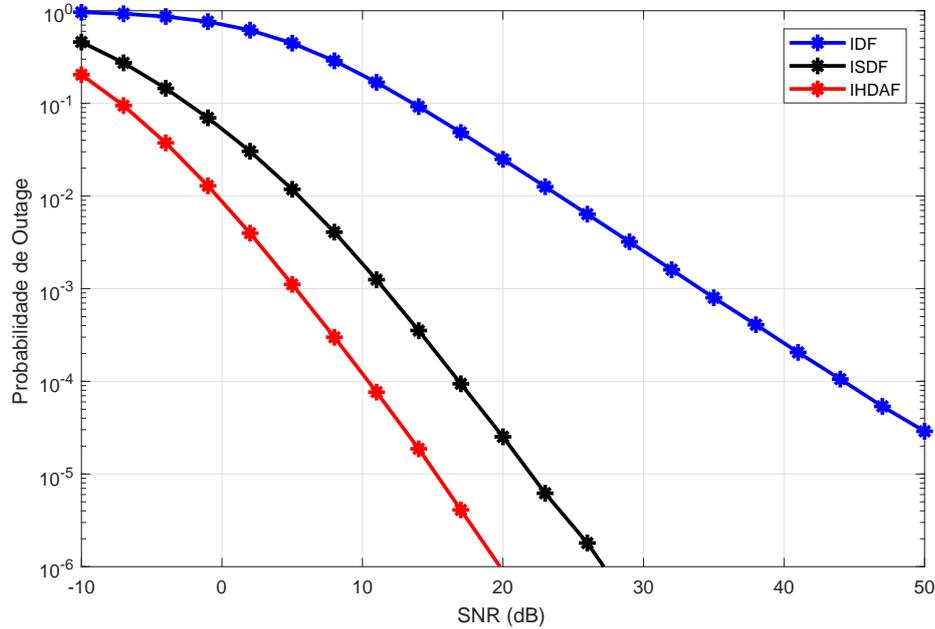


Figura 5.5 – Probabilidade de *outage* versus  $1/N_0$  para o protocolo IHDAF em um ambiente com compartilhamento espectral para diferentes valores de  $I_p$ .



pos de retransmissão incremental, propostos por outros autores na literatura: como a retransmissão incremental utilizando o protocolo DF (IDF) e a retransmissão incremental utilizando o protocolo DF Seletivo (ISDF). Os protocolos de retransmissão IDF e ISDF tem o seguinte modo de operação. A comunicação secundária ocorre em duas fases dife-

Figura 5.6 – Probabilidade de *outage* versus  $I_p/N_0$  para três protocolos de retransmissão incremental em um ambiente de compartilhamento espectral.

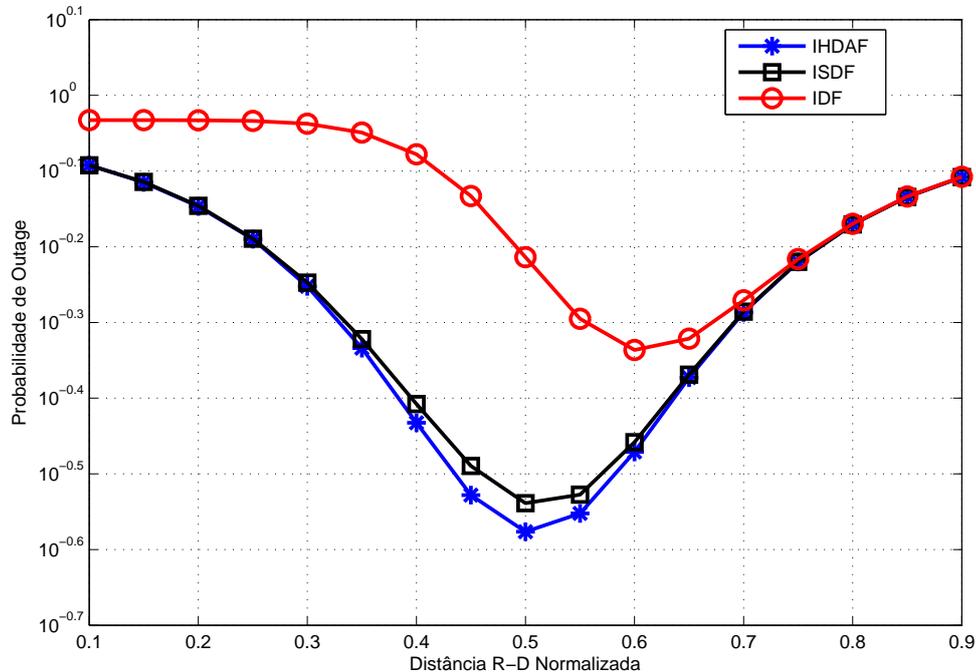


rentes. Na primeira fase S envia o sinal em *broadcast* para R e D simultaneamente. O terminal de destino decide se é ou não capaz de decodificar corretamente a mensagem enviada pela fonte com base em um limiar pré-estabelecido  $\gamma_{th}$ . Caso D consiga decodificar corretamente a mensagem enviada R permanece em silêncio e S envia uma nova mensagem na segunda fase. Caso contrário, a retransmissão torna-se necessária. Em IDF R trabalha utilizando o protocolo DF Fixo. Dessa forma, quando a retransmissão é necessária, o *relay* sempre decodifica, recodifica e retransmite a informação até o destino. Em ISDF R avalia a qualidade do sinal recebido da fonte com base no limiar  $\gamma_{th}$  e, somente se a SNR do *link* S-R exceder o limiar, R decodifica a mensagem recebida e a encaminha para D. Caso contrário, permanece em silêncio. No terminal de destino os sinais resultantes do enlace direto e do enlace auxiliar são combinados por meio da técnica MRC.

A Figura 5.6 mostra a probabilidade de *outage* versus a SNR média para os três protocolos de retransmissão incremental (IHDAF, IDF e ISDF) em um ambiente de compartilhamento espectral. O sistema proposto neste trabalho tem um melhor desempenho dos três, pois aproveita as vantagens do protocolo AF caso a qualidade do canal do *link* fonte-*relay* seja ruim, em contraste com os outros protocolos que sempre retransmitem a informação utilizando o protocolo DF.

A Figura 5.7 mostra a probabilidade de *outage* versus a distância entre o *relay* secundário e o destino secundário para três protocolos de retransmissão incremental (IHDAF, ISDF e IDF) em um ambiente de compartilhamento espectral, quando a distância entre o *relay* e o destino aumenta. Neste caso, manteve-se a fonte na posição

Figura 5.7 – Probabilidade de *outage* versus Distância *Relay*-Destino normalizada para três protocolos de retransmissão incremental em um ambiente de compartilhamento espectral para diferentes distâncias entre R e D,  $d_{RD}$ .



$(0, 0)$ , o destino  $(1, 0)$  e variou-se as coordenadas do *relay* entre  $(0.1, 0)$  e  $(0.9, 0)$ , ora aproximando, ora afastando o *relay* da fonte e do destino no eixo X. A retransmissão incremental híbrida IHDAF tem melhor desempenho frente aos protocolos ISDF e IDF, quando a  $d_{RD} < 0.7$ , e essa vantagem torna-se mais significativa com a diminuição de  $d_{RD}$ . Podemos observar também que a distância ótima do *relay* entre a fonte e o destino corresponde às probabilidades de *outage* mais baixas para os três protocolos e são diferentes, mas estão em torno da metade da distância entre S e D. Além disso, os três protocolos apresentam praticamente o mesmo desempenho de *outage* quando  $d_{RD} > 0.7$ . Esses resultados podem ser entendidos através da avaliação das condições de decodificação do *relay*. Se o *relay* está perto da fonte, então o sinal tem uma menor influência da perda de percurso e a qualidade dos sinais recebidos no *relay* é boa o suficiente para a decodificação correta. Quando a condição do canal do *link* fonte-*relay* é muito boa, a probabilidade de que o *relay* decodifique corretamente os sinais da fonte é alta. Nesse caso, o protocolo IHDAF obtém ganhos muito limitados em comparação com os outros protocolos. Assim, só pode obter vantagem marginal com a aplicação do esquema AF em outra fase de transmissão. Ao contrário, se o *relay* estiver próximo ao destino, a qualidade dos sinais obtidos pelo *relay* não é tão boa e as vantagens do protocolo IHDAF por selecionar o esquema AF na segunda fase serão significantes.

## 5.1 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados analíticos da expressão de probabilidade *outage* desenvolvida no Capítulo 4. Os resultados das simulações computacionais apresentadas nesse capítulo mostraram que as expressões analíticas tem uma boa precisão para a maioria dos casos. O desempenho do sistema proposto no trabalho foi avaliado em termos da perda de percurso, distância entre os nós da rede e influência do pico máximo de interferência suportado pelo usuário primário, apresentando resultados esperados. Além disso, os resultados obtidos mostraram a superioridade do esquema proposto em relação a outros dois protocolos de retransmissão incremental (IDF e ISDF) com compartilhamento espectral, em termos de *outage*. Finalmente, o comportamento do sistema foi avaliado para os três protocolos em relação à influência da distância do *relay* na rede secundária.

# Capítulo 6

## Conclusões e Perspectivas

Os sistemas cooperativos com compartilhamento espectral ganharam atenção considerável na comunidade científica nos últimos anos devido ao uso combinado de duas técnicas de comunicação sem fio promissoras: a diversidade cooperativa e o rádio cognitivo. De um lado a comunicação cooperativa melhora a confiabilidade da comunicação, promovendo diversidade espacial. De outro, o rádio cognitivo fornece uma maneira mais eficiente de melhorar a utilização do espectro, permitindo que usuários secundários acessem bandas de um espectro licenciado para usuários primários, aderindo a limitações de interferência nos usuários primários. A cooperação pode ser usada em redes rádio cognitivas para melhorar a capacidade de detecção do espectro em canais de comunicação sem fio através da detecção cooperativa. Além disso, as redes cooperativas também foram propostas em redes rádio cognitivas a fim de aumentar a taxa de transferência total e a cobertura das redes sem fio, utilizando duas abordagens: cooperação entre usuários primários e secundários e cooperação entre os usuários secundários.

Nessa dissertação, um sistema cooperativo cognitivo com compartilhamento espectral foi proposto, onde uma retransmissão incremental híbrida é utilizada na cooperação. O sistema é formado por duas redes: uma rede primária, representada por um usuário primário, e uma rede secundária, composta por uma fonte, um *relay* e um destino secundários, que compartilham o espectro de rádio. O sistema utiliza um paradigma cognitivo do tipo *underlay*, em que a potência de transmissão dos usuários secundários é limitada pela interferência suportada no usuário primário. Essa observação é definida como a oportunidade de transmissão do sistema. Uma vez que foi identificada a oportunidade de transmissão, a rede secundária pode realizar a comunicação, fazendo suas atividades transparentes ao usuário primário. A cooperação na rede secundária utiliza uma abordagem de retransmissão incremental, em que a retransmissão ocorre com base na qualidade dos canais fonte-destino e fonte-*relay*-destino.

O desempenho do sistema proposto ao longo desse trabalho foi avaliado através de uma expressão analítica para a probabilidade de *outage*, e validado através de si-

mulações de Monte Carlo apresentadas no Capítulo 5. Através das simulações avaliamos o efeito da perda de percurso dentro do sistema proposto e obtivemos os resultados esperados. O desempenho do sistema piora a medida que o coeficiente de perda de percurso aumenta. Avaliamos também a influência da localização do usuário primário em relação à rede secundária. A medida que P se afasta, a rede secundária sofre uma menor influência da perda de percurso desse terminal, e o sistema experimenta uma probabilidade de *outage* mais baixa. Além disso, analisamos a influência do pico máximo de interferência que o usuário primário pode tolerar. Como esperado, com restrições de interferência menos severas, o desempenho do sistema é melhorado.

Um dos pontos fortes e grande diferencial desse trabalho em relação à maioria dos trabalhos existentes na literatura que abordaram essa temática, é que no nosso caso o sistema cooperativo cognitivo com compartilhamento espectral utiliza retransmissão incremental híbrida, em que o nó *relay* ora retransmite o sinal no modo AF, ora retransmite no modo DF. A retransmissão incremental híbrida permite que os recursos da rede sejam aproveitados de maneira mais eficiente, de forma que se o canal do *link* direto S-D for suficientemente bom, a comunicação ocorre em uma única fase. Caso contrário, a retransmissão pelo *relay* será utilizada e a qualidade do *link* S-R determinará a forma de processamento do sinal pelo *relay*, se beneficiando dos protocolos AF e DF. Nossos resultados demonstraram que o sistema proposto utilizando retransmissão incremental híbrida obteve melhor desempenho quando comparado com o protocolo de retransmissão incremental DF e o protocolo de retransmissão incremental DF seletivo.

Em um trabalho futuro, o sistema apresentado e analisado aqui pode ser estendido para os seguintes casos:

- Expandir o sistema para o caso em que vários *relays* estão disponíveis na rede secundária e apenas um *relay* é selecionado com base em algum critério definido;
- Considerar o caso mais prático em que as potências de transmissão dos usuários secundários são limitadas de acordo com a restrição de interferência  $I_p$ , imposta pelo usuário primário, bem como os seus próprios picos de potência de transmissão.
- Considerar o caso mais prático em que os canais experimentem desvanecimento Nakagami- $m$ .
- Expandir o sistema para o caso em que a comunicação primária também interfira na comunicação secundária.
- Expandir o sistema para o caso em que vários nós secundários estão transmitindo ao mesmo tempo. Estudar protocolos e algoritmos para esse caso.



# Bibliografia

Spectrum policy task force report. 2002. URL

[hraunfoss.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/DOC-228542A1.pdf](http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-228542A1.pdf).

Networking Technology and Systems (NeTS) Program Solicitation. *National Science Foundation*, 2003. URL <http://www.nsf.gov/pubs/2005/nsf05505/nsf05505.htm>.

Akyildiz, I. F.; Lee, W.; Vuran, M. C.; Mohanty, S. A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks . *IEEE Communications Magazine*, v. 46, 2008.

Asghari, V.; Aissa, S. Performance of cooperative spectrum-sharing systems with amplify-and-forward relaying . *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 11, n. 4, p. 1295–1300, 2012.

Bai, Z.; Jia, J.; Wang, C. X.; Yuan, D. Performance Analysis of SNR-Based Incremental Hybrid Decode-Amplify-Forward Cooperative Relaying Protocol. *IEEE Transactions on Communications*, v. 63, n. 6, p. 2094–2106, 2015.

Bletsas, A.; Shin, H.; Win, M. Z. Cooperative Communications with Outage-Optimal Opportunistic Relaying. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 6, n. 9, 2007.

Chakrabarti, A.; Sabharwal, A.; Aazhang, B. *Cooperative Communications Fundamental Limits and Practical Implementation*. Springer Publishers, 2006.

Chang, Y.; Li, Y.; Si, Z.; Lu, Y.; Lin, J. Outage analysis of cognitive incremental DF relay network in Nakagami- $m$  fading channels . *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, p. 1–5, 2014.

Chen, H.; Liu, J.; Zhai, C.; Liu, Y. X. Performance of incremental selective decode-and-forward relaying cooperative communications over Rayleigh fading channels. *Proc. IEEE WCSP*, p. 1–6, 2009.

Cottatellucci, L.; Mestre, X.; Larsson, E. G.; Ribeiro, A. Cooperative Communications in Wireless Networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009.

Dohler, M.; Li, Y. Cooperative Communications Hardware, Channel and PHY. *John Wiley and Sons*, 2010.

Duong, T. Q.; Bao, V. N. Q.; Alexandropoulos, G. C.; Zepernick, H.J. Cooperative spectrum sharing networks with AF relay and selection diversity . *Electronics Letters*, v. 47, n. 20, p. 1149–1151, 2011.

Duong, T. Q.; Costa, D. B.; El Kashlan, M.; e Bao, V. N. Q. Cognitive amplify-and-forward relay networks over Nakagami- $m$  fading . *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, v. 61, n. 5, p. 2368–2374, 2012a.

Duong, T. Q.; Costa, D. B.; Tsiftsis, T. A.; Zhong, C.; Nallanathan, A. Outage and diversity of cognitive relaying systems under spectrum sharing environments in Nakagami- $m$  fading . *IEEE Communications Letters*, v. 16, n. 12, p. 2075–2078, 2012b.

Duong, T. Q.; Costa, D. B.; Tsiftsis, T. A.; Zhong, C.; Nallanathan, A. Outage and diversity of cognitive relaying systems under spectrum sharing environments in Nakagami- $m$  fading. *IEEE Communications Letters*, v. 16, n. 12, 2012c.

Duong, T. Q.; Zepernick, H. J. On the performance gain of hybrid decode-amplify-forward cooperative communications. *EURASIP Journal Wireless Communications*, p. 1–6, 2009.

Fei, L.; Qinghua, L.; , L.; Guangxin, Y. Impact of Relay Location According to SER for Amplify-and-Forward Cooperative Communications. *IEEE International Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification*, p. 324 – 327, 2007.

Garcia, A. L. *Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering*. Pearson Prentice Hall, 3. ed., 2008.

Ghasemi, A.; Sousa, E. S. Fundamental Limits of Spectrum-Sharing in Fading Environments . *IEEE Transactions On Wireless Communications*, v. 6, n. 2, 2007.

Goldsmith, A.; Jafar, S.A.; Maric, I.; Srinivasa, S. Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, p. 894–914, 2009.

Gradshteyn, I. S.; Ryzhik, I. M. *Table of Integrals, Series, and Products*. Academic, 6th ed., 2000.

Group, DARPA XG Working. The XG Vision, Request For Comments. *BBN Technologies*, 2003.

Haykin, S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, v. 23, n. 2, p. 201 – 220, 2005.

Ikki, S.; Ahmed, M. H. Performance analysis of incremental relaying cooperative diversity networks over Rayleigh fading channels. *IET Communications*, v. 5, n. 3, p. 337–349, 2011.

Jaafar, W.; Ajib, W.; Haccoun, D. Incremental relaying transmissions with relay selection in cognitive radio networks . *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, p. 1230–1235, 2012.

Kolodzy, P. Next Generation Spectrum Access Technologies. *FCC Workshop Cognitive Radio*, 2001.

Laneman, J. N. *Chapter 1 COOPERATIVE DIVERSITY Models, Algorithms, and Architectures*. Department of Electrical Engineering, University of Notre Dame, 2004.

Laneman, J. N.; Tse, D. N. C.; Wornell, G. W. Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, 2004.

Lee, I. H.; Kim, D. Ber analysis for decode-and-forward relaying in dissimilar rayleigh fading channels. *IEEE Communications Letters*, v. 11, n. 1, p. 52–54, 2007.

Lee, J.; Wang, H.; Andrews, J. G.; Hong, D. Outage Probability of Cognitive Relay Networks with Interference Constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 10, p. 390 – 395, 2011.

Letaief, K. B.; Zhang, W. Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, p. 878 – 893, 2009.

Li, J. C. F.; Zhang, W.; Yuan, J. Opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks based on primary limited feedback. *IEEE Transactions Communications*, v. 59, n. 12, p. 3272–3277, 2011.

Liu, K. J. R.; Sadek, A. K.; Su, W.; Kwasinski, A. *Cooperative Communications and Networking*. Cambridge University Press, 1. ed., 2008.

Liu, T. X.; Song, L. Y.; Li, Y. H.; Huo, Q.; Jiao, B. L. Performance analysis of hybrid relay selection in cooperative wireless systems. *IEEE Transactions Communications*, v. 60, n. 3, p. 779–788, 2012.

Liu, W.; Zhou, D. Impact of Reception Combining on Performance of Amplify-and-Forward Protocol. *2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC)*, v. 3, 2010.

Maham, B.; Popovski, R.; Zhou, X.; Hjoungnes, A. Cognitive multiple access network with outage margin in the primary system . *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 10, p. 3343–3353, 2011.

Manna, R. F.; Louie, R. H. Y.; Li, Y.; Vucetic, B. Cooperative spectrum sharing in cognitive radio networks with multiple antennas. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 59, n. 11, p. 5509–5522, 2011.

McHenry, M. Frequency agile spectrum access technologies. *FCC Workshop Cognitive Radio*, 2003.

Meier, A.; Thompson, J. S. Cooperative Diversity in Wireless Networks. *6th IEEE International Conference on 3G and Beyond*, 2005.

Menghwar, G. D.; Mecklenbrauker, C. F. Cooperative versus Non-cooperative Communications. *2nd International Conference on Computer, Control and Communication*, 2009.

Mishra, S. M.; Sahai, A.; Brodersen, R. W. Cooperative Sensing among Cognitive Radios. *IEEE International Conference on Communications*, 2006.

Mitola, J. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communications*, v. 6, n. 4, p. 13 – 18, 1999.

Mitola, J. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.

Nosratinia, A.; Hedayat, A.; Hunter, T. E. Cooperative Communication in Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 10, p. 74–80, 2004.

Pabst, R.; et al. Relay-based deployment concepts for wireless and broadband radio. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 9, p. 80–89, 2004.

Quoc, B. V. N.; Kong, H. Y.; Dinh, C. H.; Tien, T. L. Ber performance of decode-and-forward relaying using selection combining over rayleigh fading channels. *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, p. 301–304, 2008.

Sendonaris, A.; Erkip, E.; Aazhang, B. User cooperation diversity - Part I: System description. *IEEE Transactions Communication*, v. 51, p. 1927 – 1938, 2003a.

Sendonaris, A.; Erkip, E.; Aazhang, B. User cooperation diversity - Part II: Implementation aspects and performance analysis. *IEEE Transactions Communications*, v. 51, p. 1939–1948, 2003b.

Simeone, O.; Gambini, J.; Bar-Ness, Y.; Spagnolini, U. Cooperation and cognitive radio. *IEEE International Conference on Communications*, 2007.

Srinivasa, S.; Jafar, S. A. The Throughput Potential of Cognitive Radio: A Theoretical

Perspective . *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 5, 2007.

Tourki, K.; Qaraqe, K. A.; Alouini, M. S. Outage analysis for underlay cognitive networks using incremental regenerative relaying . *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, v. 62, n. 2, p. 721–734, 2013.

Wang, B.; Liu, K. J. R. Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey . *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, v. 5, p. 5 – 23, 2011.

Wang, Z.; Zhang, W. Opportunistic spectrum access in cognitive relay networks based on white space modeling. *Proc. IEEE Globecom*, p. 1–5, 2010.

Xing, Y.; Mathur, C. N.; Haleem, M. A.; Chandramouli, R.; Subbalakshmi, K.P. Dynamic Spectrum Access with QoS and Interference Temperature Constraints. *IEEE Transactions On Mobile Computing*, v. 6, n. 4, p. 423 – 433, 2007.

Xu, L.; Tonjes, R.; Paila, T.; Hansmann, W.; Frank, M.; Albrecht, M. DRiVE-ing to the Internet: Dynamic radio for IP services in vehicular environments. *IEEE Conf. Local Computer Networks*, p. 281–289, 2000.

Zhang, Q.; Jia, J.; Zhang, J. Cooperative Relay to Improve Diversity in Cognitive Radio Networks . *IEEE Communications Magazine*, v. 47, p. 111 – 117, 2009.

Zhao, Q.; Sadler, B. M. A Survey of Dynamic Spectrum Access . *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007.

Zhao, Q.; Swami, A. A Survey Of Dynamic Spectrum Access: Signal Processing And Networking Perspectives . *IEEE International Conference on Acoustics*, 2007.

Zhong, C.; Ratnarajah, T.; Wong, K. K. Outage analysis of decode-and-forward cognitive dual-hop systems with the interference constraint in Nakagami-m fading channels . *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, v. 60, n. 6, p. 2875–2879, 2011.