



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

# **Técnicas de Seleção de Nós em Redes Cooperativas Cognitivas com Compartilhamento Espectral**

*Dissertação de Mestrado*

**Francisco Rafael Vasconcelos Guimarães**

FORTALEZA – CEARÁ  
AGOSTO 2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

# **Técnicas de Seleção de Nós em Redes Cooperativas Cognitivas com Compartilhamento Espectral**

**Autor**

**Francisco Rafael Vasconcelos Guimarães**

*Dissertação apresentada à  
Coordenação do Programa de  
Pós-graduação em Engenharia de  
Teleinformática da Universidade  
Federal do Ceará como parte dos  
requisitos para obtenção do grau  
de **Mestre em Engenharia de  
Teleinformática**. Orientador: Prof.  
Dr. Daniel Benevides da Costa*

FORTALEZA – CEARÁ  
AGOSTO 2013

# Resumo

Nesta dissertação, o desempenho de sistemas cooperativos cognitivos com compartilhamento espectral é investigado. Uma estratégia de seleção de nós de baixa complexidade e alto desempenho é proposta para dois modelos distintos de redes cooperativas cognitivas. No primeiro modelo, a rede secundária é composta por um nó fonte que comunica-se com um dentre  $L$  nós destinos através de um *link* direto e através de um dentre  $N$  nós *relays* decodifica-e-encaminha (DF) ou amplifica-e-encaminha (AF). O nó destino secundário selecionado emprega uma técnica de combinação por seleção para selecionar o melhor *link* (direto ou auxiliar) a partir da fonte secundária. Considerando um ambiente com compartilhamento espectral, tem-se que a comunicação secundária é realizada levando em consideração uma restrição de interferência, na qual a potência de transmissão é governada pela interferência no receptor primário bem como pela máxima potência de transmissão dos respectivos nós secundários. Uma análise assintótica é realizada, revelando que a ordem de diversidade do sistema não é afetada pela interferência, sendo igual a  $L + N$ . Já no segundo modelo, a rede secundária é composta por uma fonte,  $N$  *relays* DF ou AF e um nó destino, no entanto assume-se a presença de  $M$  receptores primários. A seleção do *relay* deve satisfazer as restrições de interferência impostas por estes últimos. Após a seleção de *relay* ser realizada, o nó destino seleciona o melhor caminho (*link* direto ou *link* via *relay*) proveniente da fonte utilizando um combinador por seleção. Uma análise assintótica é realizada, revelando que a ordem de diversidade do esquema proposto iguala a  $N + 1$ , o que mostra que a mesma não é afetada nem pelo número de receptores primários nem pelo limiar de interferência. Uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* é obtida para ambos protocolos cooperativos. Simulações Monte Carlo são apresentadas com o intuito de validar as análises propostas.

**Palavras chaves:** Análise assintótica, compartilhamento espectral, probabilidade de *outage*, redes cooperativas cognitivas, seleção de nós.

# Abstract

In this dissertation, the performance of cooperative cognitive systems with spectrum sharing is investigated. A low-complexity and high performance node selection strategy is proposed for two different of cooperative cognitive systems models. In the first model, the secondary network is composed by one source node that communicates with one among  $L$  destinations through a direct link and also assisted by one among  $N$  AF or DF relays nodes. The selected secondary destination employs a selection combining technique for choosing the best link (direct or dual-hop link) from the secondary source. Considering an underlay spectrum sharing approach, the secondary communication is performed taking into account an interference constraint, where the overall transmit power is limited by the interference at the primary receiver as well as by the maximum transmission power available at the respective nodes. An asymptotic analysis is carried out, revealing that the diversity order of the considered system is not affected by the interference, and equals to  $L + N$ . In the second model, by its turn, the secondary network is composed by one source,  $N$  AF or DF relays, and one destination. However, it is assumed the presence of  $M$  primary receivers. A relay selection strategy is proposed with the aim of maximizing the end-to-end signal-to-noise ratio and, at the same time, to satisfy the interference constraints imposed by these primary receivers. After the relay selection procedure is performed, the secondary destination chooses the best path (direct link or relaying link) by employing a selection combining scheme. An asymptotic analysis is carried out, revealing that the system diversity order equals to  $N + 1$ , and showing that it is not affected neither by the number of primary receivers nor by the interference threshold. A close-form expression and an approximation for the outage probability is derived for the DF and AF protocols, respectively. Monte Carlo simulation are presented to corroborate the proposed analysis.

**Keywords:** Asymptotic analysis, spectrum sharing, outage probability, cooperative cognitive networks, node selection.

*...aos meus pais, Mazé e Assis, meu irmão, Danilo, e minha namorada, Aline.*

# Agradecimentos

Primeiro de tudo, gostaria de agradecer a Deus, pelo apoio espiritual nas horas difíceis que passei durante o período de mestrado. Aos meus pais, Mazé e Assis Guimarães, pelo suporte, amor, carinho, sem os quais eu nunca teria chegado aonde cheguei. A meu irmão Danilo Guimarães, pelo companheirismo. À minha namorada, Aline Memória, por todo apoio incondicional, carinho, amor, compreensão, por estar ao meu lado durante todos os momentos desta trajetória.

Ao prof. Dr. Charles Casimiro Cavalcante, por ter aceito ser meu orientador durante o mestrado a priori, entretanto, devido às suas funções, não pode prosseguir com a orientação, mas, mesmo assim, continuou me apoiando e me tirando as dúvidas que surgiam.

Queria agradecer ao prof. Dr. Daniel Benevides da Costa por ter assumido o posto de orientador, pelos conselhos, por acreditar no meu potencial e que esta dissertação seria possível e por toda ajuda durante o curso de mestrado de Engenharia de Teleinformática.

Aos meus amigos e companheiros do Grupo de Telecomunicações Sem Fio - GTEL, Diego Aguiar, Igor Flávio, Juan Medeiros, Jordan Paiva, pela amizade e apoio durante o processo de escrita da minha dissertação. Ao prof. Dr. Rodrigo Cavalcanti pela oportunidade que me foi dada dentro do GTEL.

Quero agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro que tive durante esse período.

Por último, mas não menos importante, meus amigos leais que me ajudaram com sua amizade: Harley Carvalho, Kássio Chaves, Rafael de Mesquita, Bruno Sales, Ítalo Cavalcante, André Melo.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto do Problema . . . . .	1
1.2 Motivação e Objetivos . . . . .	2
1.3 Notações e Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2 Diversidade Cooperativa e Sistemas Rádio-Cognitivo</b>	<b>4</b>
2.1 Sistemas Cooperativos . . . . .	4
2.1.1 Vantagens e Desvantagens da Diversidade Cooperativa . . . . .	7
2.1.2 Protocolos Cooperativos . . . . .	8
2.2 Técnicas de seleção de <i>relay</i> . . . . .	11
2.3 Rádio-Cognitivo . . . . .	12
2.3.1 Compartilhamento Espectral . . . . .	13
2.3.2 Paradigmas das Redes Rádio-Cognitivo (RC) . . . . .	15
2.4 Trabalhos Relacionados . . . . .	16
<b>3 Redes Cooperativas Cognitivas Multi-Relay : Vários Destinos e um Receptor Primário</b>	<b>18</b>
3.1 Modelo Sistêmico e Descrição do Esquema de Comunicação . . . . .	19
3.2 Probabilidade de <i>Outage</i> . . . . .	22
3.2.1 Protocolo Cooperativo DF . . . . .	23
3.2.2 Protocolo Cooperativo AF . . . . .	27
3.3 Análise Assintótica . . . . .	31
<b>4 Redes Cooperativas Cognitivas Multi-Relay : Um Destino e Vários Receptores Primários</b>	<b>33</b>
4.1 Modelo Sistêmico e Descrição do Esquema de Comunicação . . . . .	34

4.2	Probabilidade de <i>outage</i> . . . . .	36
4.2.1	Protocolo Cooperativo DF . . . . .	36
4.2.2	Protocolo Cooperativo AF . . . . .	39
4.3	Análise Assintótica . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Resultados Numéricos, Simulações e Discussões</b>	<b>44</b>
5.1	Redes Cooperativas Cognitivas Multi- <i>Relay</i> : Vários Destinos e um Receptor Primário . . . . .	44
5.2	Redes Cooperativas Cognitivas Multi- <i>Relay</i> : Um Destino e Vários Receptores Primários . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b>	<b>53</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>55</b>



# Lista de Figuras

2.1	Comunicação cooperativa através de um usuário <i>relay</i> . . . . .	5
2.2	Ganho de cobertura dos sistemas cooperativos. . . . .	6
2.3	Protocolo cooperativo Amplifica-e-Encaminha. . . . .	9
2.4	Protocolo cooperativo Decodifica-e-Encaminha. . . . .	10
2.5	Seleção de <i>relay</i> . . . . .	11
2.6	Estratégias de compartilhamento espectral. . . . .	13
3.1	Modelo sistêmico da rede cooperativa cognitiva multi- <i>relay</i> com $L$ destinos e um receptor primário. . . . .	19
4.1	Modelo sistêmico de uma rede cooperativa cognitiva multi- <i>relay</i> na presença um nó destino secundário e $M$ receptores primários. . . . .	34
5.1	Probabilidade de <i>outage</i> e comportamento assintótico para diferentes combinações de <i>relays</i> e destinos secundários para o protocolo DF ( $I = Q = 0.5$ ). . . . .	45
5.2	Probabilidade de <i>outage</i> e comportamento assintótico para diferentes combinações de <i>relays</i> e destinos secundários para o protocolo AF ( $I = Q = 0.5$ ). . . . .	45
5.3	Probabilidade de <i>outage</i> para diferentes combinações de <i>relays</i> e destinos secundários para o protocolo DF ( $I = Q = 0.5$ ). . . . .	46
5.4	Probabilidade de <i>outage</i> para diferentes combinações de <i>relays</i> e destinos secundários para o protocolo AF ( $I = Q = 0.5$ ). . . . .	47
5.5	Impacto da restrição de interferência no comportamento do sistema para o protocolo DF. . . . .	47
5.6	Impacto da restrição de interferência no comportamento do sistema para o protocolo AF. . . . .	48
5.7	Análise comparativa de <i>outage</i> entre os protocolos DF e AF quando $Q = I = 0.5$ . . . . .	48

5.8	Análise comparativa de <i>outage</i> entre os protocolos DF e AF quando a probabilidade de <i>outage</i> satura. . . . .	49
5.9	Probabilidade de <i>outage</i> e comportamento assintótico para diferentes números de receptores primários para o protocolo DF ( $N = 3, I/N_0 = Q/N_0$ ). . . . .	50
5.10	Probabilidade de <i>outage</i> e comportamento assintótico para diferentes números de receptores primários para o protocolo AF ( $N = 3, I/N_0 = Q/N_0$ ). . . . .	50
5.11	Probabilidade de <i>outage</i> e comportamento assintótico para diferentes números de <i>relays</i> para o protocolo DF ( $M = 3, I/N_0 = Q/N_0$ ). . . . .	51
5.12	Probabilidade de <i>outage</i> e comportamento assintótico para diferentes números de <i>relays</i> para o protocolo AF ( $M = 3, I/N_0 = Q/N_0$ ). . . . .	51
5.13	Impacto da restrição de interferência na probabilidade de <i>outage</i> para o protocolo DF ( $M = 3, N = 3$ ). . . . .	52
5.14	Impacto da restrição de interferência na probabilidade de <i>outage</i> para o protocolo AF ( $M = 5, N = 3$ ). . . . .	52

# Lista de Tabelas

2.1 Valores típicos para o coeficiente de perda de percurso. . . . .	7
--	---

# Lista de Acrônimos

<b>AF</b>	Amplify-and-Forward
<b>Anatel</b>	Agência Nacional de Telecomunicações
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>CDF</b>	Cumulative Density Function
<b>CF</b>	Compress-and-Forward
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>DC</b>	Diversidade Cooperativa
<b>DF</b>	Decode-and-Forward
<b>FD</b>	Fixed Decode-and-Forward
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>IDF</b>	Incremental Decode-and-Forward
<b>i.i.d</b>	independent identically distributed
<b>MIMO</b>	multiple transmit and receive antennas
<b>MRC</b>	Maximal-ratio combining
<b>NTIA</b>	National Telecommunications and Information Administration
<b>OR</b>	Opportunistic Relaying
<b>PARS</b>	Power Aware Relay Selection
<b>PDF</b>	Probability Density Function
<b>QoS</b>	Quality of Service

<b>RC</b>	Rádio-Cognitivo
<b>RCC</b>	Rede Cooperativa Cognitiva
<b>SC</b>	Selection Combining
<b>SCCCE</b>	Sistemas Cooperativos Cognitivos com Compartilhamento Espectral
<b>SDF</b>	Selective Decode-and-Forward
<b>SENS</b>	Switch-and-examine node selection
<b>SNR</b>	signal-to-noise ratio
<b>TDMA</b>	Time-Division Multiple Access
<b>UWB</b>	ultra-wide-band
<b>VA</b>	variável aleatória
<b>WZC</b>	Wyner-Ziv coding

# Lista de Publicações

## ► Artigos Aceitos

F. R. V. Guimarães, D. B. da Costa, M. Benjillali, T. A. Tsiftsis and G. K. Karagiannidis *Best Relay Selection in Cooperative Spectrum Sharing Systems with Multiple Primary Users. IEEE International Conference on Communications - ICC2013, 9-14 de Junho de 2013, Budapeste, Hungria.*

F. R. V. Guimarães, D. B. da Costa, C. C. Cavalcante *Redes Cooperativas Cognitivas Multi-Usuário com Compartilhamento Espectral. XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT2013, 1-4 de Setembro de 2013, Fortaleza, CE*

F. R. V. Guimarães, D. B. da Costa, C. C. Cavalcante *Seleção de Relay em Sistemas Cooperativos Cognitivos com Múltiplos Usuários Primários. XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT2013, 1-4 de Setembro de 2013, Fortaleza, CE*

F. R. V. Guimarães, D. B. da Costa, C. C. Cavalcante, T. A. Tsiftsis and G. K. Karagiannidis *Multi-User and Multi-Relay Cognitive Radio Networks Under Spectrum Sharing Constraints. IEEE Transactions on Vehicular Technology*

## ► Artigos em Revisão

F. R. V. Guimarães, D. B. da Costa, M. Benjillali, T. A. Tsiftsis and G. K. Karagiannidis *Cooperative Spectrum Sharing Systems with Relay Selection in the Presence of Multiple Primary Receivers. Submetido na revista IET Communications*

# Introdução

## 1.1 Contexto do Problema

As tecnologias sem fio vêm evoluindo rapidamente ao longo das duas últimas décadas e tornam-se cada vez mais populares devido à comodidade e facilidade ao acesso à informação a qualquer hora e em qualquer lugar. Com esta popularização, aumentou-se a demanda por novos serviços e aplicações, gerando uma necessidade de altas taxas de transmissão de dados bem como sistemas mais confiáveis.

$$\beta_{KJ}^I \triangleq \frac{1}{E[|h_{KJ}|^2]/N_0} \quad (1.1)$$

Dentro deste mesmo cenário, observou-se uma escassez do espectro de frequência devido a um crescimento exponencial dos dispositivos e serviços de comunicação sem fio. Isto pode ser comprovado através do mapa de frequências alocadas feito pela *National Telecommunications and Information Administration* (NTIA)<sup>1</sup>, nos Estados Unidos, e pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), no Brasil<sup>2</sup>. Nestes mapas observa-se que grande parte do espectro de frequência já foi alocado, restando apenas pouca largura de banda disponível para novos produtos e serviços sem fio emergentes.

Nesse sentido, duas técnicas promissoras, chamadas Diversidade Cooperativa (DC) [3, 4] e Rádio-Cognitivo (RC) [5], foram propostas e, a partir delas, um grande número de estudos vêm sendo desenvolvidos.

A ideia da DC é emular, em um sistema constituído por dispositivos com uma única antena, um arranjo de antenas virtuais através da transmissão e do processamento distribuído da informação, de forma que os mesmos benefícios obtidos em sistemas com múltiplas antenas (MIMO, do inglês *multiple transmit and receive antennas*) possam ser conseguidos em sistemas

<sup>1</sup>Disponível em [1].

<sup>2</sup>Disponível em [2].

com dispositivos com uma única antena.

**RC**, por sua vez, surgiu como uma técnica promissora [6] para o uso mais eficiente do espectro de frequência. Em particular, em sistemas **RC** com compartilhamento espectral [7], os usuários não-licenciados (chamados de usuários secundários) é permitido aos usuários acessarem de forma simultânea o espectro inicialmente alocado para os usuários licenciados (chamados de usuários primários), de tal forma que a interferência gerada pelo sistema secundário no sistema primário permaneça abaixo de um limiar predefinido, levando assim a um ajuste da potência de transmissão dos nós secundários de acordo com este limiar estabelecido pela rede primária.

## 1.2 Motivação e Objetivos

---

Como visto na seção anterior, cada vez mais se faz necessário o desenvolvimento de sistemas que atinjam altas taxas de transmissão ao mesmo tempo em que possuam um alto grau de confiabilidade. Por outro lado, é sabido que, para alcançar tais desempenhos, é necessário o uso eficiente dos recursos disponíveis para a comunicação. O espectro de frequência é um recurso limitado e nem sempre a rede de comunicação é detentora do uso deste recurso. A fim de preencher tais requisitos, Redes Cooperativas Cognitivas (**RCC**) vêm sendo cada mais utilizadas, pois com a **DC** é possível alcançar os ganhos oferecidos pelos sistemas **MIMO**, já o **RC** permite o acesso de um usuário ao espectro de frequência pertencente a um outro usuário, propiciando assim o uso mais eficiente deste espectro.

O objetivo desta dissertação é propor um esquema de seleção de nós eficiente e de baixa complexidade para **RCCs** com compartilhamento espectral. Vale ressaltar que, em redes mais densas, a redução do número de estimação de canais, gerada pelo uso de um método de seleção de nós menos complexo, provoca uma redução considerável no desempenho do processamento de dados. Em nossa análise, dois protocolos cooperativos são empregados: decodifica-e-encaminha (**DF**, do inglês *Decode-and-Forward*) e o amplifica-e-encaminha (**AF**, do inglês *Amplify-and-Forward*) de ganho variável em dois cenários distintos.

Para cada um dos cenários propostos, é apresentada uma técnica de seleção de nós eficiente na rede secundária. Será desenvolvida uma formulação analítica exata e uma aproximada para a probabilidade de *outage* dos protocolos **DF** e **AF**, respectivamente. Através de uma análise assintótica, é mostrado que as restrições de potência impostas pelos receptores da rede primária não afetam a ordem de diversidade do sistema. Entretanto, esta restrição provoca um saturamento na probabilidade de *outage* de cada



sistema. As formulações analíticas são validadas através de comparação com resultados obtidos por meio de simulação Monte Carlo.

### 1.3 Notações e Estrutura da Dissertação

---

Ao longo desta dissertação,  $f_Z(\cdot)$ ,  $F_Z(\cdot)$  e  $F_Z(\cdot|\cdot)$  denotam, respectivamente, a função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *Probability Density Function*), a função de distribuição acumulada (CDF, do inglês *Cumulative Density Function*) e a CDF condicional de uma variável aleatória (VA) arbitrária  $Z$ ,  $E[\cdot]$  denota esperança estatística e  $\Pr(\cdot)$  denota probabilidade.

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

**Capítulo 2** – neste capítulo é apresentada a base teórica utilizada na metodologia deste trabalho. São apresentados e descritos os conceitos básicos de comunicações cooperativas e sistemas rádio-cognitivo. Trabalhos relacionados ao tema também são descritos neste capítulo.

**Capítulo 3** – neste capítulo é apresentado o primeiro modelo sistêmico proposto, sendo composto por um usuário secundário fonte,  $N$  usuários secundários *relays*,  $L$  usuários secundários destinos e um receptor primário. É apresentado um esquema eficiente de seleção de nós da rede secundária, a partir do qual, são desenvolvidas formulações analíticas para a probabilidade de *outage* para os protocolos DF e AF de ganho variável. Baseado nestas formulações, a ordem de diversidade sistêmica é determinada.

**Capítulo 4** – neste capítulo é apresentado o segundo modelo sistêmico proposto. Diferentemente do primeiro, este modelo apresenta apenas um usuário secundário destino, mas, em contrapartida, a rede primária é formada por  $M$  receptores primários. É apresentado um esquema de seleção de *relays* baseado nas restrições impostas por cada usuário primário e, a partir deste esquema, uma formulação analítica para a probabilidade de *outage* para ambos os protocolos cooperativos será desenvolvida. Uma análise assintótica é feita com o intuito de determinar a ordem de diversidade do sistema considerado.

**Capítulo 5** – neste capítulo resultados numéricos são apresentados a fim de validar as formulações desenvolvidas no Capítulo 3 e no Capítulo 4. Estes resultados são obtidos através de simulações de Monte Carlo.

**Capítulo 6** – neste capítulo são feitas as conclusões do trabalho.

# Diversidade Cooperativa e Sistemas Rádio-Cognitivo

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos de sistemas cooperativos e de sistemas [RC](#) a fim de fundamentar a análise proposta nos capítulos seguintes.

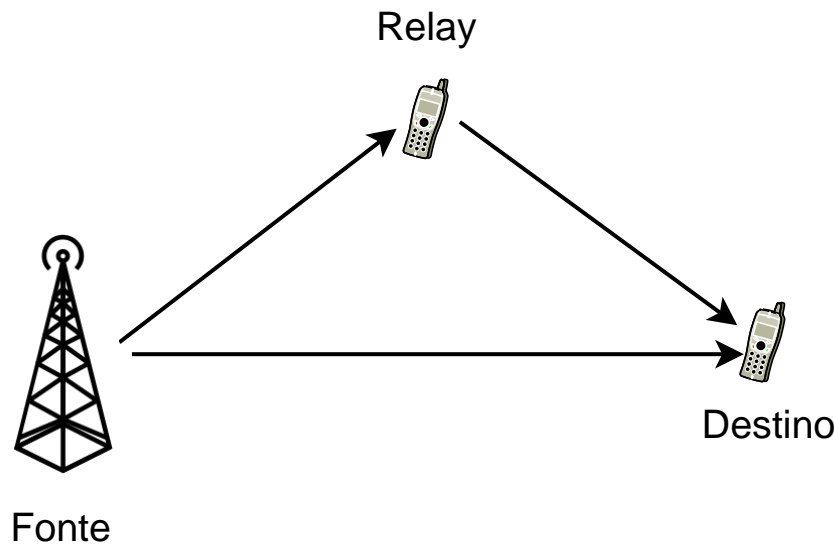
## 2.1 Sistemas Cooperativos

---

Um sistema cooperativo elementar é formado por três nós, um nó fonte que envia a informação para um nó destino, e um terceiro nó, chamado *relay*, que ajuda a fonte na transmissão de sua informação, como visto na Figura 2.1. Entretanto, este conceito pode ser estendido para diversas configurações de rede. A ideia de se utilizar um canal retransmissor para assistir a transmissão da informação entre uma fonte e um destino foi proposto inicialmente por Van Der Meulen [8, 9]. Cover e Gamal [10] apresentaram a ideia de comunicação cooperativa para um canal *relay*, onde foi analisada a capacidade de uma rede cooperativa composta por um nó *relay*.

Com os resultados alcançados pelos sistemas [MIMO](#) [11–13], tornou-se desejável o uso de múltiplas antenas em transceptores sem fio modernos para obtenção de ganhos de diversidade espacial e capacidade. Entretanto, o tamanho e o custo dos dispositivos sem fio em diversas aplicações fazem com que a utilização de múltiplas antenas seja impraticável em certas situações. Neste caso, a utilização da cooperação entre nós da mesma rede de tal forma que estes nós emulem um sistema de múltiplas antenas virtuais torna-se uma alternativa desejável e promissora [14]. Portanto, através do uso da [DC](#), pode-se obter os benefícios de um sistema [MIMO](#), explorando os ganhos da diversidade espacial, tais como cobertura, aumento da confiabilidade e da capacidade de transmissão (Figura 2.2).

Outra razão para o uso da [DC](#) se dá pelo fato de, ao se adicionar um nó



**Figura 2.1:** Comunicação cooperativa através de um usuário *relay*.

*relay* na rede, o poder computacional da rede, bem como a potência fornecida, podem ser divididos entre fonte e *relay*, levando a uma economia dos recursos globais da rede [15].

O uso da DC leva a vários ganhos, os três mais importantes serão descritos na sequência [16]

► Ganho de perda de percurso

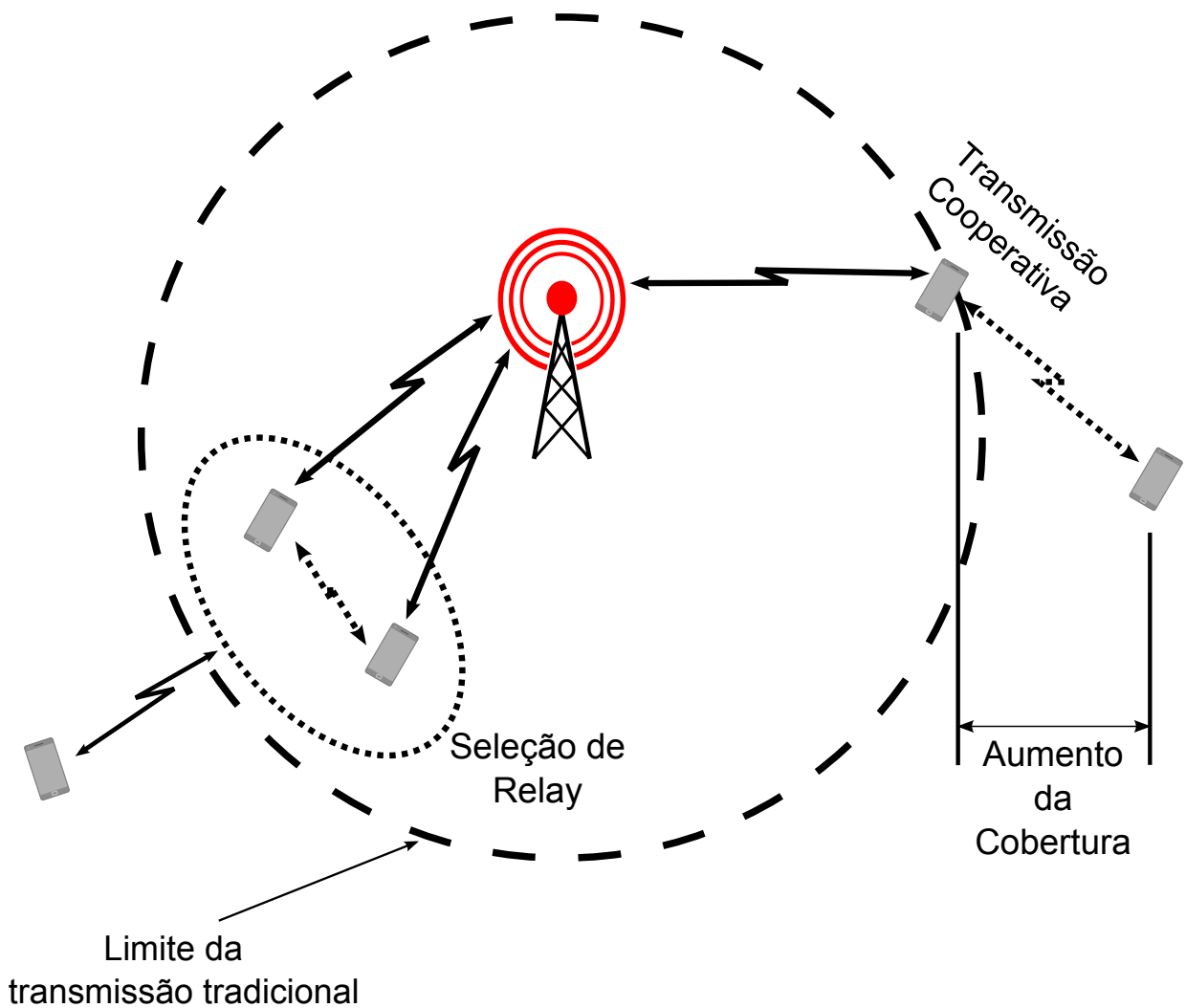
Devido ao comportamento não linear da perda de percurso, ganhos de potência podem ser obtidos com o uso da DC. Sabe-se que a soma da perda de percurso de um *link* dividido é menor do que a perda do *link* em sua totalidade. Isso leva a um aumento da cobertura da comunicação sem a necessidade de aumentar a potência transmitida. Matematicamente falando, a razão-sinal ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*), é inversamente proporcional a distância de propagação [16], isto é,

$$\text{SNR} \propto \frac{1}{d^\alpha}, \quad (2.1)$$

em que  $d$  é a distância e  $\alpha$  é o coeficiente de perda de percurso e seu valor depende do ambiente em que a informação se propaga. Valores típicos de  $\alpha$  são mostrados na Tabela 2.1.

► Ganho de Diversidade

A transmissão de múltiplas cópias do mesmo sinal via canais independentes resulta no ganho de diversidade. Este ganho vem do fato de, ao receber cópias provenientes de canais independentes, a probabilidade de todas elas estarem erradas diminui. Portanto, há um aumento da confiabilidade do sistema.



**Figura 2.2:** Ganho de cobertura dos sistemas cooperativos.

O ganho de diversidade [18],  $G_d$ , é determinado pela inclinação da taxa de decaimento da probabilidade de *outage* em altas SNRs para uma escala log-log. Em termos matemáticos [19],

$$G_d = - \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\log P_{\text{out}}}{\log \gamma}, \quad (2.2)$$

em que  $P_{\text{out}}$  é a probabilidade de *outage*, ou seja, a probabilidade de que  $\gamma$ , a SNR média do sistema, esteja abaixo de um certo limiar .

#### ► Ganho de Multiplexação

Em um regime assintótico de SNR, a taxa de dados alcançável,  $R$ , é proporcional ao logaritmo da SNR, ou seja [20],

$$R = r \log_2 \text{SNR} + \text{constante}, \quad (2.3)$$

em que  $r$  é a taxa ou o ganho de multiplexação e é igual ao grau de

**Tabela 2.1:** Valores típicos para o coeficiente de perda de percurso.

Ambiente	Expoente de perda de percurso ( $\alpha$ )
Espaço livre	2
Área urbana	2,7 a 3,5
Área urbana sombreada	3 a 5
Ambientes fechados com linha de visada	1,6 a 1,8
Ambientes fechados com obstruções	4 a 6
Obstruções em fábricas	2 a 3

(Fonte: [17])

liberdade do canal, ou seja, igual ao número de caminhos independentes nos quais informações diferentes podem ser enviadas.

### 2.1.1 Vantagens e Desvantagens da Diversidade Cooperativa

#### 2.1.1.1 Vantagens

**Ganho de Desempenho:** deve-se aos ganhos de perda de percurso, de diversidade e de multiplexação. Estes ganhos são traduzidos em diminuição da potência de transmissão, aumento da capacidade e uma melhor cobertura da comunicação.

**Qualidade de Serviço balanceada:** a inclusão de *relays* diminui a discrepância entre usuários que estão dentro de uma zona com desvanecimento profundo ou sombreamento daqueles que estão com boa qualidade de canal. Portanto, o canal *relay* ajuda a balancear a qualidade de serviço (**QoS**, do inglês *Quality of Service*) entre todos os usuários.

**Redução de custos:** com a implantação de uma rede cooperativa, pode-se diminuir custos de infraestrutura física, como por exemplo a utilização de dispositivos equipados com múltiplas antenas. Custos relacionados ao fornecimento de energia também são reduzidos, pois, ao utilizar-se o *relay* para cooperar com a comunicação, a potência da rede é dividida entre a fonte e o nó cooperativo, aumentando assim o tempo de vida dos dispositivos da rede.

#### 2.1.1.2 Desvantagens

**Aumento da sobrecarga:** o sistema cooperativo exige sincronismo entre os *relays* e uma maior segurança na rede.

**Escolha do *relay*:** determinar o *relay* ótimo algumas vezes é uma tarefa complicada e complexa.

**Tráfego extra na rede:** aumento do tráfego na rede, ocupando recursos como *slots* de tempo ou uma partição do espectro de frequência.

**Mais estimações de canal:** o uso de *relays* aumenta o número de *links*. Isto requer, conseqüentemente, mais conhecimento das informações de estado do canal (**CSI**, do inglês *Channel State Information*).

Portanto, um sistema cooperativo deve ser projetado de forma que haja a garantia de que a cooperação não cause nenhuma deterioração no desempenho da rede, ao passo que explore os ganhos obtidos com o uso da **DC**.

### 2.1.2 Protocolos Cooperativos

Um dos grandes aspectos dos sistemas cooperativos são as diversas formas de como a informação transmitida pela fonte pode ser processada pelo *relay*. Estes métodos são definidos através dos protocolos de cooperação, podendo estes serem divididos em dois grandes grupos: protocolos fixos ou protocolos adaptativos [18].

Em *relays* que utilizam protocolos fixos, os recursos da rede são distribuídos de uma maneira fixa entre o nó fonte e o nó cooperativo. Apesar de ser de fácil implementação, redes que utilizam esse tipo de protocolo são ineficientes em termos de largura de banda. Isto ocorre devido ao fato do *relay* e da fonte sempre dividirem os recursos de rádio, diminuindo assim a vazão sistêmica.

Os protocolos adaptativos, por outro lado, tentam sanar este problema de ineficiência espectral. Neste caso o *relay* é comunicado se deve cooperar ou não. Esta decisão pode ser feita tomando a **SNR** como parâmetro, caso ela esteja abaixo de um limiar predefinido, o *relay* não é utilizado, ocorrendo apenas a comunicação direta entre fonte e destino.

Assumindo uma rede cooperativa de três terminais, composta por uma fonte, um destino e um *relay*, a comunicação geralmente ocorre em duas fases. A fim de se evitar a interferência entre estas duas fases, modela-se a rede com duas fases ortogonais utilizando um esquema de Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo (**TDMA**, do inglês *Time-Division Multiple Access*) ou Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência (**FDMA**, do inglês *Frequency Division Multiple Access*).

Na Fase I, devido à natureza *broadcast* do meio sem fio, a fonte envia sua informação para o *relay* e o destino com potência  $P$ . Os sinais recebidos  $y_{sd}$  e  $y_{sr}$  pelo destino e *relay*, respectivamente, podem ser escritos como [18]

$$y_{sd} = \sqrt{P}h_{sd}x + n_{sd}, \quad (2.4)$$

$$y_{sr} = \sqrt{P}h_{sr}x + n_{sr}, \quad (2.5)$$

em que  $x$  é o símbolo transmitido,  $h_{sd}$  e  $h_{sr}$  são os coeficientes de canal entre a fonte-destino e fonte-relay, respectivamente, e  $n_{sd}$  e  $n_{sr}$  são o ruído aditivo branco Gaussiano (AWGN, do inglês *Additive White Gaussian Noise*) dos respectivos links.

Na Fase II, o relay processa o sinal recebido e o envia para o destino. O sinal recebido no destino pode ser modelado como

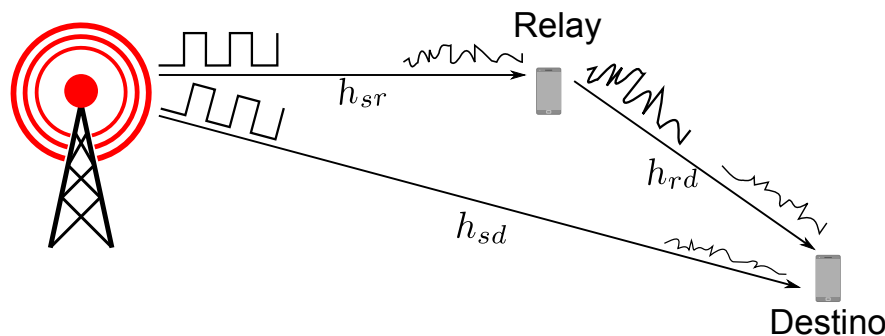
$$y_{rd} = h_{rd}f(y_{sr}) + n_{rd}, \quad (2.6)$$

em que  $y_{rd}$  é o sinal recebido,  $h_{rd}$  e  $n_{rd}$  são, respectivamente, o coeficiente de canal e o ruído AWGN entre o link relay-destino, e  $f(\cdot)$  é uma função que depende do processamento feito pelo relay.

Em seguida serão descritos alguns protocolos de cooperação.

► Amplifica-e-Encaminha (AF)

Para relays que utilizam o protocolo AF, o sinal recebido da fonte é amplificado por um fator  $G$  e retransmitido para o destino, como mostrado na Figura 2.3. Esta amplificação pode ser dividida em amplificação de ganho fixo ou amplificação de ganho variado.



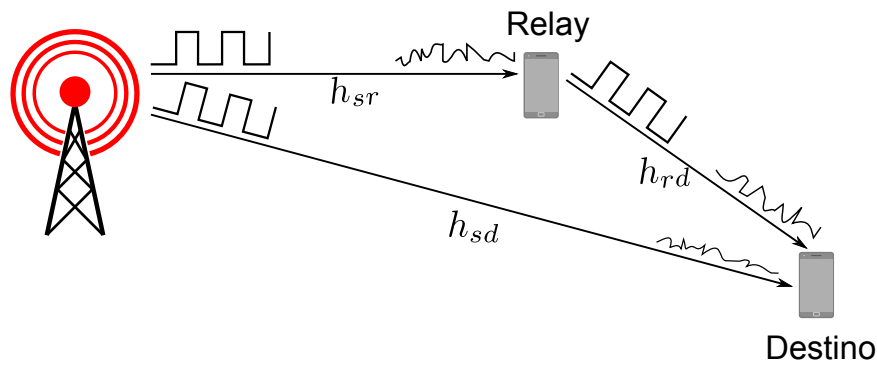
**Figura 2.3:** Protocolo cooperativo Amplifica-e-Encaminha.

No AF de ganho fixo, o fator de amplificação é fixado sobre uma dada janela de tempo e depende das estatísticas a longo prazo do canal fonte-relay. Este fator é geralmente uma função inversa do valor médio do ganho de canal entre a fonte e o relay [16].

Já no AF de ganho variável, o fator  $G$  é determinado pelas estatísticas instantâneas do link fonte-relay. Este valor é tipicamente uma função inversa do ganho de canal instantâneo entre fonte e relay [16].

► Decodifica-e-Encaminha (DF)





**Figura 2.4:** Protocolo cooperativo Decodifica-e-Encaminha.

Para os *relays* que utilizam o protocolo **DF**, o nó deve detectar o sinal recebido da fonte, decodificá-lo, codificá-lo e só assim enviar o sinal para o destino, como ilustrado na Figura 2.4.

Os *relays* que utilizam o protocolo **DF** possuem a vantagem sobre o **AF** de mitigar os efeitos do ruído aditivo no canal fonte-*relay*. Porém há a possibilidade do *relay* decodificar o sinal erroneamente e enviar uma informação errada para o destino, propagando assim o erro, que é o caso do Decode-and-Forward (**DF**) do tipo fixo (**FDF**, do inglês *Fixed Decode-and-Forward*) [18]. Para que o *relay* não envie informação errada para o destino, pode-se utilizar uma estratégia seletiva (**SDF**, do inglês *Selective Decode-and-Forward*). Nesta configuração, o *relay* "escuta" o canal entre ele e a fonte, só transmitindo a informação caso ele "ache" que não haja erro de decodificação [16]. Nestes casos, a eficiência do protocolo **DF** está diretamente ligada a qualidade do *link* fonte-*relay*.

Uma outra alternativa é utilizando o **DF** incremental (**IDF**). Neste caso é necessário a existência de um canal de *feedback* entre o destino e o *relay*. O destino envia uma mensagem de reconhecimento para o *relay* informando se é ou não capaz de decodificar corretamente a mensagem recebida pela transmissão direta. Caso consiga, o *relay* não precisa transmitir [18].

#### ► Compress-and-Forward (**CF**)

A ideia deste protocolo cooperativo é a utilização de um quantizador no *relay*. O *relay* quantiza e comprime a mensagem antes de enviá-la ao destino, que decodifica e estima a sequência recebida [21].

Para compressão da mensagem, o nó *relay* pode empregar a codificação de fonte padrão ou utilizar a técnica de codificação *Wyner-Ziv* (**WZC**). O protocolo **CF** com **WZC** pode alcançar uma taxa teórica ligeiramente maior quando comparada ao uso da codificação de fonte padrão [22].

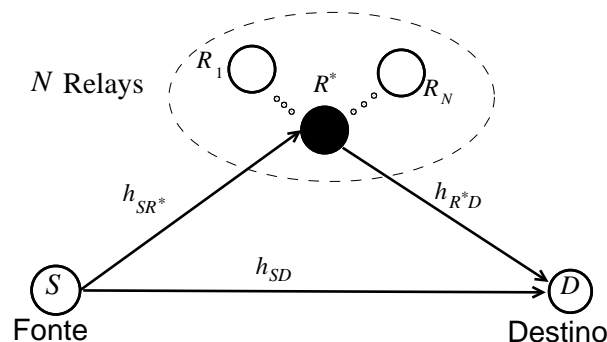


## 2.2 Técnicas de seleção de *relay*

Quando a rede cooperativa possui mais de um nó *relay* (rede multi-*relay*), duas perguntas surgem : "*Quando cooperar ?*" e "*Com quem cooperar?*". Com o objetivo de responder estas perguntas, os autores em [23] propuseram um novo protocolo de comunicação cooperativa que atinge uma grande eficiência espectral enquanto garante a mesma ordem de diversidade dos esquemas tradicionais de cooperação.

A fonte decide quando cooperar através da comparação da qualidade do canal do *link* direto com um limiar predefinido. Se o *link* direto atender aos requisitos deste limiar, a fonte envia sua informação para o destino sem cooperar. Caso contrário, a fonte emprega alguma técnica de seleção do *relay* que cooperará com sua transmissão.

Com relação a qual o *relay* será escolhido para cooperação, esta decisão vai depender de como a rede cooperativa está estruturada. A escolha pode ser baseada em métricas tais como distância entre nós, maior *SNR* instantânea, maior *SNR* média, dentre outras, de modo que o *relay* escolhido possa maximizar o desempenho da rede.



**Figura 2.5:** Seleção de *relay*.

Em um ambiente multi-*relay*, a técnica de seleção determina qual *relay* será selecionado para cooperar com a fonte na transmissão de sua informação, como ilustrado na Figura 2.5. Tais técnicas são divididas de acordo com o algoritmo implementado, podendo ser distribuído ou centralizado [24]. Apesar de ser um algoritmo sub-ótimo, a seleção distribuída diminui o *overhead* da rede e a complexidade do processamento de dados quando comparado com a técnica de seleção centralizada.

Os autores de [24] detalharam vários esquemas de seleção de um único *relay*. Estes esquemas serão brevemente descritos a seguir.

Bletsas *et al.* em [25] propuseram um algoritmo de seleção oportunística (OR, do inglês *Opportunistic Relaying*) na qual o esquema de seleção não necessita das informações globais da rede para selecionar um único *relay*.

Os autores mostraram que a diversidade no esquema **OR** é da ordem do número de *relays* presentes na rede, aumentando assim a eficiência espectral. Entretanto, a complexidade do algoritmo cresce com o aumento do número de nós, pois há a necessidade de que cada um dos *relays* esteja no estado de escuta para determinar se coopera ou não com a fonte e existe o risco de ocorrência de colisão quando os temporizadores de dois ou mais *relays* expirarem ao mesmo tempo.

O algoritmo de seleção *Power Aware Relay Selection (PARS)* foi proposto em [26] e utiliza a mesma ideia do **OR**, porém adicionando restrições de potência. A ideia principal é aumentar a vida útil da rede através da limitação da potência total transmitida. Entretanto, existe o mesmo problema de colisão observado no algoritmo **OR**.

Como mencionado, nas duas técnicas anteriores, **OR** e **PARS**, existe a possibilidade da ocorrência de colisões. Em [27], os autores propuseram um algoritmo chamado *Switch-and-examine node selection (SENS)* que reduz a carga das estimações de canal baseado na diversidade chaveada com seleção posterior, na qual o *relay* escolhido é mantido selecionado até que sua **SNR** seja menor do que um determinado limiar. Uma desvantagem deste algoritmo é a seleção aleatória do nó *relay*, levando a uma solução sub-ótima.

Em [28], os autores implementaram uma estratégia **OR** com *feedback* limitado. Nesta técnica, os autores propuseram minimizar a troca de informação entre os nós, requerendo um baixo *feedback* de **CSI**, aumentando, assim, a eficiência espectral da rede. Entretanto, para que isto ocorra, todos os *relays* devem estar no modo de escuta, o que aumenta o consumo de potência da rede.

Outra técnica utilizada é selecionar um *relay* que tem o maior ganho de canal com o nó destino [29]. Este algoritmo aumenta a eficiência espectral, porém requer uma maior troca de informações entre o *relay* e o receptor, aumentando também o *overhead* da rede.

Além destes, vários outros algoritmos de seleção foram propostos na literatura, [30–35]. O que deve decidir qual algoritmo será aplicado é a configuração da rede e as métricas escolhidas para a seleção.

## 2.3 Rádio-Cognitivo

---

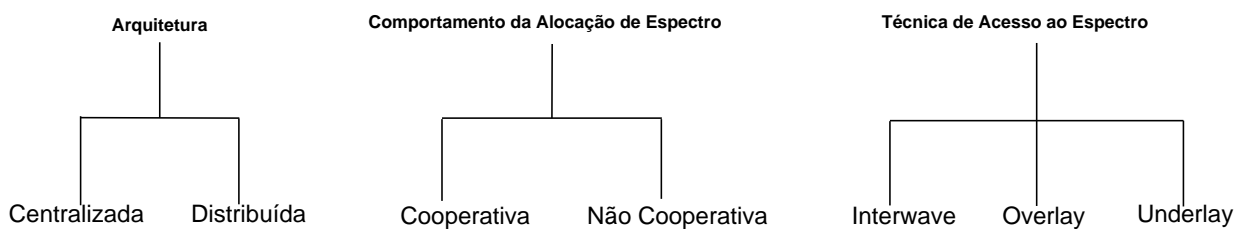
Mitola, em [6], definiu **RC** como uma rede de comunicação inteligente capaz de aprender sobre o ambiente ao seu redor e se adaptar às mudanças deste ambiente. Já Haykin, em [36], definiu os sistemas **RCs** como um sistema de comunicação sem fio inteligente capaz de adaptar-se a alguns parâmetros com o objetivo de realizar uma comunicação confiável e utilizar eficientemente

o espectro de rádio [37].

Como é sabido, o rádio é um meio de difusão, onde os usuários que coexistem na mesma frequência causam algum tipo de interferência uns aos outros. Os dispositivos equipados com RC utilizam tecnologia de alocação espectral para suportar novos usuários sem fio operando dentro da mesma faixa de frequência sem prejudicar ou degradar o desempenho dos usuários já existentes. Para isso, o RC deve coletar e processar as informações sobre os usuários coexistentes dentro de seu espectro, o que requer um sensoriamento avançado e capacidades de processamento de sinal.

### 2.3.1 Compartilhamento Espectral

A função do RC é permitir o compartilhamento espectral entre usuários secundários (não licenciados) sem que estes interfiram na comunicação dos usuários detentores do espectro de frequência (usuários licenciados). As soluções de compartilhamento espectral podem ser classificadas de acordo com três aspectos [38]: arquitetura, comportamento da alocação espectral e técnicas de acesso ao espectro, como mostrado na Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Estratégias de compartilhamento espectral.

A primeira classificação das técnicas de compartilhamento espectral é baseada na arquitetura, que pode ser descrita como:

**Compartilhamento Espectral Centralizado:** Nesta solução, existe uma entidade centralizada que controla a alocação do espectro e os procedimentos de acesso [39, 40]. Com a ajuda destes procedimentos, geralmente, um processo de sensoriamento distribuído é proposto tal que cada entidade em uma rede RC encaminha suas medidas sobre a alocação de espectro para essa entidade central. Nesta configuração, os usuários secundários retransmitem o tráfego do usuário primário para obter sua própria partição de espectro [41].

**Compartilhamento Espectral Distribuído:** Proposta para casos em que a construção de uma infraestrutura centralizada não é preferível [42]. Cada nó é responsável por sua alocação de frequência e o acesso é baseado em políticas locais.

A segunda classificação é baseada no comportamento do acesso ao espectro, podendo ser classificada como:

**Compartilhamento Espectral Cooperativo:** são soluções cooperativas que consideram o efeito da comunicação de um nó nos outros nós [39, 43]. Ou seja, as medições de interferência de um nó são compartilhadas entre os nós presentes na rede.

**Compartilhamento Espectral Não-Cooperativo:** soluções não-cooperativas (ou egoístas) que consideram apenas um nó da rede [44–46]. Estes tipos de solução podem levar a uma redução da utilização do espectro, porém requerem

Por último, o acesso ao espectro em sistemas RC podem ser divididos em três abordagens ou paradigmas de acordo com a tecnologia do acesso: *underlay*, *overlay* e *interwave* [47], [48].

**Underlay:** Na abordagem *underlay*, é permitido ao usuário secundário acessar simultaneamente o espectro alocado ao usuário primário desde que sua potência seja ajustada para que a interferência causada pelo usuário secundário no usuário primário não exceda um limiar predefinido.

**Overlay :** No paradigma *overlay*, a rede secundária toma conhecimento da transmissão da rede principal através de técnicas de processamento de sinais e começa sua transmissão de modo simultâneo com o usuário licenciado. A rede secundária não precisa limitar sua potência de transmissão. Esta técnica pode atingir uma maior capacidade dentre os protocolos cognitivos [48].

**Interwave :** A técnica *interwave*, por sua vez, explora oportunisticamente o espectro da rede principal transmitido em bandas de frequência não utilizadas.

Nesta dissertação é utilizada a técnica de compartilhamento espectral via técnica de acesso ao espectro *underlay* distribuída em que cada nó da rede secundária é responsável por limitar sua potência de transmissão e gerenciar seu acesso ao espectro de frequência. Esta escolha vem do fato de que as abordagens *overlay* e *interwave* requerem um maior processamento e troca de informações entre as redes primária e secundária, o que aumentaria a carga no sistema secundário, além de aumentar a complexidade dos nós. A seguir, cada uma das três abordagens será descrita com mais detalhes.

## 2.3.2 Paradigmas das Redes RC

### 2.3.2.1 Paradigma *Underlay*

A abordagem *underlay* engloba técnicas que permitem a comunicação através do rádio cognitivo, explorando técnicas de espalhamento espectral desenvolvidas para redes celulares [49].

Nesta técnica é assumido que a rede cognitiva possui o conhecimento da interferência causada por seu transmissor nos receptores primários.

A comunicação da rede cognitiva acontece somente se a interferência gerada pelo usuário secundário estiver abaixo de um certo limiar. Além de restringir a potência do usuário cognitivo, outra alternativa para a abordagem *underlay* se baseia no uso de uma grande largura de banda sobre o qual o sinal cognitivo é transmitido e espalhado. Esta alternativa é a base para comunicações de espalhamento espectral e *ultra-wide-band* (UWB) [47].

### 2.3.2.2 Paradigma *Overlay*

Neste paradigma, é permitida a comunicação simultânea das transmissões cognitivas e não cognitivas, mas, diferentemente de redes *underlay*, a transmissão cognitiva pode facilitar a transmissão do usuário não cognitivo. Entretanto deve existir a premissa de que o transmissor do usuário cognitivo tenha o conhecimento dos *codebooks* e das mensagens da rede não cognitiva [37, 47].

A informação de *codebook* pode ser obtida através de um broadcast periódico dos mesmos.

A mensagem do usuário não-cognitivo deve ser obtida através da decodificação desta mensagem no receptor cognitivo quando o primeiro começar a sua transmissão. Esta suposição é válida para uma retransmissão de mensagem em que o usuário cognitivo escuta a transmissão e a decodifica, enquanto o destinatário pretendido não consegue decodificar a transmissão inicial devido ao desvanecimento ou à interferência. Alternativamente, o usuário não-cognitivo pode enviar sua mensagem a priori, antes de sua transmissão.

A abordagem *overlay* pode ser usada tanto em comunicações com bandas licenciadas como em bandas não-licenciadas. Em bandas licenciadas, os usuários cognitivos são permitidos compartilhar a banda com usuários licenciados desde que não interfiram na sua comunicação. Já para bandas não licenciadas, os usuários cognitivos podem obter uma alta eficiência espectral explorando o conhecimento da mensagem e do *codebook* para reduzir a interferência.

Em [48] é mostrado que o protocolo *overlay* é o que atinge a maior

capacidade dentre os protocolos cognitivos.

### 2.3.2.3 Paradigma *Interwave*

Este paradigma se baseia na ideia de comunicação oportunística, sendo a motivação original para o RC [5]. Existem espaços temporários na frequência, referidos como buracos de espectro [47], que não estão em uso constante pelos usuários licenciados. Estes espaços podem ser explorados por usuários cognitivos, que utilizam oportunisticamente o espectro não utilizado. Esta técnica requer o conhecimento das informações das atividades dos usuários não cognitivos com relação ao uso do espectro.

Em outras palavras, sistemas cognitivos que se utilizam da abordagem *interwave* fazem um monitoramento periódico do espectro de rádio e, inteligentemente, detectam espaços vazios no espectro de frequência para, oportunisticamente, começarem sua comunicação sobre estes espaços deixados, causando o mínimo de interferência nos usuários não-cognitivos [47].

## 2.4 Trabalhos Relacionados

---

Vários trabalhos investigaram o uso da diversidade cooperativa em sistemas sem fio com compartilhamento espectral, e alguns destes serão brevemente discutidos na sequência.

Em [50], considerando uma fonte secundária, um *relay* secundário, um destino secundário e um receptor primário, a análise de *outage* de Sistemas Cooperativos Cognitivos com Compartilhamento Espectral (SCCCE) foi realizada considerando a ausência de *link* direto entre a fonte e o terminal destino. A análise de [50] foi estendida em [51] para o caso de múltiplos *relays* secundários, onde uma técnica de seleção de *relay* apropriada foi proposta.

Em [52], o desempenho de SCCCEs para *relay* do tipo AF foi investigado assumindo a presença de *link* direto entre a fonte e o destino, onde neste último uma estratégia de combinação por seleção (SC, do inglês *Selection Combining*) foi utilizada para selecionar o melhor caminho (enlace direto ou *link* via *relay*) entre a fonte e o destino. Considerando o mesmo modelo sistêmico, [53] avaliou o desempenho de SCCCEs utilizando combinador do tipo MRC (*Maximal-ratio combining*) no destino e *relay* do tipo DF. O trabalho desenvolvido por [52] foi estendido em [54] para canais Nakagami- $m$ , porém na ausência de linha de visada, e em [55], adicionando o *link* direto entre fonte e destino.

Em [56], o desempenho de SCCCEs com múltiplos *relays* DF foi examinado, porém o critério de seleção de *relay* adotado não levou em consideração a

informação de estado do canal entre a fonte e os *relays*. Já em [57], os autores empregaram uma estratégia de seleção de *relay* em uma Rede Cooperativa Cognitiva (RCC) sujeita a desvanecimento de Rayleigh não-idêntico.

Os autores em [58] investigaram uma RCC com múltiplos receptores primários e múltiplos destinos secundários para canais Nakagami- $m$  na ausência de *link* direto entre fonte e destinos. Um algoritmo oportunístico baseado nas estatísticas do *link* fonte-*relay* foi desenvolvido para selecionar um dentre os destinos disponíveis para a comunicação.



# Redes Cooperativas Cognitivas

## Multi-Relay : Vários Destinos e um Receptor Primário

Neste capítulo, o desempenho de *outage* de RCCs com múltiplos *relays* Amplifica e Encaminha (AF) ou Decodifica e Encaminha (DF) é investigado. Nesta análise, assume-se que a rede secundária é composta por um nó fonte que comunica-se com um dentre  $L$  nós destinos através de um enlace direto e através de um dentre  $N$  nós *relays*. Considera-se que a fonte tem linha de visada com todos os nós destinos. Um esquema de seleção de nós eficiente e de baixa complexidade é proposto.

A fonte secundária primeiro seleciona o melhor nó destino secundário baseado na qualidade dos enlaces direto e, após isso, seleciona o melhor *relay* secundário que forneça o melhor caminho da fonte para o destino selecionado. Uma técnica do tipo SC é empregada no terminal destino selecionado para selecionar o melhor enlace (direto ou auxiliar) a partir da fonte secundária.

Considerando um ambiente com compartilhamento espectral, a comunicação secundária é realizada levando em consideração uma restrição de interferência, na qual a potência de transmissão é governada pela interferência no receptor primário bem como pela máxima potência de transmissão dos respectivos nós secundários.

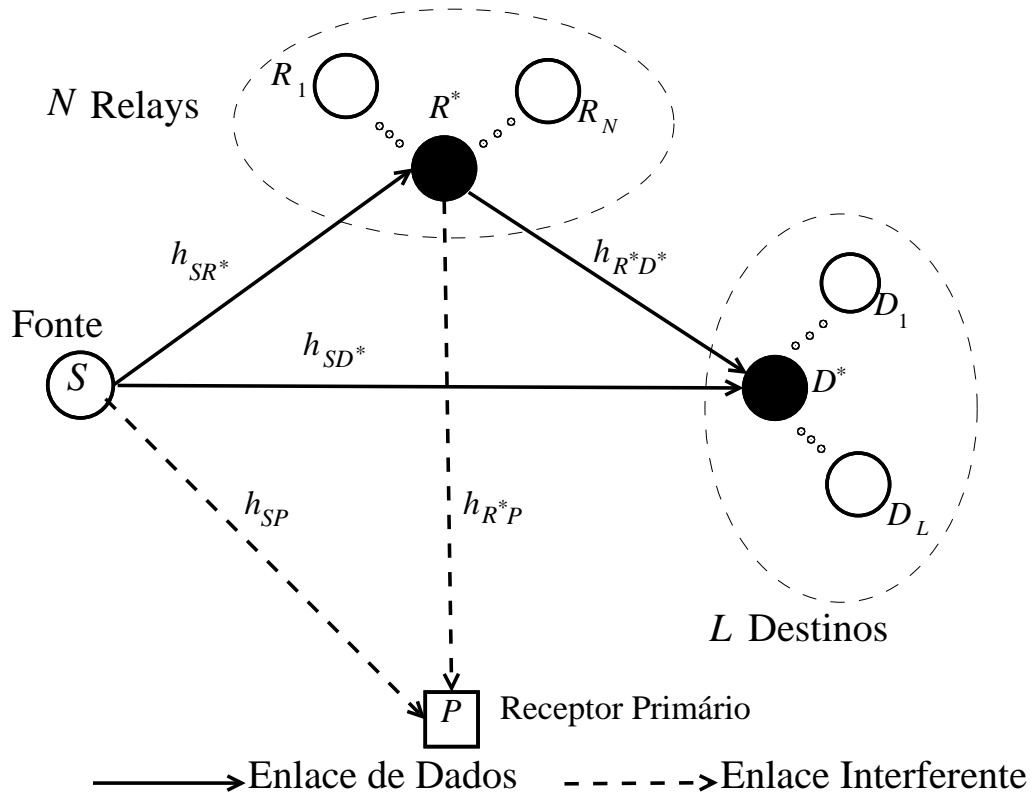
Expressões em forma fechada, exata para o caso DF e aproximada para o caso AF, para a probabilidade de *outage* é obtida e validada através de simulações de Monte Carlo no Capítulo 5. Além disso, uma análise assintótica é realizada, revelando que a ordem de diversidade do sistema não é afetada pela interferência, sendo igual a  $L + N$ .

Por fim, observa-se que a restrição na potência dos nós secundários



provoca um fenômeno de saturação na probabilidade de *outage*, similar ao observado em [50].

### 3.1 Modelo Sistêmico e Descrição do Esquema de Comunicação



**Figura 3.1:** Modelo sistêmico da rede cooperativa cognitiva multi-relay com  $L$  destinos e um receptor primário.

Considere uma RCC composta por uma fonte secundária  $S$ ,  $N$  relays secundários  $R_n$  ( $n = 1, \dots, N$ ),  $L$  nós destinos secundários  $D_l$  ( $l = 1, \dots, L$ ) e um receptor primário  $P$ , como mostrado na Fig. 3.1. É assumido que o transmissor primário se encontra distante da rede secundária, de forma que ele não interfere na comunicação secundária. Todos os nós são equipados com apenas uma única antena e operam no modo *half-duplex*.

Seja  $I$  a máxima interferência tolerável no receptor primário e,  $P_S$  e  $P_{R_n}$  as máximas potências de transmissão da fonte secundária e do  $n$ -ésimo relay secundário, respectivamente. Os termos de ruído são do tipo AWGN com densidade espectral de potência igual a  $N_0$ .

Sejam também  $h_{JK}$  e  $d_{JK}$  os coeficientes de canal e a distância entre dois nós  $J$  e  $K$ , respectivamente ( $J \in \{S, R_n, R^*\}, K \in \{R_n, P, D_l, D^*\}$ ). Os canais estão sujeitos a desvanecimento Rayleigh em bloco, ou seja, durante cada processo de comunicação, o canal permanece constante. Na prática,

o conhecimento dos canais entre os transmissores secundários e o receptor primário podem ser obtidos no transmissor secundário através de, por exemplo, um *feedback* direto do usuário primário ou um *feedback* indireto de um gerenciador de banda que gerencia a troca de informações entre as redes primária e secundária [7]. Outra técnica consiste na utilização de sensoriamento periódico do sinal transmitido do receptor primário feito pelo *relay*, considerando que a transmissão primária emprega uma técnica de duplexação por divisão no tempo [7, 59]. Também pode-se usar o estimador de canal sem a utilização de um canal de *feedback* utilizado em [60].

Considerando um ambiente de compartilhamento espectral e utilizando-se a abordagem *underlay*, a potência de transmissão em  $S$  e  $R_n$  pode ser escrita, respectivamente, como:

$$\bar{P}_S = \min \left( \frac{I}{|h_{SP}|^2}, P_S \right), \quad (3.1)$$

e

$$\bar{P}_{R_n} = \min \left( \frac{I}{|h_{R_nP}|^2}, P_{R_n} \right). \quad (3.2)$$

Focando na comunicação da rede secundária, um esquema **TDMA** é empregado, sendo realizado em duas fases. Entretanto, antes do processo de comunicação iniciar, um esquema de seleção de nós eficiente e de baixa complexidade é realizado. Primeiramente, o melhor destino secundário  $D^*$  é selecionado de acordo com a qualidade de canal do enlace direto, isto é,

$$D^* = \arg \max_l [\gamma_{SD_l}], \quad (3.3)$$

em que

$$\gamma_{SD_l} = \bar{P}_S \frac{d_{SD_l}^{-\alpha} |h_{SD_l}|^2}{N_0}, \quad (3.4)$$

sendo  $\alpha$  o coeficiente de perda de percurso<sup>1</sup> e  $\gamma_{SD_l}$  a razão sinal-ruído (SNR) entre a fonte e o destino  $D_l$ .

Apesar do critério de seleção ser sub-ótimo do ponto de vista da probabilidade de *outage*, o critério escolhido atinge ordem de diversidade completa, isto é,  $N + L$ , a mesma alcançada caso utilizássemos o método ótimo de escolha de nós. Ainda mais, a quantidade de informações de estado de canal (CSI) requerida no esquema proposto é de  $L + 2N + 2$ , ao contrário das  $LN + L + N + 2$  CSI necessárias caso estivessemos utilizando o critério

---

<sup>1</sup>Perceba que, se considerarmos a perda de percurso entre o link do usuário primário com o secundário, seria difícil para o usuário secundário calcular a distância entre os dois a fim de calcular sua potência de transmissão. Por exemplo, a potência de transmissão da fonte secundária seria  $\bar{P}_S = \min \left( \frac{I}{d_{SP}^{-\alpha} |h_{SP}|^2}, P_S \right)$  ao invés de  $\bar{P}_S = \min \left( \frac{I}{|h_{SP}|^2}, P_S \right)$ . Portanto, por conta de questões de implementações práticas, esta distância não foi levada em conta nos cálculos.

ótimo de seleção conjunta *relay*-destino. Em adição, nosso esquema proposto precisa comparar somente  $N + L$  enlaces potenciais, enquanto o critério de seleção conjunta *relay*-destino requer uma comparação de  $L(N + 1)$  *links*. Então, podemos notar que para sistemas cooperativos cognitivos multi-*relay* multi-destino de larga escala, o esquema proposto reduz significativamente a quantidade *overhead* na rede quando comparado com a estratégia ótima, alcançando a mesma taxa de diversidade.

Após o destino secundário ser selecionado, o processo de seleção de *relay* é realizado de forma que o *relay* escolhido,  $R^*$ , maximize a SNR fim-a-fim da fonte secundária para o destino secundário escolhido. Na sequência, o processo de seleção de *relay* assim como a SNR fim-a-fim são formulados analiticamente para ambos protocolos DF e AF

► Decodifica-e-Encaminha

Como mencionado anteriormente, o processo de comunicação consiste em duas fases: na Fase I, a fonte secundária envia a sua informação para  $R^*$  e  $D^*$  com potência de transmissão igual  $\bar{P}_S$ . Para os *relays* DF,  $R^*$  é determinado como:

$$R^* = \arg \max_n [\min [\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]], \quad (3.5)$$

em que

$$\gamma_{SR_n} = \bar{P}_S \frac{d_{SR_n}^{-\alpha} |h_{SR_n}|^2}{N_0}, \quad (3.6)$$

com  $\gamma_{SR_n}$  sendo a SNR entre a fonte e o  $n$ -ésimo *relay*, e

$$\gamma_{R_n D^*} = \bar{P}_{R_n} \frac{d_{R_n D^*}^{-\alpha} |h_{R_n D^*}|^2}{N_0}, \quad (3.7)$$

com  $\gamma_{R_n D^*}$  como sendo a SNR entre o  $n$ -ésimo *relay* e o destino selecionado.

Na Fase II, assumindo que o *relay* selecionado é sempre capaz de decodificar corretamente o sinal recebido<sup>2</sup>,  $R^*$  encaminha o sinal para  $D^*$  com potência de transmissão  $\bar{P}_{R_n}$ .

Ao final da transmissão em duas fases, uma técnica de SC é empregada no destino secundário selecionado. A escolha da combinação por seleção (SC) se deve ao fato de que a intenção deste trabalho é projetar um receptor simples, com baixa complexidade computacional, que, combinado com a técnica de seleção de nós proposta, geram ótimos

<sup>2</sup>Em redes com grande número de *relays*, a probabilidade de ao menos um *link* fonte-*relay* não está em *outage* é grande, justificando a hipótese feita.

resultados, os quais são discutidos no Capítulo 5. Na estratégia **SC** o enlace com maior **SNR** instantânea é escolhido entre o enlace direto e o enlace via *relay*. Logo, a **SNR** fim-a-fim pode ser escrita como

$$\gamma_{\text{end}_1}^{DF} = \max \left[ \max_l [\gamma_{SD_l}], \max_n [\min [\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]] \right]. \quad (3.8)$$

► **Amplifica-e-Encaminha**

Para o caso de *relays* **AF** de ganho variável, a primeira fase ocorre da mesma maneira que no caso **DF**, com a fonte secundária enviando a sua informação para  $D^*$  e  $R^*$ , no qual este último é determinado agora como

$$R^* = \arg \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}} \right]. \quad (3.9)$$

Na Fase II, o *relay* selecionado amplifica o sinal recebido da fonte por um fator  $G$  e o encaminha para o destino selecionado. Como o protocolo utilizado é o **AF** de ganho variável, o fator  $G$  é determinado pelas estatísticas instantâneas do enlace fonte-*relay*, sendo dado por [14]<sup>3</sup>:

$$G = \sqrt{\frac{\bar{P}_{R_n}}{\bar{P}_S |h_{SR^*}|^2 + N_0}}. \quad (3.10)$$

Após a segunda fase, o destino selecionará o caminho com a maior **SNR** instantânea, utilizando a estratégia **SC**. Portanto, a **SNR** fim-a-fim pode ser escrita como

$$\gamma_{\text{end}_1}^{AF} = \max \left[ \max_l [\gamma_{SD_l}], \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}} \right] \right]. \quad (3.11)$$

Em (3.8) e (3.11), perceba que os dois termos dentro do operador  $\max[.,.]$  não são estatisticamente independentes, devido a presença da **VA**  $|h_{SP}|^2$  (veja as Eqs. (3.4) e (3.6)).

## 3.2 Probabilidade de Outage

A probabilidade de *outage* é definida como a probabilidade da **SNR** fim-a-fim instantânea,  $\gamma_{\text{end}}$ , estar abaixo de um certo limiar,  $\gamma_{\text{th}}$ , ou seja,

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma_{\text{end}} < \gamma_{\text{th}}). \quad (3.12)$$

<sup>3</sup>Caso estivéssemos considerando o amplifica-e-encaminha de ganho fixo, o valor de  $G$  seria dado por  $G = \sqrt{\frac{\bar{P}_{R_n}}{E[P_S |h_{SR^*}|^2 + N_0]}}$ , em que o operador  $E[.]$  denota esperança.

### 3.2.1 Protocolo Cooperativo DF

Como mencionado no final da última seção, os dois *links*, direto e via *relay*, na expressão da probabilidade de *outage* possuem um termo comum,  $|h_{SP}|^2$ . Para lidar com esse problema, condiciona-se a probabilidade de *outage* ao termo comum, sendo assim escrita para o caso **DF** como

$$\Pr(\gamma_{\text{end}_1}^{DF} < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) = \overbrace{\Pr(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP})}^{\theta_1} \times \underbrace{\Pr(\max_n [\min[\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP})}_{\Psi_1}. \quad (3.13)$$

Para o cálculo de  $\theta_1$ , observa-se a seguinte identidade

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \Pr(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) \\ &= \Pr([\gamma_{SD_1}] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) \times \Pr([\gamma_{SD_2}] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) \times \dots \times \Pr([\gamma_{SD_L}] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) \\ &= \prod_{l=1}^L \Pr(\gamma_{SD_l} < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) \\ &= \prod_{l=1}^L F_{\gamma_{SD_l}}(\gamma_{\text{th}} | h_{SP}). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Como todos os enlaces de  $S$  para  $D_l$  são estatisticamente independentes, e os módulos dos ganhos de canal ao quadrado são exponencialmente distribuídos,  $\theta_1$  pode ser escrito como

$$\theta_1 = \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}}), \quad (3.15)$$

em que  $\beta_{SD_l} \triangleq 1/E[\gamma_{SD_l}]$ . Por sua vez, usando o Teorema da Probabilidade Total [61],  $\Psi_1$  em (3.13) pode ser escrito como

$$\Psi_1 = \Pr(\max_n [\min[\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) \quad (3.16)$$

$$= \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \underbrace{\Pr(\max_n [\min[\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D_l}]] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP})}_{\Phi}. \quad (3.17)$$

Agora, sejam  $W$  e  $V$  duas **VAs** independentes arbitrárias. Então tem-se a

seguinte identidade

$$\begin{aligned}
\Pr(\min[W, V] < \gamma) &= 1 - \Pr(W, V \geq \gamma) \\
&= 1 - \Pr(W \geq \gamma, V \geq \gamma) \\
&= 1 - (1 - F_W(\gamma) - F_V(\gamma) + F_{W,V}(\gamma)) \\
&= F_W(\gamma) + F_V(\gamma) - F_W(\gamma)F_V(\gamma).
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Portanto,  $\Phi$  pode ser expresso como

$$\Phi = \prod_{n=1}^N [(1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SR_n}}) + (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{R_n D_l}}) - (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SR_n}}) (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{R_n D_l}})], \tag{3.19}$$

em que  $\beta_{SR_n} \triangleq 1/E[\gamma_{SR_n}]$  e  $\beta_{R_n D_l} \triangleq 1/E[\gamma_{R_n D_l}]$ . Para determinar o valor de  $\Pr(D^* = D_l)$ , é utilizado o resultado apresentado em [62], sendo assim

$$\Pr(D^* = D_l) = 1 + \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{\substack{A_k \subseteq \{1, 2, \dots, l-1, l+1, \dots, L\} \\ |A_k|=k}} (-1)^k \times \frac{\beta_{SD_l}}{\beta_{SD_l} + \sum_{j \in A_k} \beta_{SD_j}}, \tag{3.20}$$

em que a prova pode ser encontrada em [63, App.], na qual a expressão advém da identidade da expansão multinomial [64, Eq.(33)].

Porém, para calcular a probabilidade de *outage* é necessário descondicionar a Equação (3.13). Seja  $X_1 = |h_{SP}|^2$ ,  $Y_1 = |h_{R_n P}|^2$ ,  $\gamma_{SD^*} = \max_l[\gamma_{SD_l}]$ ,  $\gamma_{SR^*D^*} = \max_n[\min[\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]]$ . Logo, a expressão geral para a probabilidade de *outage* pode ser encontrada resolvendo a seguinte integral [61]

$$P_{out_1}^{DF} = \int_0^\infty \int_0^\infty F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{th}|X_1) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{th}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy, \tag{3.21}$$

em que

$$F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{th}|X_1) = \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SD_l}}), \tag{3.22}$$

e

$$F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{th}|X_1, Y_1) = \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \Phi. \tag{3.23}$$

Para determinar o valor da integral em (3.21), é importante observar que

$$\min\left(\frac{I}{X_1}, P_S\right) = \begin{cases} P_S, & \text{quando } X_1 \leq I/P_S, \\ I/X_1, & \text{quando } X_1 > I/P_S, \end{cases} \tag{3.24}$$

e

$$\min\left(\frac{I}{Y_1}, P_{R_n}\right) = \begin{cases} P_{R_n}, & \text{quando } Y_1 \leq I/P_{R_n}, \\ I/Y_1, & \text{quando } Y_1 > I/P_{R_n}. \end{cases} \quad (3.25)$$

Portanto, a probabilidade de *outage* pode ser expressa como a soma de quatro termos,  $P_{\text{out}_1}^{DF} = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$ , com

$$\xi_1 = \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD}^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy. \quad (3.26)$$

$$\xi_2 = \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} F_{\gamma_{SD}^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy. \quad (3.27)$$

$$\xi_3 = \int_{I/Q}^{\infty} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD}^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy. \quad (3.28)$$

$$\xi_4 = \int_{I/Q}^{\infty} \int_{I/Q}^{\infty} F_{\gamma_{SD}^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy. \quad (3.29)$$

Aqui assume-se, sem perda de generalidade, que  $P_{R_n} = P_S = Q$ . Efetuando as substituições apropriadas em (3.26), segue-se que

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \prod_{n=1}^N \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} (\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_l}^Q)}\right) \\ &\quad \times \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} \beta_{R_n P} e^{-y \beta_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (3.30)$$

em que  $\beta_{SP} \triangleq 1/E[X_1]$ ,  $\beta_{R_n P} \triangleq 1/E[Y_1]$ , e

$$\beta_{MT}^Q \triangleq \frac{1}{E[Q d_{MT}^{-\alpha} |h_{MT}|^2 / N_0]}, \quad (3.31)$$

com  $M \in \{S, R_n\}$  e  $T \in \{R_n, D_l\}$ .

Resolvendo a integral na Equação (3.30), chega-se ao resultado

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \prod_{n=1}^N \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} (\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_l}^Q)}\right) \\ &\quad \times (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}}) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_n P}}). \end{aligned} \quad (3.32)$$

De maneira similar, efetuando-se as substituições apropriadas na Equação (3.27), encontra-se

$$\begin{aligned} \xi_2 &= \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \prod_{n=1}^N \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} (\beta_{SR_n}^Q + y \beta_{R_n D_l}^I)}\right) \\ &\quad \times \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} \beta_{R_n P} e^{-y \beta_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (3.33)$$

com  $y\beta_{R_n D_l}^I \triangleq 1/E [(I/y)(d_{R_n D_l}^{-\alpha} |h_{R_n D_l}|^2/N_0)]$ . Agora, fazendo o uso da identidade

$$\prod_{k=1}^K (1 - x_k) = \sum_{k=0}^K \frac{(-1)^k}{k!} \sum_{n_1}^K \sum_{n_2}^K \cdots \sum_{n_k}^K \prod_{t=1}^k x_{n_t}, \quad (3.34)$$

a Equação (3.33) pode ser reescrita da seguinte forma

$$\begin{aligned} \xi_2 = & \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{S D_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}}) \times \int_{I/Q}^{\infty} \beta_{R_n P} e^{-y \beta_{R_n P}} \sum_{k=0}^K \frac{(-1)^k}{k!} \times \\ & \sum_{n_1}^K \sum_{n_2}^K \cdots \sum_{n_k}^K \prod_{t=1}^k e^{-\gamma_{\text{th}} (\beta_{S R_{n_t}}^Q + y \beta_{R_{n_t} D_l}^I)} dy. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Na sequência, assume-se que os enlaces de  $S$  para  $R_n$  são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d), ou seja, possuem a mesma SNR média [65] (i.e.,  $\beta_{S R_n} = \beta_{S R}, \forall n$ )<sup>4</sup>. A mesma suposição pode ser feita para os destinos secundários, em que os enlaces de  $S$  e  $R_n$  para  $D_l$  são i.i.d. Entretanto, é pertinente observar que os canais pertencentes a diferentes saltos possuem condições de desvanecimento distintas uns dos outros. Logo, (3.35) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} \xi_2 = & \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{S D_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}}) \times \\ & \int_{I/Q}^{\infty} \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} (\beta_{S R_n}^Q + y \beta_{R_n D_l}^I)}\right)^N y \beta_{R_n P}^I dy \\ \xi_2 = & \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{S D_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}}) \times \\ & \int_{I/Q}^{\infty} \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} (-1)^n \exp\left(-n \gamma_{\text{th}} (\beta_{S R_n}^Q + y \beta_{R_n D_l}^I) + y \beta_{R_n P}^I\right) dy. \end{aligned} \quad (3.36)$$

em que foi utilizada a expansão binomial

$$(a + b)^N = \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (a)^n (b)^{N-n}. \quad (3.37)$$

<sup>4</sup>Tal suposição se baseia no fato que os *relays* são colocados muito próximos um do outro, formando *clusters*, sendo selecionados através de uma rotina de processo de longo prazo (veja [65] e as suas referências).



Resolvendo a integral acima, obtêm-se o valor de  $\xi_2$

$$\begin{aligned} \xi_2 &= \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}}) \beta_{R_n P} \\ &\times \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n \exp\left(-\gamma_{\text{th}} n \left(\beta_{SR_n}^Q + \frac{I}{Q} \beta_{R_n D_l}^I\right)\right) \times \frac{e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_n P}}}{\gamma_{\text{th}} n \beta_{R_n D_l}^I + \beta_{R_n P}}. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Para  $\xi_3$  e  $\xi_4$  pode-se usar a mesma abordagem utilizada em  $\xi_2$ , ou seja, considerando as variáveis **i.i.d.**, e utilizando a Equação (3.34), chega-se ao resultado

$$\begin{aligned} \xi_3 &= \sum_{m=0}^L \binom{L}{m} (-1)^m \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} \\ &\times (-1)^n \beta_{SP} (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_n P}}) e^{(-\frac{I}{Q} \beta_{SP})} \\ &\times \exp\left(-\gamma_{\text{th}} \left(m \frac{I}{Q} \beta_{SD_m}^I + n \left(\frac{I}{Q} \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_n D_m}^Q\right)\right)\right) \\ &\times \frac{1}{\gamma_{\text{th}} (m \beta_{SD_m}^I + n \beta_{SR_n}^I) + \beta_{SP}}, \end{aligned} \quad (3.39)$$

e

$$\begin{aligned} \xi_4 &= \sum_{m=0}^L \binom{L}{m} (-1)^m \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n \beta_{SP} \\ &\times \beta_{R_n P} \exp\left(-\gamma_{\text{th}} \frac{I}{Q} (m \beta_{SD_m}^I + n \beta_{SR_n}^I + n \beta_{R_n D_m}^I)\right) \\ &\times \frac{e^{(-\frac{I}{Q} (\beta_{SP} + \beta_{R_n P}))}}{[\gamma_{\text{th}} (m \beta_{SD_m}^I + n \beta_{SR_n}^I) + \beta_{SP}] [\gamma_{\text{th}} n \beta_{R_n D_m}^I + \beta_{R_n P}]}, \end{aligned} \quad (3.40)$$

em que  $\beta_{SR_n}^I \triangleq \frac{1}{E[I d_{SR_n}^{-\alpha} |h_{SR_n}|^2 / N_0]}$  e  $\beta_{SD_l}^I \triangleq \frac{1}{E[I d_{SD_l}^{-\alpha} |h_{SD_l}|^2 / N_0]}$ . Finalmente, substituindo (3.32), (3.35), (3.39), e (3.40) em  $P_{\text{out}}^{DF} = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$ , uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* para o **DF** é encontrada para o primeiro modelo sistêmico.

### 3.2.2 Protocolo Cooperativo **AF**

Para os *relays AF*, os termos de (3.11) não são estatisticamente independentes. Portanto, adota-se a mesma abordagem utilizada para o protocolo **DF**. Neste caso, a probabilidade condicional é escrita da seguinte

forma

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{\text{end}}^{AF} < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) &= \Pr\left(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}\right) \\ &\quad \times \underbrace{\Pr\left(\max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}}\right] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}\right)}_{\Omega_1}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

O termo  $\Pr\left(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}\right)$  é dado por (3.15), enquanto que  $\Omega_1$  pode ser calculado como

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \Pr\left(\max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D_l}}\right] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}\right) \\ &= \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \prod_{n=1}^N \underbrace{\Pr\left(\left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D_l}}\right] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}\right)}_{\Theta}, \end{aligned} \quad (3.42)$$

em que  $\sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l)$  é dado por (3.20), e  $\Theta$  pode ser expresso como [62]

$$\Theta = \int_0^\infty \Pr\left(\left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D_l}}\right] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}\right) \times f_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{SR_n}) d\gamma_{SR_n}. \quad (3.43)$$

Seja  $A = \gamma_{R_n D_l}$  e  $B = \gamma_{SR_n}$  na Equação (3.43), logo

$$\begin{aligned} \Theta &= \int_0^\infty \Pr\left(\frac{Ab}{1 + A + b} < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}\right) \times f_B(b) db \\ &= \int_0^{\gamma_{\text{th}}} \Pr[A(b - \gamma_{\text{th}}) < \gamma_{\text{th}}(b + 1) | h_{SP}] \times f_B(b) db \\ &\quad + \int_{\gamma_{\text{th}}}^\infty \Pr[A(b - \gamma_{\text{th}}) < \gamma_{\text{th}}(b + 1) | h_{SP}] \times f_B(b) db \\ &= F_B(\gamma_{\text{th}}) + \underbrace{\int_{\gamma_{\text{th}}}^\infty F_A\left[\frac{\gamma_{\text{th}}(b + 1)}{b - \gamma_{\text{th}}}\right] \times f_B(b) db}_R, \end{aligned} \quad (3.44)$$

em que  $F_B(\gamma_{\text{th}}) = 1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SR_n}}$ .

Neste caso,  $R$  é calculado da seguinte forma

$$\begin{aligned} R &= \int_{\gamma_{\text{th}}}^\infty F_A\left[\frac{\gamma_{\text{th}}(b + 1)}{b - \gamma_{\text{th}}}\right] \times f_B(b) db \\ R &= \int_{\gamma_{\text{th}}}^\infty \left(1 - e^{\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} \beta_{R_n D_l} (b + 1)}{b - \gamma_{\text{th}}}\right)}\right) \beta_{SR_n} e^{-b \beta_{SR_n}} db \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R &= \int_{\gamma_{\text{th}}}^{\infty} \beta_{SR_n} e^{-b\beta_{SR_n}} - \int_{\gamma_{\text{th}}}^{\infty} \beta_{SR_n} e^{-b\beta_{SR_n}} e^{\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}\beta_{R_n}D_l(b+1)}{b-\gamma_{\text{th}}}\right)} db \\
&= R_1 - R_2,
\end{aligned} \tag{3.45}$$

em que  $R_1 = e^{(-\gamma_{\text{th}}\beta_{SR_n})}$ . Definindo  $\Lambda = b - \gamma_{\text{th}}$ ,  $R_2$  pode ser calculado da seguinte forma

$$R_2 = \int_0^{\infty} \beta_{SR_n} e^{-(\Lambda+\gamma_{\text{th}})\beta_{SR_n}} \times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}\beta_{R_n}D_l(\Lambda+\gamma_{\text{th}}+1)}{\Lambda}} d\Lambda. \tag{3.46}$$

Organizando os termos da equação acima, tem-se

$$R_2 = \beta_{SR_n} e^{-\gamma_{\text{th}}\beta_{SR_n}} \times e^{-\gamma_{\text{th}}\beta_{R_n}D_l} \int_0^{\infty} \Lambda^0 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}\beta_{R_n}D_l(\gamma_{\text{th}}+1)}{\Lambda}} d\Lambda. \tag{3.47}$$

De acordo com [66, eq. (3.471.9)], segue que

$$\int_0^{\infty} x^{v-1} e^{-\frac{\beta}{x}} e^{-\gamma x} dx = 2 \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)^{\frac{v}{2}} K_v(2\sqrt{\beta\gamma}), \tag{3.48}$$

em que  $K_v(\cdot)$  é a função de Bessel modificada de segundo tipo de  $v$ -ésima ordem [67, eq. (8.432.6)]. Utilizando este resultado em (3.47),  $R_2$  é calculado como

$$R_2 = \beta_{SR_n} e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n} + \beta_{R_n}D_l)} 2 \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1)\beta_{R_n}D_l}{\beta_{SR_n}}} K_1 \left( 2 \sqrt{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1)\beta_{R_n}D_l\beta_{SR_n}} \right). \tag{3.49}$$

Portanto,  $\Theta$  em (3.43) pode ser calculado como

$$\Theta = F_B(\gamma_{\text{th}}) + R = F_B(\gamma_{\text{th}}) + R_1 - R_2 = 1 - R_2. \tag{3.50}$$

Substituindo (3.50) e (3.20) em (3.42), depois combinando esta última e (3.15) na Equação (3.41), uma expressão para a probabilidade de *outage* condicional é obtida. Após isso, descondicionando essa expressão com respeito a  $h_{SP}$ , a probabilidade de *outage* pode ser determinada por (3.21), fazendo as substituições apropriadas para as estatísticas requeridas. Neste caso, para *relays AF*,  $F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{\text{th}}|X_1) = \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{\text{th}}\beta_{SD_l}})$  e  $F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) = \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \Theta$ . Finalmente, usando o mesmo raciocínio empregado para os *relays DF*, a probabilidade de *outage* pode ser expressa como a soma de quatro termos, ou seja,  $P_{\text{out}_1}^{AF} = \vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4$ , em que  $\vartheta_i$  é expresso da mesma forma que  $\xi_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , somente fazendo as substituições apropriadas para o caso *AF*. Mais especificamente

$$\vartheta_1 = \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD}^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1) F_{\gamma_{SR}^*D^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy. \quad (3.51)$$

$$\vartheta_2 = \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} F_{\gamma_{SD}^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1) F_{\gamma_{SR}^*D^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy. \quad (3.52)$$

$$\vartheta_3 = \int_{I/Q}^{\infty} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD}^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1) F_{\gamma_{SR}^*D^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy. \quad (3.53)$$

$$\vartheta_4 = \int_{I/Q}^{\infty} \int_{I/Q}^{\infty} F_{\gamma_{SD}^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1) F_{\gamma_{SR}^*D^*}(\gamma_{\text{th}}|X_1, Y_1) \times f_{X_1}(x) f_{Y_1}(y) dx dy. \quad (3.54)$$

Em particular, mostra-se que

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - \beta_{SR_n}^Q e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_l}^Q)}\right) 2 \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \lambda_{R_n D}}{\beta_{SR_n}}} K_1 \left(2 \sqrt{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \lambda_{R_n D} \beta_{SR_n}}\right) \\ &\times \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} \beta_{R_n P} e^{-y \beta_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (3.55)$$

resultando em

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}}) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_n P}}) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - \beta_{SR_n}^Q e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_l}^Q)}\right) 2 \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \beta_{R_n D_l}^Q}{\beta_{SR_n}}} K_1 \left(2 \sqrt{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \beta_{R_n D_l}^Q \beta_{SR_n}}\right). \end{aligned} \quad (3.56)$$

Por sua vez,  $\vartheta_2$  é expresso como

$$\begin{aligned} \vartheta_2 &= \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - \beta_{SR_n}^Q e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n}^Q + y \beta_{R_n D_l}^I)}\right) 2 \sqrt{\frac{y \gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \beta_{R_n D_l}^I}{\beta_{SR_n}}} K_1 \left(2 \sqrt{y \gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \beta_{R_n D_l}^I \beta_{SR_n}^Q}\right) \\ &\times \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} \beta_{R_n P} e^{-y \beta_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (3.57)$$

Devido a dificuldade de se encontrar uma expressão em forma fechada para (3.57),  $K_1(\zeta)$  será aproximado por  $1/\zeta$ , [67, eq. (9.6.9)], já que o argumento da

função Bessel é em geral pequeno <sup>5</sup>.

Na sequência, assume-se que os enlaces de  $S$  para  $R_n$  e, de  $S$  e  $R_n$  para  $D_l$  são independentes e identicamente distribuídos (**i.i.d**). Entretanto, vale salientar que os canais pertencentes a diferentes saltos possuem condições de desvanecimento distintas umas das outras. Portanto

$$\begin{aligned} \vartheta_2 &\simeq \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} (\beta_{SR_n}^Q + y \beta_{R_n D_l}^I)}\right) \\ &\times \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} \beta_{R_n P} e^{-y \beta_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (3.58)$$

resultando em (3.38). Para  $\vartheta_3$  e  $\vartheta_4$ , pode-se usar a mesma abordagem utilizada em  $\vartheta_2$ , ou seja, considerando os enlaces **i.i.d** e utilizando a aproximação [67, eq. (9.6.9)], chega-se a forma aproximada dada por (3.39) e (3.40), respectivamente. Finalmente, substituindo, (3.56), (3.38), (3.39) e (3.40) em  $P_{\text{out}_1}^{AF} = \vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4$ , uma fórmula aproximada para a probabilidade de *outage* do protocolo AF de ganho variável é obtida.

### 3.3 Análise Assintótica

Com o intuito de determinar a ordem de diversidade do sistema em estudo, uma análise assintótica será agora realizada. Seja  $\bar{\gamma} \triangleq 1/N_0$  a **SNR** do sistema e  $I/Q = \mu$ , sendo  $\mu$  uma constante positiva. Quando  $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ , observa-se que  $\beta_{SP} \gg \frac{\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}}$  e  $\beta_{R_n P} \gg \frac{\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}}$ . Utilizando a expansão em série de MacLaurin para funções exponenciais, ou seja,  $e^{-\bar{\gamma}x} \simeq 1 - \bar{\gamma}x$ , aproximando o valor de  $K_1(\zeta)$  por  $1/\zeta$  e após algumas manipulações algébricas, chega-se às seguintes expressões assintóticas:

#### ► Decodifica-e-Encaminha

$$\begin{aligned} P_{\text{out}_1}^{\xi_1} &\simeq \prod_{m=1}^L \left(\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_m}^Q\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{(-\mu \beta_{SP})}) \times (1 - e^{(-\mu \beta_{R_n P})}) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left[\gamma_{\text{th}} \left(\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_m}^Q\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{L+N}, \end{aligned} \quad (3.59)$$

<sup>5</sup>Interessantemente, esta aproximação apresentará uma ótima proximidade para os resultados simulados em todas as faixas de **SNR**.

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\xi_2} &\simeq \prod_{m=1}^L \left( \gamma_{\text{th}} \beta_{SD_m}^Q \right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\mu \beta_{SP}}) e^{-\mu \beta_{R_n P}} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \gamma_{\text{th}} \left( \beta_{SR_n}^Q + \mu \beta_{R_n D_m}^I \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\gamma} \right)^{L+N}, \tag{3.60}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\xi_3} &\simeq \prod_{m=1}^L \left( \mu \gamma_{\text{th}} \beta_{SD_m}^I \right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\mu \beta_{R_n P}}) e^{-\mu \beta_{SP}} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \gamma_{\text{th}} \left( \mu \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_n D_m}^Q \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\gamma} \right)^{L+N}, \tag{3.61}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\xi_4} &\simeq \prod_{m=1}^L \left( \mu \gamma_{\text{th}} \beta_{SD_m}^I \right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) e^{(-\mu(\beta_{SP} + \beta_{R_n P}))} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \mu \gamma_{\text{th}} \left( \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_n D_m}^I \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\gamma} \right)^{L+N}. \tag{3.62}
\end{aligned}$$

► **Amplifica-e-Encaminha**

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\vartheta_1} &\simeq \prod_{m=1}^L \left( \gamma_{\text{th}} \beta_{SD_m}^Q \right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\mu \beta_{SP}}) \times (1 - e^{-\mu \beta_{R_n P}}) \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \gamma_{\text{th}} \left( \beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_m}^Q \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\gamma} \right)^{L+N}, \tag{3.63}
\end{aligned}$$

$$P_{\text{out}}^{\vartheta_2} = P_{\text{out}}^{\xi_2}, P_{\text{out}}^{\vartheta_3} = P_{\text{out}}^{\xi_3}, P_{\text{out}}^{\vartheta_4} = P_{\text{out}}^{\xi_4}. \tag{3.64}$$

Analisando as equações acima, percebe-se que o sistema possui diversidade completa, com ordem de diversidade igual a  $N + L$ , tanto para o protocolo **DF** como para o **AF**. Pode-se notar também que o ganho de diversidade não é afetado pela restrição de interferência, sendo apenas determinado pelo número de *relays* e destinos da rede secundária. Porém, vale ressaltar que a presença da restrição de interferência pode causar uma saturação na probabilidade de *outage*.

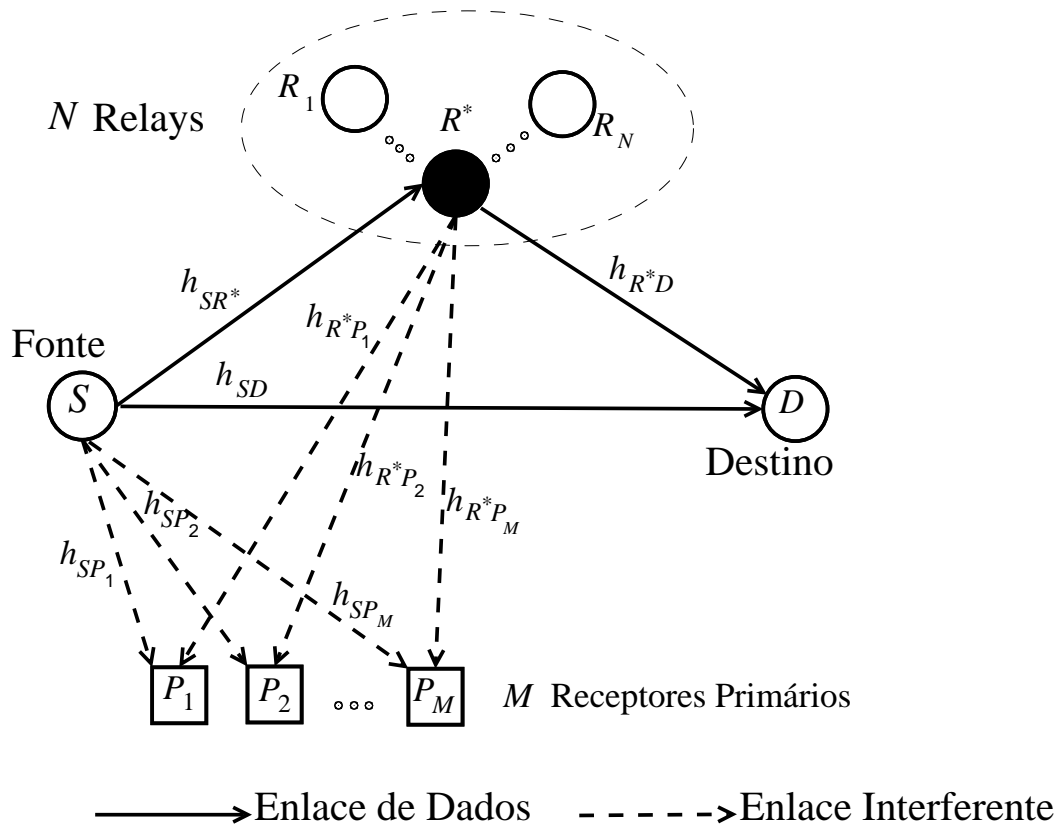
# Redes Cooperativas Cognitivas

## Multi-Relay : Um Destino e Vários Receptores Primários

Neste capítulo, diferentemente do Capítulo 3, o desempenho de *outage* de um SCCCE composto por uma fonte secundária,  $N$  relays secundários amplifica e encaminha (AF) ou decodifica e encaminha (DF), um destino secundário e  $M$  receptores primários, será investigado.

Assume-se a existência do enlace direto entre a fonte e o destino. A potência de transmissão dos nós secundários é escolhida de forma que a interferência que a rede secundária causa nos receptores primários fique abaixo de um dado limiar. Uma estratégia de seleção de *relay* é adotada na qual o *relay* selecionado será aquele que maximiza a SNR fim-a-fim e, simultaneamente, satisfaz o limiar de interferência imposto pelos  $M$  receptores primários. Após a seleção de *relay* ser realizada, o nó destino seleciona o melhor caminho enlace direto ou enlace via *relay*) proveniente da fonte utilizando um combinador do tipo SC.

Uma expressão aproximada e em forma fechada para a probabilidade de *outage* é encontrada, a partir da qual uma análise assintótica é realizada, revelando que a ordem de diversidade do esquema proposto iguala a  $N + 1$ , o que mostra que a mesma não é afetada nem pelo número de receptores primários nem pelo limiar de interferência. Simulações Monte Carlo são apresentadas no Capítulo 5 com o intuito de validar a presente análise.



**Figura 4.1:** Modelo sistêmico de uma rede cooperativa cognitiva multi-relay na presença um nó destino secundário e  $M$  receptores primários.

## 4.1 Modelo Sistêmico e Descrição do Esquema de Comunicação

Neste novo modelo sistêmico, a rede cooperativa cognitiva (RCC) é formada por uma fonte  $S$ ,  $N$  relays  $R_n$  ( $n = 1, \dots, N$ ), um destino  $D$  e  $M$  receptores primários  $P_m$  ( $m = 1, \dots, M$ ), como ilustrado na Figura 4.1.

Assim como na Sessão 3.1, os transmissores primários não são levados em consideração no processo de seleção e transmissão na rede secundária, pois é assumido que o transmissor primário se encontra distante da rede secundária, de forma que ele não interfere na comunicação secundária. Todos os nós são equipados com uma única antena e operam no modo *half-duplex*. Assume-se a presença de linha de visada entre  $S$  e  $D$ .

Seja também  $h_{JK}$  e  $d_{JK}$  os coeficientes de canal e a distância entre dois nós  $J$  e  $K$ , respectivamente ( $J \in \{S, R_n, R^*\}$ ,  $K \in \{R_n, R^*, P_m, D\}$ ). Os coeficientes de canal experimentam desvanecimento Rayleigh em bloco. Considera-se que todos os termos de ruído são AWGN com densidade espectral de potência igual a  $N_0$ .

Devido ao ambiente de compartilhamento espectral, existe uma restrição para a potência de transmissão da rede secundária. Diferentemente do



modelo anterior, por existir  $M$  receptores primários, cada um deles impõe um limite para a potência dos nós da rede secundária. Ou seja, as potências de transmissão para a fonte e para o  $n$ -ésimo *relay* são dadas, respectivamente, por [51], [50]

$$\overline{W}_S = \min \left( \min_m \frac{I_m}{|h_{SP_m}|^2}, P \right), \quad (4.1)$$

$$\overline{W}_{R_n} = \min \left( \min_m \frac{I_m}{|h_{R_n P_m}|^2}, P \right), \quad (4.2)$$

em que  $P$  é a máxima potência de transmissão dos respectivos nós secundários e  $I_m$  designa o limiar de interferência no  $m$ -ésimo receptor primário<sup>1</sup>.

Antes do processo de comunicação iniciar, um dos  $N$  *relays* é selecionado para ajudar no processo de comunicação da rede secundária. Aqui, assume-se que as informações de estado de canal (CSI) globais incluindo todos os canais estão disponíveis. Sendo assim, o melhor *relay* é escolhido de forma a maximizar a SNR fim-a-fim.

O processo de comunicação da RCC ocorre em duas fases, em que um esquema TDMA é empregado. Na primeira fase, a fonte envia a informação para o *relay* escolhido e para o destino e, na segunda, o *relay* processa a informação de acordo com o protocolo utilizado e a encaminha para o destino, como descrito na Seção 3.1. Concluída a transmissão em duas fases, um combinador do tipo SC é empregado no terminal destino. Neste caso, o percurso enlace direto ou enlace via *relay*) com a maior SNR instantânea é selecionado.

► Decodifica-e-Encaminha

Para o protocolo DF, o melhor *relay* é escolhido de acordo com (3.5). Assumindo que o *relay* selecionado é capaz de decodificar toda a informação recebida pela fonte e empregando a técnica de combinação SC do destino, a SNR fim-a-fim para o protocolo DF é dada por

$$\gamma_{\text{end}_2}^{DF} = \max \left[ \gamma_{SD}, \max_n \left[ \min \left[ \gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D} \right] \right] \right], \quad (4.3)$$

em que

---

<sup>1</sup>Assume-se que os receptores primários estão localizados em um ambiente tal que os enlaces de  $S$  para  $P_m$  experimentam desvanecimento Rayleigh i.i.d. O mesmo pode ser dito a respeito dos enlaces de  $R_n$  para  $P_m$ . Entretanto, os canais pertencente aos enlaces interferentes  $S$ - $P_m$  experimentam condições de desvanecimento Rayleigh distintas dos enlaces  $R_n$ - $P_m$ .

$$\gamma_{SD} = \overline{W}_S \frac{d_{SD}^{-\alpha} |h_{SD}|^2}{N_0}, \quad (4.4)$$

$$\gamma_{SR_n} = \overline{W}_S \frac{d_{SR_n}^{-\alpha} |h_{SR_n}|^2}{N_0}, \quad (4.5)$$

$$\gamma_{R_n D} = \overline{W}_{R_n} \frac{d_{R_n D}^{-\alpha} |h_{R_n D}|^2}{N_0}, \quad (4.6)$$

sendo  $\alpha$  o coeficiente de perda de percurso.

#### ► Amplifica-e-Encaminha

O protocolo **AF** considerado é o de ganho variável. Portanto, o melhor *relay* selecionado é dado por (3.9) e a **SNR** fim-a-fim pode ser escrita como

$$\gamma_{\text{end}_2}^{AF} = \max \left[ \gamma_{SD}, \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D}} \right] \right]. \quad (4.7)$$

## 4.2 Probabilidade de *outage*

### 4.2.1 Protocolo Cooperativo **DF**

Assim como no capítulo anterior, observe que os dois termos dentro do operador  $\max[\cdot, \cdot]$  em (4.3) não são estatisticamente independentes devido a presença da VA comum  $|h_{SP_m}|^2$ , o que torna a análise um pouco complicada.

Na análise subsequente, assume-se que  $I_m = I$ ,  $m = 1, \dots, M$ , de forma que as expressões  $\min_m (I_m / |h_{SP_m}|^2)$  e  $\min_m (I_m / |h_{R_n P_m}|^2)$  ficam equivalentes a  $I / (\max_m |h_{SP_m}|^2)$  e  $I / (\max_m |h_{R_n P_m}|^2)$ , respectivamente.

Seja  $X_2 = \max_m |h_{SP_m}|^2$ . De acordo com a lei da probabilidade condicional [61], a probabilidade de *outage* condicional pode ser escrita como

$$\Pr(\gamma_{\text{end}_2}^{DF} < \gamma_{\text{th}} | X_2) = \overbrace{\Pr(\gamma_{SD} < \gamma_{\text{th}} | X_2)}^{\theta_2} \times \underbrace{\Pr\left(\max_n [\min[\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D}]] < \gamma_{\text{th}} | X_2\right)}_{\Psi_2}, \quad (4.8)$$

Uma vez que os ganhos de canal são exponencialmente distribuídos,  $\theta_2$  em (4.8) pode ser calculado como

$$\theta_2 = F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{\text{th}} | X_2) = 1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}}, \quad (4.9)$$

em que  $\beta_{SD} \triangleq 1/E[\gamma_{SD}]$ .

Por sua vez,  $\Psi_2$  é dado por

$$\Psi_2 = \prod_{n=1}^N [(1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SRn}}) + (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{RnD}}) - (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SRn}}) (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{RnD}})], \quad (4.10)$$

em que foi utilizada a identidade (3.18), e  $\beta_{RnD} \triangleq 1/E[\gamma_{RnD}]$ .

Seja agora  $Y_2 = \max_m |h_{RnP_m}|^2$ . Utilizando o Teorema da Probabilidade Total [61], a probabilidade de *outage* pode ser determinada como

$$P_{out_2}^{DF} = \int_0^\infty \int_0^\infty F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X_2, Y_2) \times f_{X_2}(x) f_{Y_2}(y) dx dy, \quad (4.11)$$

em que

$$\gamma_{SR^*D} = \max_n [\min[\gamma_{SRn}, \gamma_{RnD}]]. \quad (4.12)$$

Para determinar as PDFs de  $X_2$  e  $Y_2$ , seja  $V$  um conjunto de  $m$  VAs independentes e  $U = \max[V]$ , então [61]

$$f_U(u) = \frac{dF_U(u)}{du} = \frac{F_V^m(v)}{dv} = m F_V^{m-1}(v) f_V(v) \quad (4.13)$$

Logo

$$\begin{aligned} f_{X_2}(x) &= M(1 - e^{-x \beta_{SP}})^{(M-1)} \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}}, \\ f_{Y_2}(y) &= M(1 - e^{-y \beta_{RnP}})^{(M-1)} \beta_{RnP} e^{-y \beta_{RnP}}, \end{aligned} \quad (4.14)$$

em que  $\beta_{SP} \triangleq 1/E[X_2]$ ,  $\beta_{RnP} \triangleq 1/E[Y_2]$ .

Baseado em (3.24) e (3.25), e para satisfazer todas as combinações das condições da potência de transmissão, a probabilidade de *outage* pode ser calculada expandido (4.11) em uma soma de quatro termos, sendo cada um expresso como uma integral dupla. Mais especificamente,  $P_{out}$  pode ser reescrita como  $P_{out_2}^{DF} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4$ , em que

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X_2, Y_2) \\ &\times f_{X_2}(x) f_{Y_2}(y) dx dy, \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_2 &= \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^\infty F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X_2, Y_2) \\ &\times f_{X_2}(x) f_{Y_2}(y) dx dy, \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_3 &= \int_{I/Q}^{\infty} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{\text{th}}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{\text{th}}|X_2, Y_2) \\ &\times f_{X_2}(x) f_{Y_2}(y) dx dy, \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_4 &= \int_{I/Q}^{\infty} \int_{I/Q}^{\infty} F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{\text{th}}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{\text{th}}|X_2, Y_2) \\ &\times f_{X_2}(x) f_{Y_2}(y) dx dy, \end{aligned} \quad (4.18)$$

em que, sem perda de generalidade, considera-se que  $\overline{W}_S = \overline{W}_{R_n} = Q$ .

Fazendo as substituições apropriadas em (4.15), tem-se

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q}\right) \prod_{n=1}^N \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_nD}^Q)}\right) \\ &\times M(1 - e^{-x \beta_{SP}})^{(M-1)} \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} \times M(1 - e^{-y \beta_{R_nP}})^{(M-1)} \beta_{R_nP} e^{-y \beta_{R_nP}} dx dy. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Utilizando a expansão binomial (3.37) para reescrever as PDFs de  $X_2$  e  $Y_2$  dadas em (4.14), e resolvendo a integral (4.19), segue-se que

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q}\right) \prod_{n=1}^N \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_nD}^Q)}\right) \\ &\times M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^m (-1)^t \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\ &\times \frac{\left(1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}(m+1)}\right)}{\beta_{SP}(m+1)} \frac{\left(1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_nP}(t+1)}\right)}{\beta_{R_nP}(t+1)}. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Por sua vez,  $\epsilon_2$  pode ser expresso como

$$\begin{aligned} \epsilon_2 &= \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q}\right) \prod_{n=1}^N \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n}^Q + y \beta_{R_nD}^I)}\right) \\ &\times M(1 - e^{-x \beta_{SP}})^{(M-1)} \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} M(1 - e^{-y \beta_{R_nP}})^{(M-1)} \\ &\times \beta_{R_nP} e^{-y \beta_{R_nP}} dx dy. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Assim como no modelo sistêmico anterior, no Capítulo 3, assume-se que os enlaces de  $S$  para  $R_n$  e, de  $S$  e  $R_n$  para  $D$  são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d). Portanto,

$$\begin{aligned}
\epsilon_2 &= \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q}\right) \sum_{n=0}^N \binom{n}{N} (-1)^n \exp \left[ -\gamma_{\text{th}} \left( \beta_{SR_n}^Q + y \beta_{R_nD}^I \right) \right]^{N-n} \\
&\quad \times M(1 - e^{-x \beta_{SP}})^{(M-1)} \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} M(1 - e^{-y \beta_{R_nP}})^{(M-1)} \\
&\quad \times \beta_{R_nP} e^{-y \beta_{R_nP}} dx dy,
\end{aligned} \tag{4.22}$$

resultando em

$$\begin{aligned}
\epsilon_2 &= M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N (-1)^{(m+t+n)} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \binom{N}{n} \beta_{R_nP} \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q}\right) \\
&\quad \times \frac{\left(1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}(m+1)}\right) \exp \left( -\gamma_{\text{th}} n \left( \beta_{SR_n}^Q + \frac{I}{Q} \beta_{R_nD}^I \right) - \frac{I}{Q} \beta_{R_nP}(t+1) \right)}{\beta_{SP}(m+1) \left( \gamma_{\text{th}} n \beta_{R_nD}^I + \beta_{R_nP}(t+1) \right)}.
\end{aligned} \tag{4.23}$$

A fim de evitar repetição na formulação analítica, (4.17) e (4.18) podem ser expressos na forma exata, respectivamente, por:

$$\begin{aligned}
\epsilon_3 &= \sum_{l=0}^1 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N M^2 (-1)^{(m+t+n+l)} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \binom{N}{n} \frac{\left(1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_nP}(t+1)}\right)}{\beta_{R_nP}(t+1)} \\
&\quad \times \exp \left( -l \frac{I}{Q} \gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^I \right) \beta_{SP} \frac{\exp \left( -n \gamma_{\text{th}} \left( \frac{I}{Q} \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_nD}^Q \right) - \frac{I}{Q} \beta_{SP}(m+1) \right)}{l \gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^I + n \gamma_{\text{th}} \beta_{SR_n}^I + \beta_{SP}(m+1)}.
\end{aligned} \tag{4.24}$$

e

$$\begin{aligned}
\epsilon_4 &= \sum_{l=0}^1 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N M^2 (-1)^{(m+t+n+l)} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \binom{N}{n} \\
&\quad \times \beta_{R_nP} \beta_{SP} \exp \left( -l \frac{I}{Q} \gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^I \right) \exp \left( -\frac{I}{Q} \beta_{R_nP}(t+1) \right) \\
&\quad \times \frac{1}{n \gamma_{\text{th}} \beta_{R_nD}^I + \beta_{R_nP}(t+1)} \frac{\exp \left( -n \gamma_{\text{th}} \frac{I}{Q} \left( \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_nD}^I \right) - \frac{I}{Q} \beta_{SP}(m+1) \right)}{l \gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^I + n \gamma_{\text{th}} \beta_{SR_n}^I + \beta_{SP}(m+1)}.
\end{aligned} \tag{4.25}$$

#### 4.2.2 Protocolo Cooperativo AF

Utilizando as mesmas considerações feitas para o protocolo DF a probabilidade de outage condicional para o protocolo AF de ganho fixo pode ser escrita da seguinte forma

$$\Pr \left( \gamma_{\text{end}_2}^{AF} < \gamma_{\text{th}} | X_2 \right) = \Pr \left( \gamma_{SD} < \gamma_{\text{th}} | X_2 \right) \times \underbrace{\Pr \left( \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_nD}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_nD}} \right] < \gamma_{\text{th}} | X_2 \right)}_{\Omega_2}, \tag{4.26}$$

em que  $\Pr(\gamma_{SD} < \gamma_{th}|X_2)$  é dada por (4.9) e  $\Omega_2$  é dado por [62]

$$\Omega_2 = \int_0^\infty \Pr\left(\left[\frac{\gamma_{SR_n}\gamma_{R_nD}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_nD}}\right] < \gamma_{th}|h_{SP}\right) \times f_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{SR_n})d\gamma_{SR_n}, \quad (4.27)$$

resultando em (3.50) para  $D_l = D$ .

Utilizando o Teorema da Probabilidade Total, a probabilidade de outage pode ser determinada como

$$P_{out_2}^{AF} = \int_0^\infty \int_0^\infty F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X_2, Y_2) \times f_{X_2}(x)f_{Y_2}(y)dx dy, \quad (4.28)$$

em que

$$\gamma_{SR^*D} = \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n}\gamma_{R_nD}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_nD}} \right], \quad (4.29)$$

e  $f_{X_2}(\cdot)$  e  $f_{Y_2}(\cdot)$  é dado por (4.14).

Utilizando-se do mesmo raciocínio empregado para o protocolo DF a probabilidade de outage pode ser expressa como a soma de quatro termos, ou seja,  $P_{out_2}^{AF} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$ , em que  $\lambda_i$  é expresso da mesma forma que  $\epsilon_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , somente fazendo as substituições apropriadas para o caso AF.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X_2, Y_2) \\ &\times f_{X_2}(x)f_{Y_2}(y)dx dy, \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^\infty F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X_2, Y_2) \\ &\times f_{X_2}(x)f_{Y_2}(y)dx dy, \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= \int_{I/Q}^\infty \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X_2, Y_2) \\ &\times f_{X_2}(x)f_{Y_2}(y)dx dy, \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \lambda_4 &= \int_{I/Q}^\infty \int_{I/Q}^\infty F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X_2) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X_2, Y_2) \\ &\times f_{X_2}(x)f_{Y_2}(y)dx dy. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Portanto, após algumas manipulações algébricas, mostra-se que

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q}\right) \\
&\times \prod_{n=1}^N \left( \left(1 - \beta_{SR_n}^Q e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_nD}^Q)}\right) 2 \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \beta_{R_nD}}{\beta_{SR_n}}} K_1 \left(2 \sqrt{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \beta_{R_nD} \beta_{SR_n}}\right) \right) \\
&\times \frac{\left(1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}(m+1)}\right) \left(1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_nP}(t+1)}\right)}{\beta_{SP}(m+1) \beta_{R_nP}(t+1)}. \tag{4.34}
\end{aligned}$$

Similarmente, após as substituições apropriadas, (4.31) pode ser escrito como

$$\begin{aligned}
\lambda_2 &= \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q}\right) M(1 - e^{-x \beta_{SP}})^{(M-1)} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left( \left(1 - \beta_{SR_n}^Q e^{-\gamma_{\text{th}}(\beta_{SR_n}^Q + y \beta_{R_nD}^I)}\right) \right. \\
&\times \left. 2 \sqrt{\frac{y \gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \beta_{R_nD}^I}{\beta_{SR_n}}} K_1 \left(2 \sqrt{y \gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1) \beta_{R_nD}^I \beta_{SR_n}}\right) \right) \\
&\times \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} M(1 - e^{-y \beta_{R_nP}})^{(M-1)} \times \beta_{R_nP} e^{-y \beta_{R_nP}} dx dy. \tag{4.35}
\end{aligned}$$

Para calcular o valor de  $\lambda_2$ , é utilizada a mesma aproximação feita no Capítulo 3, ou seja,  $K_1(\zeta) \simeq 1/\zeta$ . Portanto

$$\begin{aligned}
\lambda_2 &\simeq \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} \left(1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q}\right) \sum_{n=0}^N \binom{n}{N} (-1)^n \exp \left[-\gamma_{\text{th}} \left(\beta_{SR_n}^Q + y \beta_{R_nD}^I\right)\right]^{N-n} \\
&\times M(1 - e^{-x \beta_{SP}})^{(M-1)} \beta_{SP} e^{-x \beta_{SP}} M(1 - e^{-y \beta_{R_nP}})^{(M-1)} \\
&\times \beta_{R_nP} e^{-y \beta_{R_nP}} dx dy, \tag{4.36}
\end{aligned}$$

resultando em (4.23). Seguindo os mesmos passos feitos para o cálculo de  $\lambda_2$ , os valores de  $\lambda_3$  em (4.32) e  $\lambda_4$  em (4.33), podem ser aproximados, respectivamente, por (4.24) e (4.25). Finalmente, substituindo (4.34), (4.36), (4.24) e (4.25) em  $P_{\text{out}_2}^{AF}$ , uma expressão aproximada e em forma fechada para a probabilidade de *outage* é obtida.

### 4.3 Análise Assintótica

Na sequência, uma análise assintótica é apresentada com intuito de obter alguns *insights* do sistema em estudo. Por exemplo, a partir da análise assintótica, o ganho de diversidade do sistema considerado é obtido, sendo mostrado que ele não é afetado nem pelo número de receptores primários e

nem pelo limiar de interferência estabelecido pelos receptores primários.

Para realizar a análise assintótica, seja  $\bar{\gamma} \triangleq 1/N_0$  a SNR do sistema e seja  $Q/W = \mu$ , em que  $\mu$  é uma constante positiva. Utilizando a expansão em série de MacLaurin para a função exponencial e a aproximação da função Bessel,  $K_1(\tau) \simeq 1/\tau$ , e percebendo que quando  $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ ,  $\lambda_{SP} \gg \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}$  e  $\lambda_{R_nP} \gg \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}$ , uma expressão assintótica para cada termo  $\epsilon_i$  e  $\lambda_i$  pode ser encontrada

► Decodifica-e-Encaminha

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\epsilon_1} &\simeq \left( \gamma_{th} \beta_{SD}^Q \right) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\
&\times \frac{(1 - e^{-\mu \beta_{SP}(m+1)}) (1 - e^{-\mu \beta_{R_nP}(t+1)})}{\beta_{SP}(m+1) \beta_{R_nP}(t+1)} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \gamma_{th} \left( \beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_nD}^Q \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\bar{\gamma}} \right)^{N+1}, \tag{4.37}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\epsilon_2} &\simeq \left( \gamma_{th} \beta_{SD}^Q \right) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\
&\times \frac{(1 - e^{-\mu \beta_{SP}(m+1)}) e^{-\mu \beta_{R_nP}(t+1)}}{\beta_{SP}(m+1) \beta_{R_nP}(t+1)} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \gamma_{th} \left( \beta_{SR_n}^Q + \mu \beta_{R_nD}^I \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\bar{\gamma}} \right)^{N+1}, \tag{4.38}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\epsilon_3} &\simeq \left( \mu \gamma_{th} \beta_{SD}^I \right) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\
&\times \frac{(1 - e^{-\mu \beta_{R_nP}(t+1)}) e^{-\mu \beta_{SP}(m+1)}}{\beta_{R_nP}(t+1) \beta_{SP}(m+1)} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \gamma_{th} \left( \mu \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_nD}^Q \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\bar{\gamma}} \right)^{N+1}, \tag{4.39}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\epsilon_4} &\simeq \left( \mu \gamma_{th} \beta_{SD}^I \right) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\
&\times \frac{e^{-\mu \beta_{R_nP}(t+1)} e^{-\mu \beta_{SP}(m+1)}}{\beta_{R_nP}(t+1) \beta_{SP}(m+1)} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \mu \gamma_{th} \left( \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_nD}^I \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\bar{\gamma}} \right)^{N+1}. \tag{4.40}
\end{aligned}$$



► Amplifica-e-Encaminha

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\lambda_1} &\simeq \left( \gamma_{\text{th}} \beta_{SD}^Q \right) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\
&\times \frac{(1 - e^{-\mu \beta_{SP}(m+1)})}{\beta_{SP}(m+1)} \frac{(1 - e^{-\mu \beta_{R_n P}(t+1)})}{\beta_{R_n P}(t+1)} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left[ \gamma_{\text{th}} \left( \beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D}^Q \right) \right] \propto \left( \frac{1}{\bar{\gamma}} \right)^{N+1}, \tag{4.41}
\end{aligned}$$

$$P_{\text{out}}^{\lambda_2} = P_{\text{out}}^{\epsilon_2}, P_{\text{out}}^{\lambda_3} = P_{\text{out}}^{\epsilon_3}, P_{\text{out}}^{\lambda_4} = P_{\text{out}}^{\epsilon_4}. \tag{4.42}$$

Das expressões analíticas acima, é fácil perceber que o sistema possui ordem de diversidade igual a  $N + 1$ . Observe que as restrições de interferência nem o número de receptores primários influenciam no ganho de diversidade, porém estas restrições de interferência podem causar uma saturação na probabilidade de *outage* como é observado nos resultados no Capítulo 5.

## Resultados Numéricos, Simulações e Discussões

Neste capítulo, exemplos numéricos e simulações de Monte Carlo são apresentados com o intuito de avaliar o desempenho de *outage* das redes cooperativas cognitivas investigadas e validar as análises apresentadas neste trabalho. Todos os casos investigados revelam uma excelente concordância (exato  $\rightarrow$  *relays DF*; aproximado  $\rightarrow$  *relays AF*) entre os resultados analíticos e simulados.

O desempenho da probabilidade de *outage* é avaliado em função da **SNR** do sistema ou da potência disponível na rede secundária para cada um dos modelos sistêmicos estudados, em termos dos diversos parâmetros existentes em cada sistema.

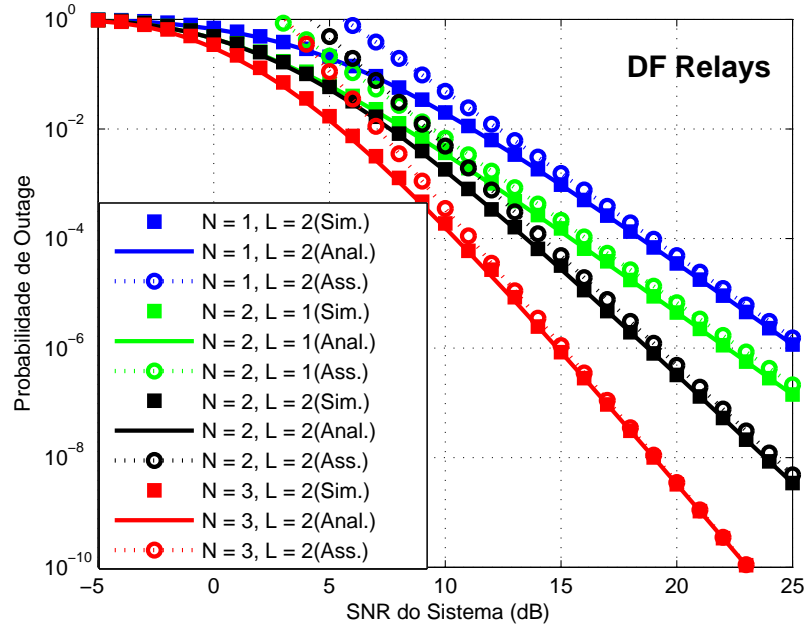
### 5.1 Redes Cooperativas Cognitivas Multi-Relay : Vários Destinos e um Receptor Primário

Com o objetivo de avaliar o desempenho da rede cooperativa cognitiva multi-usuário considerada, alguns gráficos são agora apresentados.

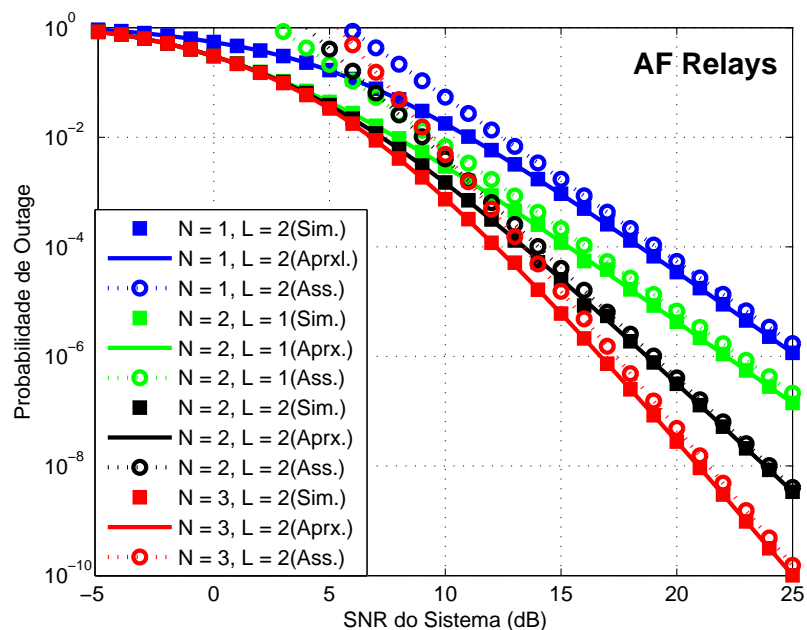
Assume-se que a média estatística dos ganhos de canal é determinada pela distância entre os nós. Além disso, sem perda de generalidade, o limiar  $\gamma_{th}$  e o coeficiente de perda de percurso  $\alpha$  escolhidos são 3 dB e 4, respectivamente. De forma similar a [62], a **RCC** é gerada em um plano 2-D em que a fonte secundária está localizada em  $(0; 0)$ , os nós destinos são posicionados em  $(1; 0)$ , os *relays* são colocados em  $(0, 5; 0)$ , e o receptor primário está localizado em  $(0; 1)$ . Observa-se uma excelente concordância entre os resultados analíticos e simulados.

As Figuras 5.1 e 5.2 descrevem o comportamento de *outage versus* a **SNR** do sistema para diferentes combinações de *relays* e destinos secundários,

adotando os protocolos DF e AF respectivamente. As curvas assintóticas estão muito próximas das curvas simuladas em regiões de alta SNR, o que confirma a coerência da análise feita. Nota-se também que a ordem de diversidade é dada por  $L + N$ , como esperado.

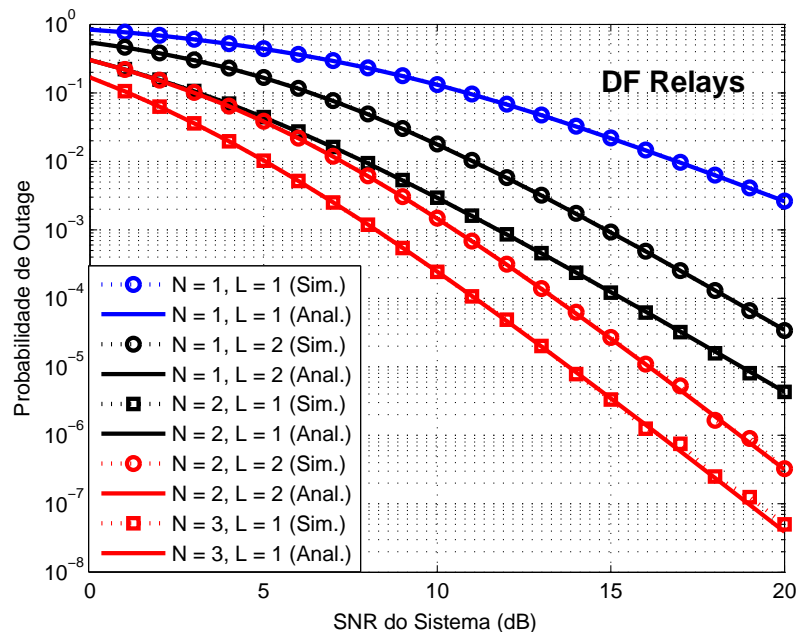


**Figura 5.1:** Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes combinações de *relays* e destinos secundários para o protocolo DF ( $I = Q = 0.5$ ).



**Figura 5.2:** Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes combinações de *relays* e destinos secundários para o protocolo AF ( $I = Q = 0.5$ ).

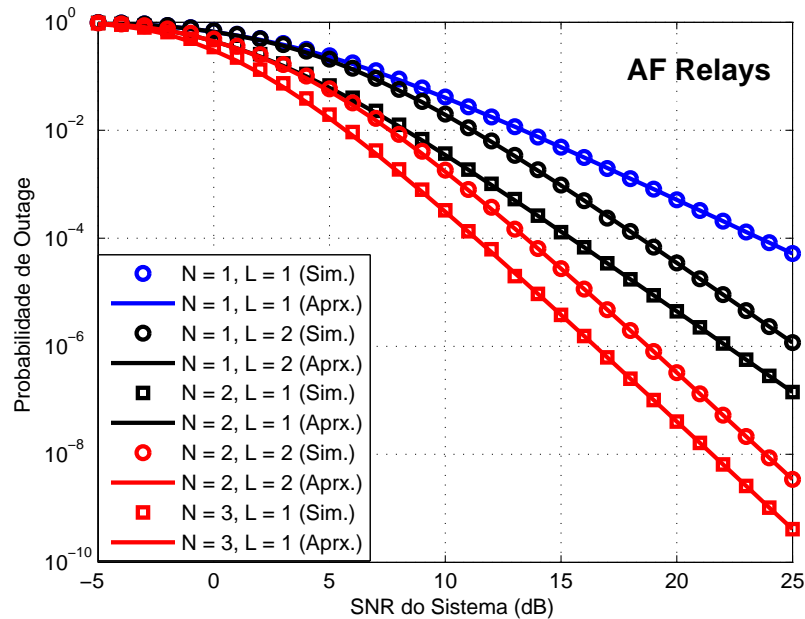
Para um análise mais detalhada, as Figuras 5.3 e 5.4 mostram a probabilidade de *outage* para casos em que a ordem de diversidade é mantida a mesma. Por exemplo, em ambas as figuras considerando a ordem de diversidade igual a 4, o caso  $\{N = 3, L = 1\}$  apresenta um melhor desempenho do que o caso quando  $\{N = 2, L = 2\}$ . Em outras palavras, para a mesma ordem de diversidade, o desempenho de *outage* é melhor quando o número de *relays* secundários ultrapassa o número de destinos secundários. Isto mostra que o uso da diversidade cooperativa é mais benéfico para o desempenho sistêmico do que a diversidade multiusuário, o que motiva o seu uso. Isto ocorre devido ao ganho de perda de percurso com a inserção de mais nós *relay* na rede. Devido ao fato dos *relays* estarem mais perto da fonte do que os destinos, a probabilidade dos *links* fonte-*relay* estarem em *outage* é menor, na média, do que a probabilidade dos *links* fonte-destino.



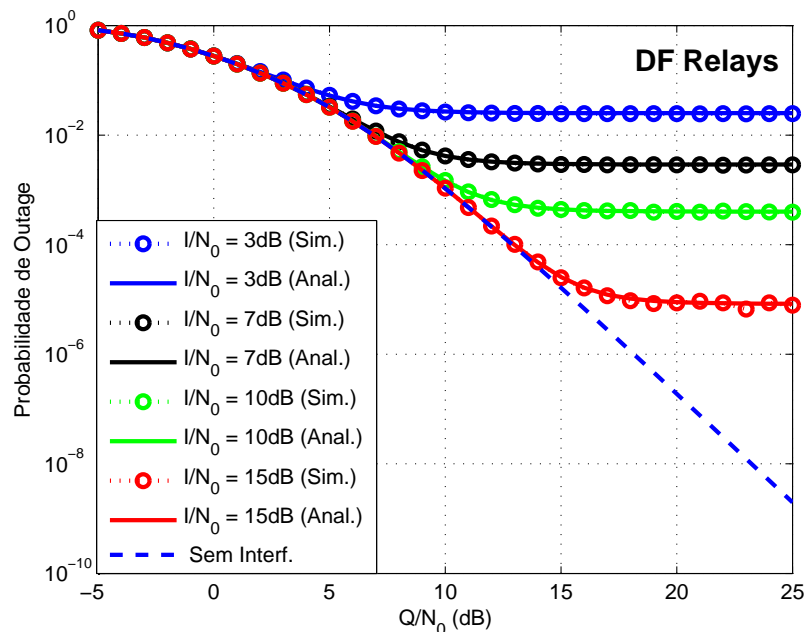
**Figura 5.3:** Probabilidade de *outage* para diferentes combinações de *relays* e destinos secundários para o protocolo DF ( $I = Q = 0.5$ ).

Figuras 5.5 e 5.6 mostram o impacto do limiar de interferência na probabilidade de *outage* do sistema assumindo  $N = L = 2$ . Percebe-se que, devido a restrição de interferência, a probabilidade de *outage* do sistema satura por atingir o teto para a potência de transmissão. Além disso, ao passo que  $I$  se torna maior, o desempenho sistêmico melhora, se aproximando do caso sem interferência.

Na Figura 5.7, uma análise comparativa de *outage* entre as duas estratégias de *relay* é feita assumindo mesma ordem de diversidade (i.e., 6). Para que as figuras ficassem mais claras, os dados de simulação foram omitidos. Como esperado, o desempenho de *outage* para o protocolo DF é melhor do que o

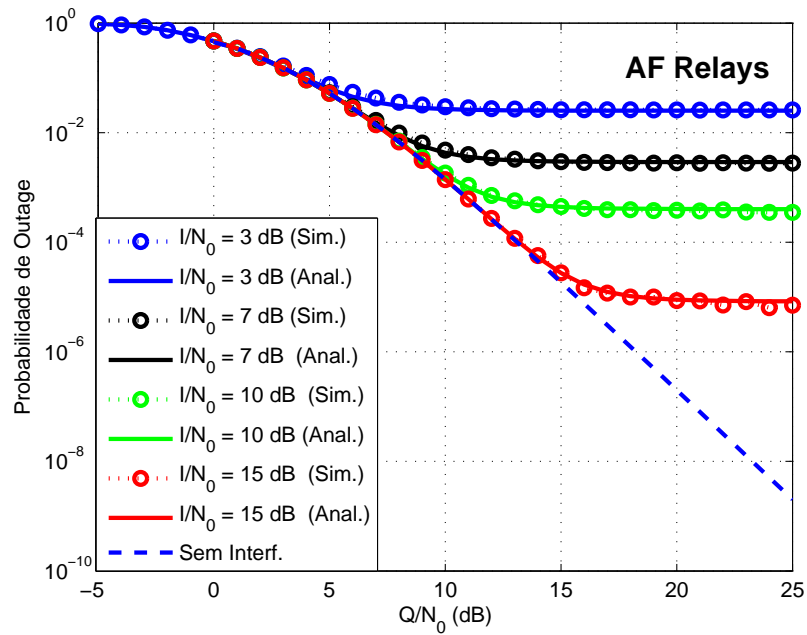


**Figura 5.4:** Probabilidade de *outage* para diferentes combinações de *relays* e destinos secundários para o protocolo AF ( $I = Q = 0.5$ ).



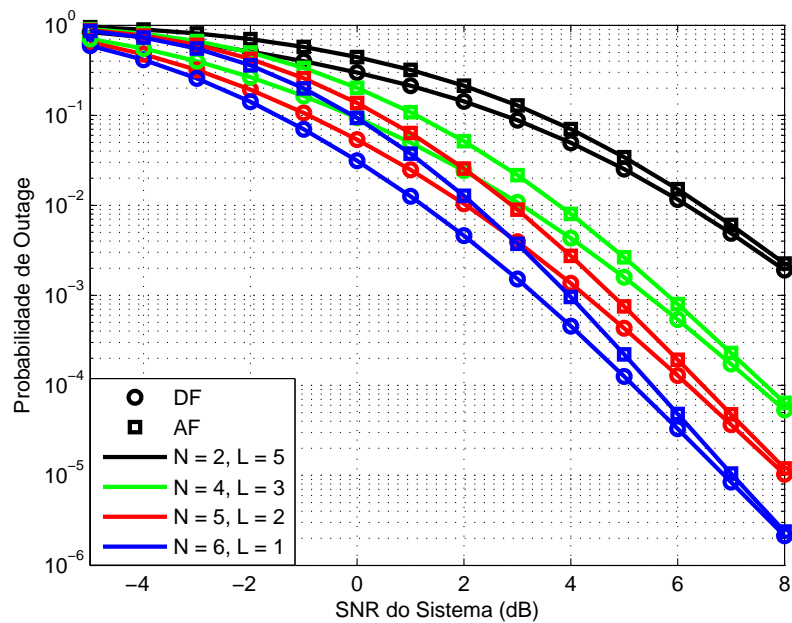
**Figura 5.5:** Impacto da restrição de interferência no comportamento do sistema para o protocolo DF.

desempenho do protocolo AF. É observado também que, quando a diversidade cooperativa aumenta, a diferença de desempenho entre os dois protocolos aumenta em baixas SNRs. Isto significa que, quando a diversidade cooperativa aumenta, a escolha do protocolo DF é preferida. Finalmente, na Figura 5.8, uma análise comparativa entre ambos os protocolos é feita assumindo o caso de saturação da probabilidade de *outage*. Como esperado, o desempenho de *outage* melhora para valores mais altos de ordem de diversidade. Além do

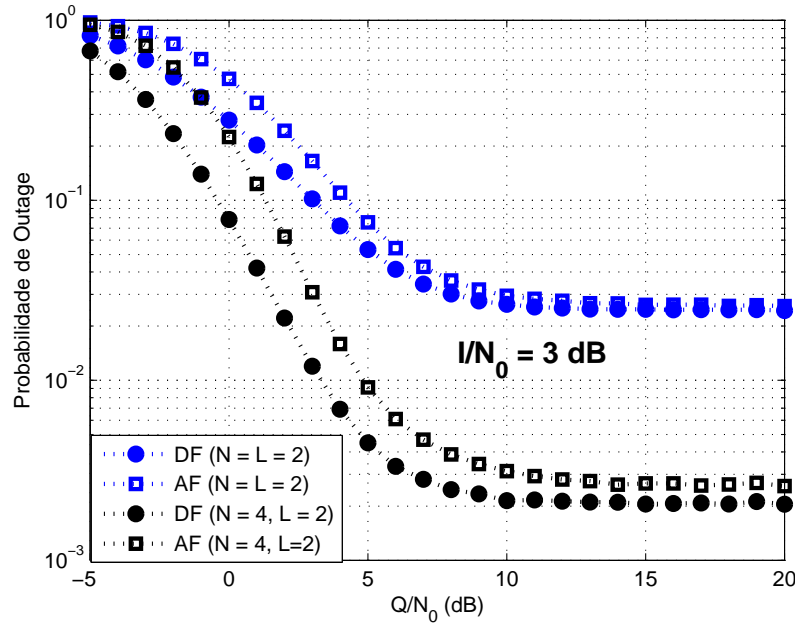


**Figura 5.6:** Impacto da restrição de interferência no comportamento do sistema para o protocolo AF.

mais, como observado na Figura 5.7, a diferença de desempenho entre DF e AF aumenta quando a diversidade cooperativa aumenta (i.e., quando  $N$  aumenta.)



**Figura 5.7:** Análise comparativa de *outage* entre os protocolos DF e AF quando  $Q = I = 0.5$ .



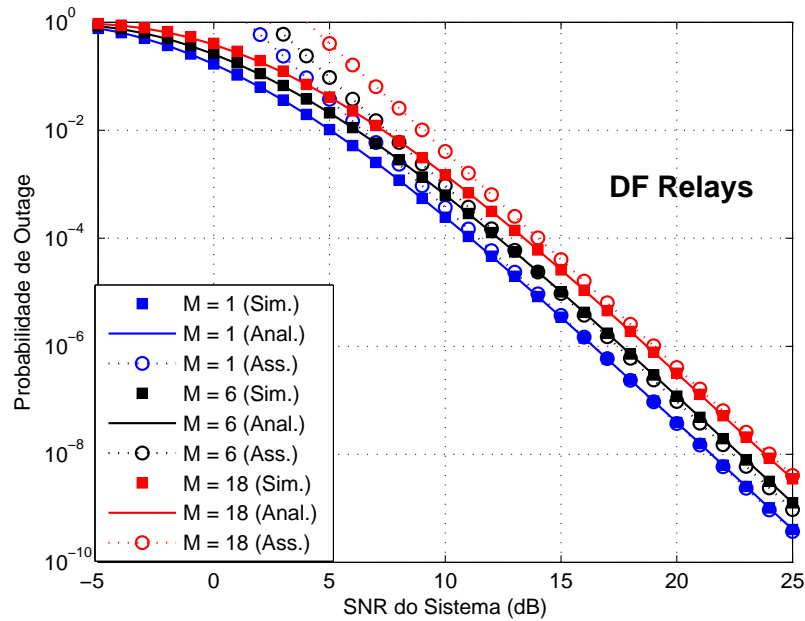
**Figura 5.8:** Análise comparativa de *outage* entre os protocolos DF e AF quando a probabilidade de *outage* satura.

## 5.2 Redes Cooperativas Cognitivas Multi-Relay : Um Destino e Vários Receptores Primários

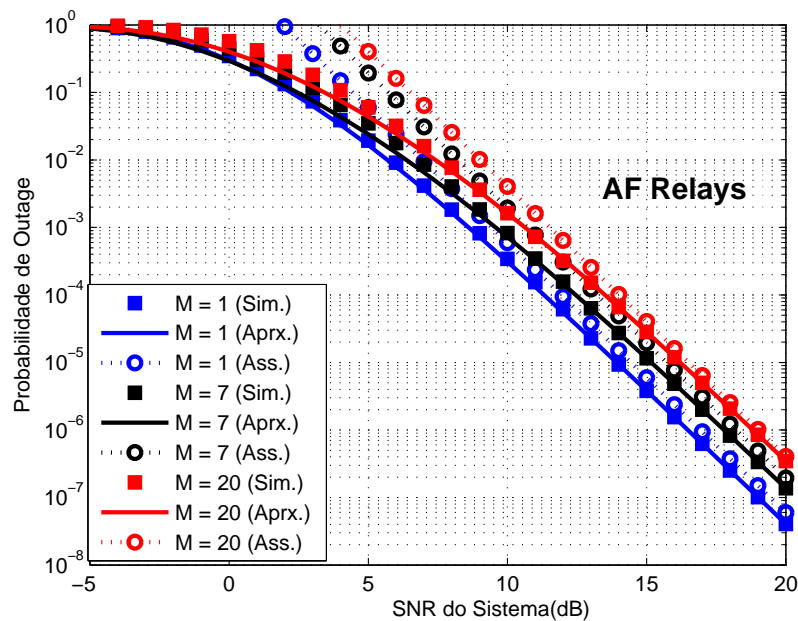
Nesta seção, alguns exemplos numéricos são apresentados com o intuito de validar a análise apresentada no Capítulo 4. Novamente, considera-se um plano bidimensional para a localização dos nós da rede, onde, sem perda de generalidade, a fonte secundária está localizada em  $(0;0)$ , os  $N$  relays secundários estão posicionados em  $(0,5;0)$ , o destino secundário está localizado em  $(1;0)$  e os  $M$  receptores primários estão posicionados em  $(0;1)$ . A média estatística dos ganhos de canal entre dois nós é determinada por  $d^{-\alpha}$ , com  $d$  denotando a distância entre os respectivos nós e  $\alpha$  sendo o coeficiente de perda de percurso, cujo valor escolhido na simulação foi  $\alpha = 4$ . O limiar de *outage*,  $\gamma_{th}$ , escolhido foi 3 dB.

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram o comportamento das curvas *outage* exata, para o protocolo DF, aproximada, para o protocolo AF, e assintótica para ambos os protocolos, assumindo  $N = 3$  relays e diferentes números de receptores primários. Como esperado, quando o número de receptores primários aumenta, o desempenho de *outage* piora. Entretanto, pode ser visto que o número de receptores primários não influencia na ordem de diversidade do sistema, a qual é igual a  $N + 1$  para ambos protocolos cooperativos.

Diferentemente das Figuras 5.9 e 5.10, nas Figuras 5.11 e 5.12 foi fixado o número de receptores primários,  $M = 3$ , e variado o número de relays para o protocolo DF e AF respectivamente. Como esperado, percebe-se que o aumento



**Figura 5.9:** Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes números de receptores primários para o protocolo DF ( $N = 3$ ,  $I/N_0 = Q/N_0$ ).

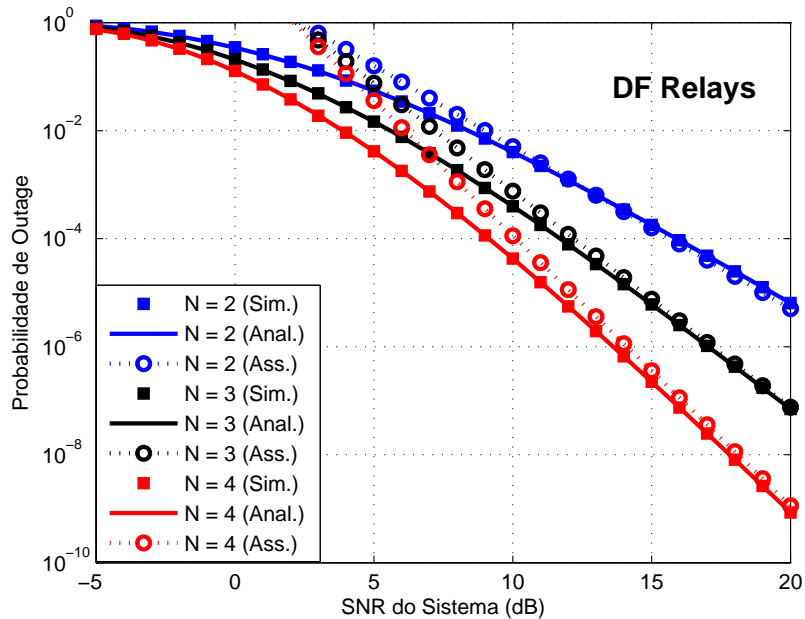


**Figura 5.10:** Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes números de receptores primários para o protocolo AF ( $N = 3$ ,  $I/N_0 = Q/N_0$ ).

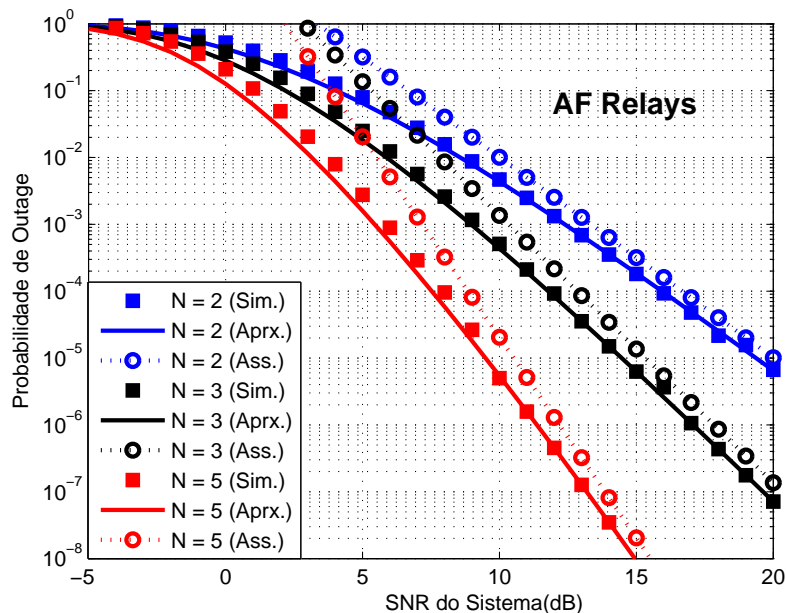
de  $N$  provoca um melhor desempenho de *outage* e um aumento na ordem de diversidade do sistema, mostrando que a diversidade cooperativa apresenta um grande benefício para o desempenho do sistema. Nestas duas figuras, as curvas assintóticas e aproximada estão muito próximas da curva simulada em regiões de alta SNR, o que confirma que a análise feita está correta para



o protocolo cooperativo AF de ganho variável. Para o DF as figuras mostram um perfeito casamento entre as curvas teórica e simuladas, validando, assim, a análise desenvolvida no Capítulo 4.



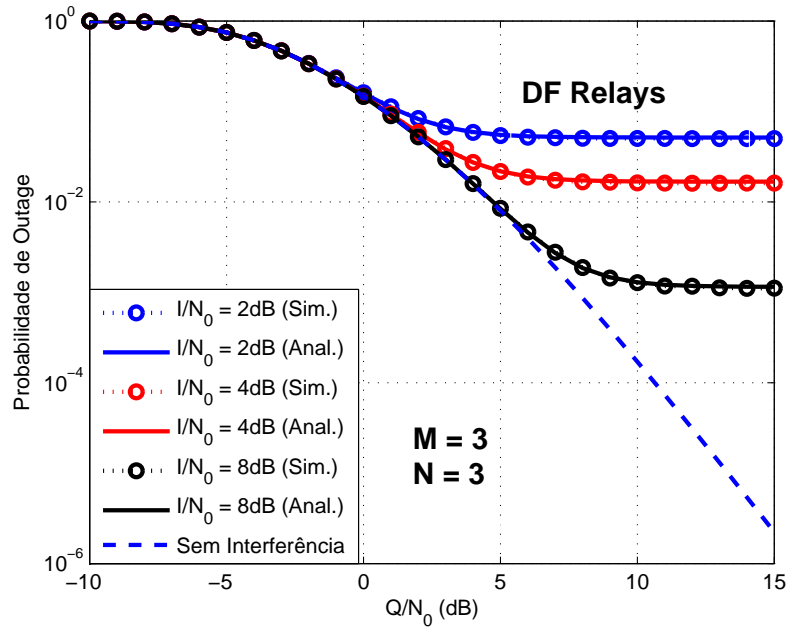
**Figura 5.11:** Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes números de *relays* para o protocolo DF ( $M = 3$ ,  $I/N_0 = Q/N_0$ ).



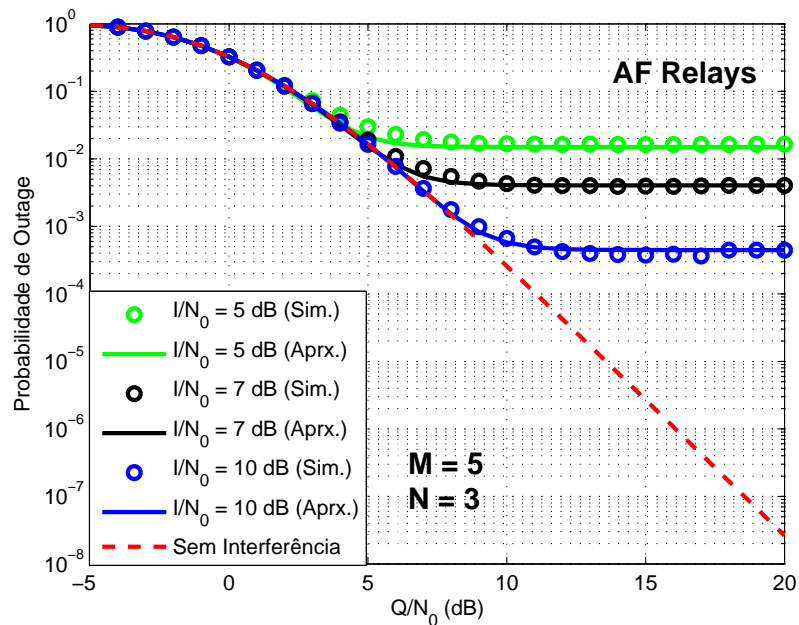
**Figura 5.12:** Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes números de *relays* para o protocolo AF ( $M = 3$ ,  $I/N_0 = Q/N_0$ ).

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram como a restrição de interferência,  $I$ , influencia no desempenho de *outage*. Assumindo  $N = M = 3$  para o protocolo DF e  $N = 3, M = 5$  para o protocolo AF, percebe-se que o sistema satura

após um certo valor de  $Q/N_0$ . Isto acontece porque o sistema atinge a máxima potência de transmissão permitida. Além disso, quando o limiar de interferência aumenta, o comportamento sistêmico se aproxima do caso de “não-interferência”.



**Figura 5.13:** Impacto da restrição de interferência na probabilidade de *outage* para o protocolo DF ( $M = 3, N = 3$ ).



**Figura 5.14:** Impacto da restrição de interferência na probabilidade de *outage* para o protocolo AF ( $M = 5, N = 3$ ).

## Conclusões e Perspectivas

Nesta dissertação o desempenho de **RCCs** com compartilhamento espectral foi investigado para dois modelos sistêmicos. O primeiro, uma **RCC** multiusuário na presença de um receptor primário. Já o segundo, um sistema cooperativo cognitivo com um destino e  $M$  receptores primários.

No primeiro sistema, empregando um esquema de seleção de nós eficiente e um receptor do tipo **SC** no destino secundário selecionado, uma expressão exata e outra aproximada em forma fechada para os protocolos **DF** e **AF**, respectivamente, para a probabilidade de *outage* foi encontrada e validada através de simulações Monte Carlo. Uma análise assintótica foi realizada, revelando que a interferência imposta pela rede primária não influencia na ordem de diversidade do sistema considerado a qual é igual a  $N + L$ . Os resultados encontrados mostraram-se ser simples e computacionalmente eficientes, devido ao número de estimativas e comparações de *links* feitos quando comparado com um método de seleção de nós ótimo, sendo de suma importância para o desenvolvimento futuro de redes cooperativas cognitivas multiusuário com compartilhamento espectral.

Já para o segundo modelo sistêmico considerado, cada receptor primário impôs uma restrição de interferência para a potência de transmissão dos nós da rede secundária. Baseada em cada uma destas restrições, foi empregada uma estratégia de seleção de *relay*, na qual o *relay* escolhido era aquele que maximizasse a **SNR** do *link* via *relay*. Novamente, foi encontrada uma expressão analítica exata para a probabilidade de *outage* para o protocolo cooperativo **DF** e uma expressão aproximada para o protocolo **AF**. Observou-se que: (i) nem o número de receptores nem os limiares de interferência têm influência na ordem de diversidade do sistema, e (ii) a restrição de interferência imposta pelos receptores primários causa um fenômeno de saturação na probabilidade de *outage*, também observado no primeiro modelo sistêmico. Os resultados também foram validados através de

simulações de Monte Carlo.

Através da análise dos dois sistemas, percebeu-se que, quanto mais receptores primários há na rede, pior será o desempenho de *outage* da rede secundária. Isto se deve ao fato de que a potência de transmissão dos nós da rede secundária também é governada pelas condições do canal interferente entre rede secundária e rede primária (Equações. (3.1), (3.2), (4.1) e (4.2)). Portanto, quanto mais usuários primários, maior a chance do ganho de canal interferente ser alto, fazendo com que a potência disponível para transmissão na rede secundária seja baixa.

Enquanto houver usuários buscando por aplicações e dispositivos mais rápidos e confiáveis, haverá esforços por parte dos pesquisadores para o desenvolvimento de sistemas que sejam capazes de atender estas necessidades. Em vista deste cenário de evolução, este trabalho pode ser estendido de diversas formas, como por exemplo:

- ▶ Utilizar combinador do tipo **MRC** nos destinos secundários;
- ▶ Utilizar uma estratégia *interwave* ou *overlay* para acesso ao espectro;
- ▶ Considerar o algoritmo ótimo de seleção de nós;
- ▶ Modificar a métrica de seleção de nós;
- ▶ Considerar erro na estimação do canal;
- ▶ Analisar o desempenho de redes cooperativas cognitivas com múltiplos destinos secundários, múltiplos *relays* secundários e múltiplos receptores primários;
- ▶ Considerar que a transmissão primária interfere na comunicação da rede secundária e analisar o efeito desta interferência;
- ▶ Empregar múltiplas antenas nos terminais;
- ▶ Analisar outras métricas de desempenho, tais como a taxa de erro de símbolo;
- ▶ Análise de capacidade de canal;
- ▶ Análise de *throughput*;
- ▶ Análise de erro de canal de retorno.

# Referências Bibliográficas

- [1] United states frequency allocations - the radio spectrum.  
<http://www.ntia.doc.gov>.
- [2] Quadro de atribuição de faixas de frequência no brasil.  
<http://www.anatel.gov.br>.
- [3] J.N. Laneman, D.N.C. Tse e G.W. Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. Inf. Theory*, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, Dez. 2004.
- [4] A. Sendonaris, E. Erkip, e B. Aazhang. User cooperation diversity - part I: system description. *IEEE Trans. Commun.*, v. 51, n. 11, p. 1927–1938, Nov. 2003.
- [5] J. Mitola. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Dez. 2000. Tese (Doutorado em Física) - Royal Inst.Technol. (KHT), Dez. 2000.
- [6] J. Mitola *et al.* Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Pers. Commun*, v. 6, n. 4, p. 13–18, 1999.
- [7] A. Ghasemi e E.S. Sousa. Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, v. 6, n. 2, Fev. 2007.
- [8] E.C. van der Meulen . *Transmission of information in a T-terminal discrete memoryless channel*. 1968. Tese (Doutorado em Física) - Department of Statistics, University of California, 1968.
- [9] E.C. van der Meulen. Three-terminal communication channels. *Advances in Applied Probability*, v. 3, p. 120–154, 1971.
- [10] T.M. Cover e A.A.E. Gamal. Capacity Theorems for the Relay Channel. *IEEE Trans. Info. Theory*, v. 25, n. 5, p. 572–84, Set. 1979.

- [11] J.H. Winters. On the capacity of radio communication systems with diversity in a rayleigh fading environment. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 5, n. 5, p. 871–878, 1987.
- [12] I.E. Telatar. Capacity of multi-antenna gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, v. 10, p. 585–595, 1999.
- [13] J.G. Foschini. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Tech. J.*, Wireless Communications Research Department, Bell Labs, Holmdel, New Jersey, v. 1, n. 2, p. 41–59, 1996.
- [14] Y.-W.P. Hong, W.-J. Huang e C.-C.J. Kuo. *Cooperative Communications and Networking Technologies and System Design*. Springer, 2010.
- [15] A. Chakrabarti, A. Sabharwal e B. Aazhang. Cooperative wireless communications: Fundamental techniques and enabling technologies. In: FITZEK, F. H. P.; KATZ, M. D. (Eds.) *Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications*. 2007.
- [16] M. Dohler, Y. Li. *Cooperative communications: Hardware, channel and phy*. Wiley Publishing, 2010.
- [17] T. Rappaport. *Wireless communications: Principles and practice*. 2nd. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001.
- [18] K.J.R. Liu, A.K. Sadek, W. Su, A. Kwasinski. *Cooperative Communications and Networking*. Cambridge University Press, 2009.
- [19] L. Zheng and D.N.C. Tse. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels. *Information Theory, IEEE Transactions on*, v. 49, n. 5, p. 1073–1096, 2003.
- [20] D. Tse e P. Viswanath. *Fundamentals of wireless communication*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [21] G. Kramer, M. Gastpar e P. Gupta. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks. *Information Theory, IEEE Transactions on*, v. 51, n. 9, p. 3037–3063, 2005.
- [22] A.H.-Madsen. Capacity bounds for cooperative diversity. *Information Theory, IEEE Transactions on*, v. 52, n. 4, p. 1522–1544, 2006.

- [23] A.S. Ibrahim, A.K. Sadek, W. Su e K.J.R. Liu. Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with? *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 7, p. 2814–2827, 2008.
- [24] S. Abdulhadi, M. Jaseemuddin e A. Anpalagan. A survey of distributed relay selection schemes in cooperative wireless ad hoc networks. *Wirel. Pers. Commun.*, Hingham, MA, USA, v. 63, n. 4, p. 917–935, Abr. 2012.
- [25] A. Bletsas, A. Khisti, D.P. Reed e A. Lippman. A simple cooperative diversity method based on network path selection. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 24, n. 3, p. 659–672, 2006.
- [26] Y. Chen, G. Yu, P. Qiu e Z. Zhang. Power-aware cooperative relay selection strategies in wireless ad hoc networks. In: . c2006. p. 1–5.
- [27] K.-S. Hwang e Y.-C. Ko. Switch-and-examine node selection for efficient relaying systems. In: . IWCMC '07. New York, NY, USA: ACM, c2007. p. 469–474.
- [28] A. Tajer e A. Nosratinia. Opportunistic cooperation via relay selection with minimal information exchange. In: . c2007. p. 1926–1930.
- [29] E. Beres e R. Adve. Selection cooperation in multi-source cooperative networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 1, p. 118–127, 2008.
- [30] C.-L. Wang, e S.-J Syue. An efficient relay selection protocol for cooperative wireless sensor networks. In: . WCNC'09. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, c2009. p. 593–597.
- [31] R. Madan, N. Mehta, A. Molisch e J. Zhang. Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection. *Trans. Wireless. Comm.*, Piscataway, NJ, USA, v. 7, n. 8, p. 3013–3025, ago 2008.
- [32] A.F. Onat, Y. Fan, H. Yanikomeroğlu e H.V. Poor. Threshold-based relay selection for detect-and-forward relaying in cooperative wireless networks. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, New York, NY, United States, v. 2010, p. 43:1–43:13, Abr. 2010.
- [33] R. Tannious e A. Nosratinia. Spectrally-efficient relay selection with limited feedback. *IEEE J.Sel. A. Commun.*, Piscataway, NJ, USA, v. 26, n. 8, p. 1419–1428, Out. 2008.



- [34] A. Bletsas, A. Khisti e M.Z. Win. Opportunistic cooperative diversity with feedback and cheap radios. *Trans. Wireless. Comm.*, Piscataway, NJ, USA, v. 7, n. 5, p. 1823–1827, Maio 2008.
- [35] L. Sun, T. Zhang, L. Lu, e H. Niu. Cooperative communications with relay selection in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 55, p. 513–517, 2008.
- [36] S. Haykin. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *Sel. Areas Commun*, v. 23, n. 2, p. 201–220, Fev. 2005.
- [37] S.B. Mafra, E.M.G. Fernandez, R.D. Souza e J.L. Rebelatto. Cooperative cognitive radio protocol exploiting primary retransmissions in nakagami-m fading. In: . c2012. p. 771–775.
- [38] F.I. Akyildiz, W.-Y. Lee, M.C. Vuran e S. Mohanty. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Comput. Netw.*, New York, NY, USA, v. 50, n. 13, p. 2127–2159, Sept. 2006.
- [39] V. Brik, E. Rozner, S. Banerjee, e P. Bahl. Dsap: a protocol for coordinated spectrum access. In: . c2005. p. 611–614.
- [40] R. Zekavat, A. Seyed e X. Li. User-central wireless system: ultimate dynamic channel allocation. In: . c2005. p. 82–87.
- [41] L. Duan, L. Gao e J. Huang. Cooperative spectrum sharing: A contract-based approach. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, , n. 99, p. 18, 2013.
- [42] L. Cao e H. Zheng. Distributed spectrum allocation via local bargaining. In: . c2005. p. 475–486.
- [43] J. Zhao, H. Zheng e G.-H. Yang. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks. In: . c2005. p. 259–268.
- [44] S. Sankaranarayanan, P. Papadimitratos, A. Mishra e S. Hershey. A bandwidth sharing approach to improve licensed spectrum utilization. In: . c2005. p. 279–288.
- [45] Q. Zhao, L. Tong e A. Swami. Decentralized cognitive mac for dynamic spectrum access. In: . c2005. p. 224–232.
- [46] H. Zheng e L. Cao. Device-centric spectrum management. In: . c2005. p. 56–65.



- [47] A. Goldsmith, S.A. Jafar, I. Maric e S. Srinivasa. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 5, p. 894–914, 2009.
- [48] S. Srinivasa e S.A. Jafar. The throughput potential of cognitive radio: A theoretical perspective. In: . c2006. p. 221–225.
- [49] J. Huang, R.A. Berry e M.L. Honig. Spectrum sharing with distributed interference compensation. In: . c2005. p. 88–93.
- [50] C. Zhong, T. Ratnarajah e K.-K Wong. Outage analysis of decode-and-forward cognitive dual-hop systems with the interference constraint in Nakagami- $m$  fading channels. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 60, n. 6, p. 2875–2879, Jul. 2011.
- [51] J. Lee, H. Wang, J. G. Andrews e D. Hong. Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, v. 10, n. 2, p. 390–395, Fev. 2011.
- [52] T.Q. Duong, V.N.Q. Bao, G.C. Alexandropoulos e H.-J. Zepernick. Cooperative spectrum sharing networks with AF relay and selection diversity. *IET Electron. Lett.*, v. 47, n. 20, Set. 2011.
- [53] H.-V. Khuong. Exact outage probability of underlay cognitive cooperative networks over rayleigh fading channels. *Wirel. Pers. Commun.*, Hingham, MA, USA, v. 70, n. 2, p. 1001–1009, Maio 2013.
- [54] T.Q. Doung, D.B. da Costa, M. El Kashlan e V.N.Q. Bao. Cognitive amplify-and-forward relay networks over Nakagami- $m$  fading. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 61, n. 5, p. 2368–2374, Jun. 2012.
- [55] T.Q. Duong, D.B. da Costa, T.A. Tsiftsis, C. Zhong, e A. Nallanathan. Outage and diversity of cognitive relaying systems under spectrum sharing environments in Nakagami- $m$  fading. *IEEE Commun. Lett.*, v. 16, n. 12, p. 2075–2078, Dez. 2012.
- [56] L. Luo, P. Zhang, G. Zhang, e J. Qin. Outage performance for cognitive relay networks with underlay spectrum sharing. *IEEE Commun. Lett.*, v. 15, n. 7, p. 710–712, Jul. 2011.
- [57] V.N.Q. Bao, T.Q. Duong, D.B. da Costa, G.C. Alexandropoulos e A. Nallanathan. Cognitive amplify-and-forward relaying with best relay selection in non-identical Rayleigh fading. *Communications Letters, IEEE*, v. 17, n. 3, p. 475–478, 2013.

- [58] D.B. da Costa, M. ElKashlan, P.L. Yeoh, N. Yang e M.D. Yacoub. Dual-hop cooperative spectrum sharing systems with multi-primary users and multi-secondary destinations over nakagami-m fading. p. 1577–1581, 2012.
- [59] T.W. Ban, W. Choi, B.C. Jung e D.K. Sung. Multi-user diversity in a spectrum sharing system. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, v. 8, n. 1, p. 102–106, 2009.
- [60] K. Hamdi, W. Zhang e K.B. Letaief. Power control in cognitive radio systems based on spectrum sensing side information. *Proc. IEEE Intl. Conf. Commun*, p. 5161–5165, 2007.
- [61] A. Papoulis. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 2002. 4th Ed.
- [62] M.A.B. de Melo e D.B. da Costa. An efficient relay-destination selection scheme for multiuser multirelay downlink cooperative networks. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 61, n. 5, p. 2354–2360, Jun. 2012.
- [63] H. Ding, J. Ge, D.B. da Costa e Z. Jiang. A new efficient low-complexity scheme for multi-source multi-relay cooperative networks. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 60, n. 2, p. 716–722, 2011.
- [64] A. Bletsas, A.G. Dimitriou e J.N. Sahalos. Interference-limited opportunistic relaying with reactive sensing. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 9, n. 1, p. 14–20, 2010.
- [65] D.B. da Costa e S. Aissa. End-to-end performance of dual-hop semi-blind relaying systems with partial relay selection. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, v. 8, n. 8, p. 4306–4315, Ago. 2009.
- [66] I.S. Gradshteyn e I.M. Ryzhik. *Table of Integrals, Series, and Products*. 7th. ed. San Diego, CA: Academic: , 2007.
- [67] M. Abramowitz e I.A. Stegun. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. New York: , 1972.