

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

DANIEL DE PAIVA MUCIN

Esquemas de Seleção de Relay para Redes
Cooperativas Full-Duplex com Compartilhamento
Espectral do Tipo Underlay

São João da Boa Vista

2018

DANIEL DE PAIVA MUCIN

**Esquemas de Seleção de Relay para Redes
Cooperativas Full-Duplex com Compartilhamento
Espectral do Tipo Underlay**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Câmpus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

São João da Boa Vista
2018

Mucin, Daniel de Paiva

Esquemas de seleção de relay para redes cooperativas full-duplex com compartilhamento espectral do tipo underlay / Daniel de Paiva Mucin. -- São João da Boa Vista, 2018.

51 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Câmpus Experimental de São João da Boa Vista – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Bibliografia

1. Comunicações digitais 2. Sistemas de comunicação sem fio 3. Telecomunicações

CDD 23. ed. – 621.382

Ficha catalográfica elaborada pela [Biblioteca-BJB](#)

Bibliotecário responsável: João Pedro Alves Cardoso – CRB-8/9717

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESQUEMAS DE SELEÇÃO DE RELAY PARA REDES
COOPERATIVAS FULL-DUPLEX COM
COMPARTILHAMENTO ESPECTRAL DO TIPO UNDERLAY

Aluno: Daniel de Paiva Mucin

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo
- Profa. Dra. Cintya Wink de Oliveira Benedito
- Profa. Dra. Paula Ghedini Der Agopian

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se
no prontuário do aluno (Expediente nº 28/2018)

São João da Boa Vista, 18 de Dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por sempre me guiar nos momentos de dificuldade e me dar forças para enfrentar as adversidades.

Aos meus pais, Rovilso e Bernadete, pelo apoio, amor e educação que me deram. Sem eles eu não seria metade do homem que sou.

Gostaria de agradecer também, todo o apoio e conhecimento fornecidos pelo meu orientador, Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo. Este trabalho, assim como meu interesse pela pesquisa, são frutos de sua dedicação e paciência ao me orientar.

Por último, mas não menos importante, agradeço à Amanda, com quem compartilhei todos os momentos importantes nesses últimos anos de minha vida. Sem ela, não conseguiria forças para levantar a cabeça e seguir em frente.

RESUMO

Neste trabalho, o desempenho de diferentes esquemas de seleção de *relay* é analisado em termos da probabilidade de *outage*, para uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento de espectro do tipo *underlay*, que consiste de múltiplos *relays* os quais operam em modo *full duplex* e sob o protocolo de retransmissão decodifica-e-encaminha. Para tanto, consideram-se quatro critérios de seleção de *relay*, a saber: (i) critério de seleção ótimo, que utiliza conhecimento global do estado de todos os enlaces da rede; e três critérios de seleção subótimos, os quais requerem conhecimento parcial dos estados de canal da rede, mais especificamente, (ii) dos enlaces de auto interferência residual inerentes aos *relays full duplex*, (iii) dos enlaces entre a fonte e os *relays* e (iv) dos enlaces entre os *relays* e o destino. Considera-se ainda um esquema arbitrário de alocação de potência entre a fonte e o *relay* escolhido. Como contribuições deste trabalho, para cada critério de seleção de *relay* proposto, expressões analíticas para a probabilidade de *outage* assintótica em regime de alta relação sinal-ruído são obtidas. Por meio destas expressões, avalia-se o impacto de diferentes parâmetros do sistema, como o número de *relays*, o valor do ganho médio do canal de auto interferência e o valor da temperatura de interferência imposta pelo receptor primário. Os resultados analíticos obtidos são validados por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo. Além disso, simulações computacionais são realizadas para avaliar o efeito da potência máxima disponível nos nós secundários, assim com da variação do fator de alocação de potência e da distância entre a fonte e os *relays*.

Palavras Chaves: decodifica-e-encaminha, diversidade cooperativa, retransmissão *full duplex*, probabilidade de *outage*, seleção de *relay*.

ABSTRACT

In this work, the performance of different relay selection schemes is analyzed in terms of the outage probability for a cognitive relay network with underlay spectral sharing, which consists of multiple relays operating in full-duplex mode, under the decode-and-forward protocol. To this end, four relay selection criteria are considered, namely: (i) optimal selection criterion, which requires global knowledge of the channel state information of the network; and three suboptimal selection criteria, which require partial knowledge of the channel state information of the network, more specifically, based on (ii) the self-interference links inherent to full-duplex relays, (iii) the links between the source and relays, and (iv) the links between the relays and destination. An arbitrary power allocation between the source and the selected relay is also considered. As contributions of this work, for the proposed relay selection criteria, analytical expressions are obtained for the asymptotic outage probability at the high signal-to-noise ratio regime. From these analytical expressions, the impact of different system parameters are assessed, such as the number of relays, the average channel gain of the self-interference link, and the interference temperature imposed by the primary receiver. The obtained analytical results are validated through exhaustive Monte Carlo simulations. In addition, computer simulations are carried out to evaluate the effect of the maximum power available at the secondary nodes, as well as the variation of the power allocation factor and distance between the source and relays.

Keywords: Cooperative diversity, decode-and-forward, full-duplex relaying, outage probability, relay selection.

LISTA DE FIGURAS

1.	Esquema de diversidade tradicional, com múltiplas antenas espacialmente distribuídas no receptor, D	14
2.	Esquema de diversidade cooperativa com a presença de enlace direto e N relays emulando um arranjo virtual de antenas	14
3.	Cenário cooperativo de dois saltos (<i>dual hop</i>), com um <i>relay</i> do tipo HD ..	15
5.	Modelo do sistema (sinal de interesse: linha sólida; sinal de interferência: linha tracejada)	20
6.	Topologia da rede com distâncias normalizadas entre os nós	27
7.	Probabilidade de <i>outage</i> vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de <i>relay</i> , considerando um número diferente de <i>relays</i> $N = 1, 2, 3$; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB; $\gamma_I = 20$ dB e $\eta_1 = 0,5$	28
8.	Probabilidade de <i>outage</i> vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de <i>relay</i> , considerando um número de <i>relays</i> $N = 3$; $\Omega_{SI_n} = -5$ e -10 dB; $\gamma_I = 20$ dB e $\eta_1 = 0,5$	29
9.	Probabilidade de <i>outage</i> vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de <i>relay</i> , considerando um número de <i>relays</i> $N = 3$; $\gamma_I = 20$ e 30 dB; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\eta_1 = 0,5$	30
10.	Probabilidade de <i>outage</i> vs. fator de alocação de potência entre fonte e <i>relay</i> , para os quatro critérios de seleção de <i>relay</i> , considerando um número diferente de <i>relays</i> $N = 1, 2, 3$; $\gamma_I = 20$ dB; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\gamma_P = 10$ dB	31
11.	Probabilidade de <i>outage</i> vs. distância normalizada entre fonte e <i>relay</i> , para os quatro critérios de seleção de <i>relay</i> , considerando um número diferente de <i>relays</i> $N = 1, 2, 3$; $\gamma_I = 20$ dB; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB; $\gamma_P = 10$ dB e $\eta_1 = 0,5$	32

LISTA DE ACRÔNIMOS

4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
AF	Amplifica-e-Encaminha (<i>Amplify-and-Forward</i>)
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CDF	Função Distribuição Acumulada (<i>Cumulative Distribution Function</i>)
CSI	Informação de Estado de Canal (<i>Channel State Information</i>)
DF	Decodifica-e-Encaminha (<i>Decode-and-Forward</i>)
FD	<i>Full Duplex</i>
HD	<i>Half Duplex</i>
i.i.d.	Independentes e Identicamente Distribuídos
JD	Decodificação Conjunta (<i>Joint Decoding</i>)
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
ORS	Seleção Oportunista de <i>Relay</i> (<i>Opportunistic Relay Selection</i>)
PDF	Função Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
PRS	Seleção Parcial de <i>Relay</i> (<i>Partial Relay Selection</i>)
PRS-SI	Seleção Parcial de <i>Relay</i> baseada nos Enlaces de Auto Interferência (<i>Partial Relay Selection based on Self-interference links</i>)
PRS-1H	Seleção Parcial de <i>Relay</i> baseada nos Enlaces do Primeiro Salto (<i>Partial Relay Selection based on First-hop links</i>)
PRS-2H	Seleção Parcial de <i>Relay</i> baseada nos Enlaces do Segundo Salto (<i>Partial Relay Selection based on Second-hop links</i>)
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	expoente de perda de percurso
D	nó destino da rede secundária
d_{AB}	distância do enlace entre os nós $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$
$E[\cdot]$	esperança matemática
η_1	fator de alocação de potência relativo ao nó fonte
$F_A(\cdot)$	CDF de uma variável aleatória A
$f_A(\cdot)$	PDF de uma variável aleatória A
g_{AB}	ganho de canal para o enlace entre os nós $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$
γ	SNR recebida instantânea fim-a-fim
γ_{AB}	SNR recebida instantânea para o enlace entre os nós $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$
γ_I	Relação interferência-ruído máxima imposta pelo receptor primário
γ_P	SNR transmitida máxima
γ_{th}	limiar alvo de SNR recebida instantânea para a probabilidade de <i>outage</i>
h_{AB}	coeficiente complexo do canal para o enlace entre os nós $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$
I	temperatura de interferência máxima tolerada pelo receptor primário
n^*	índice do <i>relay</i> escolhido
N	número de <i>relays</i>
N_0	potência média do ruído AWGN
Ω_{AB}	ganho médio do canal para o enlace entre os nós $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$
P	receptor primário
P_{out}	probabilidade de <i>outage</i>
P_S	potência transmitida do nó fonte
P_{R_n}	potência transmitida do n -ésimo <i>relay</i>
P_t	potência transmitida máxima disponível na fonte e nos <i>relays</i>
R_n	n -ésimo <i>relay</i>
S	nó fonte da rede secundária

SUMÁRIO

	Sumário	10
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Motivação	11
1.2	Técnicas de Radio Cognitivo	12
1.3	Comunicações Cooperativas	13
1.3.1	Protocolos de Retransmissão	14
1.3.2	Modos de Retransmissão	15
1.3.3	Seleção de <i>Relays</i>	16
1.4	Trabalhos Relacionados	17
1.5	Contribuições e Organização do Trabalho	18
2	MODELO DO SISTEMA	19
3	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE <i>RELAY</i>	21
4	PROBABILIDADE DE <i>OUTAGE</i>	22
4.1	Probabilidade de <i>Outage</i> - CRITÉRIO ORS	22
4.2	Probabilidade de <i>Outage</i> - CRITÉRIO PRS-1H	23
4.3	Probabilidade de <i>Outage</i> - CRITÉRIO PRS-2H	23
4.4	Probabilidade de <i>Outage</i> - CRITÉRIO PRS-SI	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
6	CONCLUSÕES	33
	Apêndices	34
A.	Probabilidade de <i>Outage</i> - CRITÉRIO ORS	34
B.	Probabilidade de <i>Outage</i> - CRITÉRIO PRS-1H	38
C.	Probabilidade de <i>Outage</i> - CRITÉRIO PRS-2H	42
D.	Probabilidade de <i>Outage</i> - CRITÉRIO PRS-SI	46
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, primeiramente, serão apresentados os conceitos e cenários relacionados ao problema abordado neste trabalho. A Seção 1.1, em particular, apresenta o contexto das redes móveis celulares atuais, introduzindo a motivação deste trabalho, enquanto que as Seções 1.2 e 1.3 fornecem uma breve revisão dos conceitos relativos a técnicas de radio cognitivo e comunicações cooperativas, respectivamente, sendo estes, conceitos chave para a compreensão deste trabalho. Finalmente, as Seções 1.4 e 1.5 apresentam trabalhos relacionados com os conceitos em que se baseia este trabalho e as contribuições do mesmo, respectivamente.

1.1 MOTIVAÇÃO

As redes de quarta geração (4G), baseadas principalmente no padrão LTE (*Long Term Evolution*), são resultado de uma evolução gradual e constante das redes móveis celulares [1]. No entanto, o número de dispositivos conectados e o desenvolvimento de aplicações multimídia vêm apresentando um aumento exponencial e impondo uma carga significativa nas redes celulares atuais [2]. Nesse cenário, para o advento da próxima geração de sistemas de comunicação móvel, mais especificamente, a quinta geração (5G), o desenvolvimento de novas tecnologias é de primordial importância para que seus requisitos sejam atingidos, tais como o fornecimento de suporte a um número massivo de usuários, taxas de dados mais elevadas e latências extremamente baixas, proporcionando assim uma melhora na qualidade de serviço experimentada pelos usuários [3, 4].

Ademais, para que as redes 5G se tornem uma realidade, a escassez de espectro figura como um dos principais problemas a serem superados. Para tanto, as técnicas de rádio cognitivo se destacam como uma solução promissora para o uso eficiente do espectro radioelétrico, permitindo que os nós de uma rede sem fio obtenham conhecimento do entorno radioelétrico e adaptem seus parâmetros e configurações para acessar dinamicamente as bandas de frequência licenciadas [5].

De forma concomitante, pelo potencial de atingir ganhos significativos de desempenho em termos de confiabilidade e extensão de cobertura, destaca-se o conceito de comunicações cooperativas [6, 7], em que os diferentes nós de uma rede sem fio são capazes de transmitir, além de sua própria informação, aquela proveniente de outros nós da rede.

As seguintes seções deste capítulo têm por objetivo apresentar os conceitos e terminologias pertinentes às tecnologias supracitadas.

1.2 TÉCNICAS DE RADIO COGNITIVO

Atualmente, todos os serviços baseados em radiofrequência são habilitados para operação. Normalmente, a operadora (chamada de usuário primário) adquire através de um leilão, o direito de uso de uma determinada faixa de espectro, por meio de uma licença.

Para que haja um uso eficiente do espectro de radiofrequência, as técnicas de radio cognitivo permitem que os usuários não licenciados em uma rede sem fio (chamados de usuários secundários) obtenham conhecimento do entorno radioelétrico e adaptem seus parâmetros e configurações para acessar dinamicamente as bandas de frequência licenciadas, concedidas aos usuários primários [5]. Existem três técnicas para compartilhamento de espectro comumente utilizadas, sendo elas:

- **Técnica *Underlay*:** Nesta técnica, os usuários secundários podem obter acesso simultâneo a uma banda licenciada, desde que um dado nível de potência de interferência sobre a rede primária, referido como temperatura de interferência, não seja excedido [15].
- **Técnica *Overlay*:** Na técnica *overlay*, os usuários secundários também podem ter acesso simultâneo às bandas licenciadas da rede primária. Neste caso, no entanto, o usuário secundário precisa conhecer a mensagem e o livro de códigos do usuário primário, a fim de aprimorar a comunicação da rede secundária por meio do cancelamento da interferência no receptor secundário causada pelo transmissor primário, assim como cooperar nas transmissões da rede primária, por meio da alocação de parte de sua potência transmitida, com o objetivo de mitigar a interferência causada no receptor primário. Diferentemente da técnica *underlay*, na técnica *overlay* não há restrição de potência transmitida nos usuários secundários [15].
- **Técnica *Interweave*:** Neste caso, os usuários secundários acessam de maneira oportunista a banda licenciada, por meio do monitoramento dos chamados espaços brancos do espectro, que são lacunas da banda licenciada em que o usuário primário não faz uso, momentaneamente, e que estão disponíveis para o acesso dos usuários secundários [15].

Dessa maneira, no contexto das técnicas de rádio cognitivo, o compartilhamento espectral do tipo *underlay* tem-se mostrado promissor para a mitigação do problema da escassez de espectro, já que sua implementação é de baixa complexidade e apresenta maior flexibilidade se comparado aos esquemas *overlay* e *interweave* [15]. Portanto, o esquema de compartilhamento espectral do tipo *underlay* é considerado neste trabalho.

1.3 COMUNICAÇÕES COOPERATIVAS

Um dos grandes desafios no projeto de uma rede móvel é o fato de que os estados de canal apresentam variações aleatórias ao longo do tempo e espaço, diferentemente das redes cabeadas, em que essas singularidades não são tão significativas. Portanto, mediante essas variações aleatórias, origina-se os efeitos de propagação de pequena e grande escala. O efeito de grande escala é caracterizado de duas maneiras: (i) pelo sombreamento, oriundo de obstruções no sinal transmitido por meio de obstáculos, tais como edifícios e montanhas; e (ii) pela perda de percurso, decorrente da atenuação do sinal transmitido devido à distância entre o nó transmissor e o nó receptor. Por outro lado, define-se o efeito de pequena escala pelo desvanecimento, em que para um curto período de tempo ou distância, rápidas flutuações ocorrem nas características do sinal transmitido, tais como amplitude, fase e frequência. Essas flutuações devem-se ao efeito de multipercurso, em que diversas réplicas do sinal são geradas a partir de reflexões, difrações, espalhamento ou atenuações ao longo de sua propagação, sendo essas réplicas combinadas de forma destrutiva ou construtiva no receptor [8].

Devido às variações do sinal recebido, decorrentes do desvanecimento, é possível que um sistema de comunicações sem fio não suporte determinada taxa de transmissão sem erros com 100% de confiabilidade. Dessa maneira, a fim de comparar diferentes esquemas de comunicação em termos de sua confiabilidade, métricas como a probabilidade de *outage* são utilizadas. Define-se a probabilidade de *outage* como a probabilidade da relação sinal-ruído (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) fim-a-fim recebida, γ , estar abaixo de um dado limiar γ_{th} , ou seja [9]

$$P_{out} = \Pr(\gamma < \gamma_{th}). \quad (1.1)$$

Tradicionalmente, para combater os efeitos do desvanecimento, utiliza-se a técnica de diversidade espacial por antenas na recepção, em que múltiplas antenas no receptor são distribuídas espacialmente, de forma que as diversas réplicas do sinal transmitido sejam decorrelacionadas e possam ser combinadas de uma maneira conveniente, melhorando portanto, o desempenho da rede. Na Fig. 1, apresenta-se o esquema tradicional de diversidade espacial, consistindo de uma fonte S provida de uma antena e um destino D com múltiplas antenas.

No entanto, este esquema de diversidade espacial apresenta como desvantagem o espaço físico limitado nos dispositivos móveis, o que restringe a quantidade de antenas que podem ser espacialmente distribuídas nos mesmos. Sendo assim, as redes cooperativas são utilizadas para combater a limitação de espaço imposta pelos dispositivos móveis, possibilitando que os diferentes nós de uma rede sem fio transmitam, além de sua própria informação, aquela proveniente de outros nós da rede. Dessa forma, um arranjo virtual de

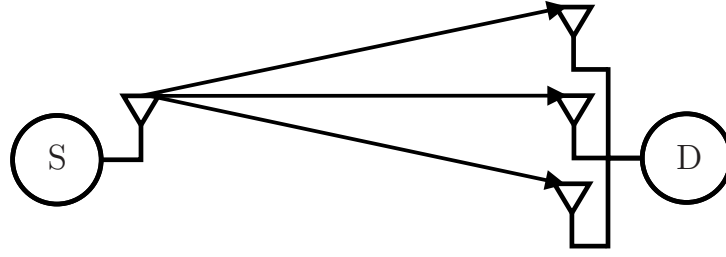


Figura 1 – Esquema de diversidade tradicional, com múltiplas antenas espacialmente distribuídas no receptor D.

antenas é emulado e diferentes réplicas do sinal de interesse são obtidas por meio dos diversos nós retransmissores (ou *relays*) espacialmente distribuídos, criando assim um novo tipo de diversidade espacial. A Fig. 2 apresenta uma arquitetura de rede cooperativa, em que N *relays* espacialmente distribuídos, R_i , para $i = 1, \dots, N$, auxiliam na comunicação entre a fonte S e o destino D, provido agora de apenas uma antena. Na arquitetura apresentada, pode-se considerar a existência do enlace direto entre fonte e destino, situação em que não há sombreamento severo. A existência desse enlace permite a obtenção de maiores ganhos de diversidade [10], já que a informação pode ser transmitida para o destino D por diferentes caminhos independentes, tanto diretamente desde a fonte S, quanto pelos N *relays* espacialmente distribuídos.

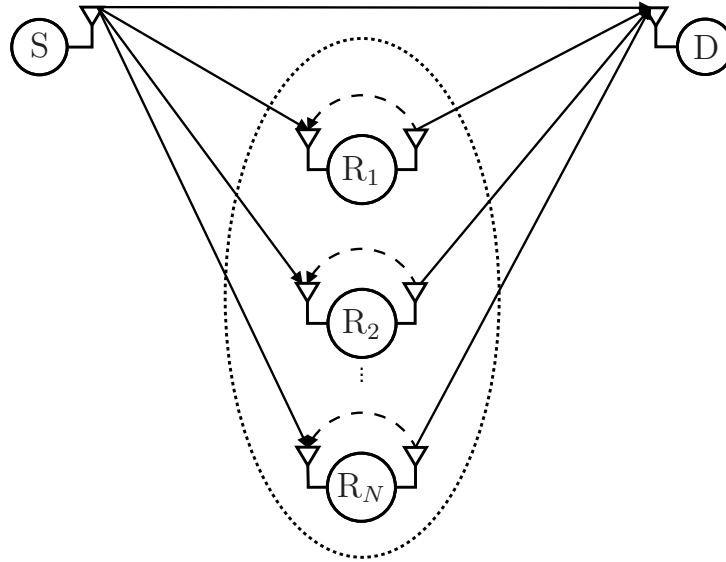


Figura 2 – Esquema de diversidade cooperativa com a presença de enlace direto entre fonte e destino, e N *relays* emulando um arranjo virtual de antenas (linha cheia: sinal de informação; linha tracejada: sinal de auto interferência).

1.3.1 Protocolos de Retransmissão

Dois protocolos de retransmissão regem os esquemas de cooperação dos *relays* em uma rede cooperativa, a saber [11]:

- **Amplifica-e-Encaminha (AF, *Amplify-and-Forward*):** Neste protocolo o *relay* apenas amplifica e retransmite o sinal recebido, sendo assim considerado como um dos protocolos de retransmissão mais simples. Para realizar a amplificação do sinal recebido, o *relay* utiliza um fator de amplificação, em que, a depender de suas características, o protocolo AF pode ser classificado como: (i) de ganho variável, em que o fator de amplificação varia de acordo com a informação do estado de canal (CSI, *Channel State Information*) instantânea do enlace entre fonte e *relay*; (ii) de ganho fixo semi cego, em que o fator de amplificação assume um valor fixo, função dos valores médios do enlace fonte-*relay*; e (iii) de ganho fixo cego, que também utiliza de um fator de amplificação fixo, porém, definido durante sua fase de projeto e não dependendo das condições dos enlaces fonte-destino, sendo assim, considerado o caso mais simples dentre os citados [11].
- **Decodifica-e-Encaminha (DF, *Decode-and-Forward*):** De maneira geral, é o protocolo que apresenta melhor desempenho em termos de métricas de desempenho como a probabilidade de *outage* e a taxa de erro de bit (BER, *Bit Error Rate*) ao longo de todo o intervalo de valores de SNR, em que o *relay* detecta, decodifica a informação vinda do nó fonte e a codifica novamente para retransmiti-la ao nó destino [11]. Por apresentar melhor desempenho em termos de probabilidade *outage*, considera-se portanto, neste trabalho, um esquema de cooperação com *relays* baseados no protocolo DF.

1.3.2 Modos de Retransmissão

Os *relays* podem operar basicamente em dois modos de retransmissão, a saber:

- **Modo de retransmissão *half duplex* (HD):** No modo de retransmissão HD, o *relay* precisa de canais ortogonais (como frequências ou intervalos de tempo distintos) para realizar a recepção e retransmissão de informação, em que um canal é utilizado para a retransmissão e o outro para a recepção, sendo necessário o dobro de recursos disponíveis.

A Fig. 3 apresenta uma topologia de rede cooperativa com dois saltos (*dual hop*) em que se faz uso de um *relay* HD para a cooperação entre fonte e destino, em que utiliza-se uma antena para transmissão e recepção de informação.

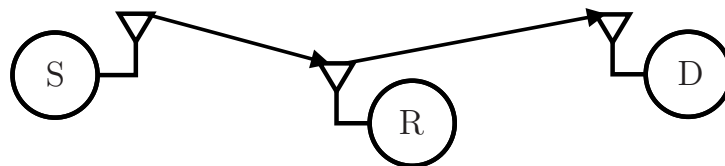


Figura 3 – Cenário cooperativo de dois saltos (*dual hop*) com um *relay* do tipo HD.

- **Modo de retransmissão *full duplex* (FD):** No modo de retransmissão FD, o *relay* recebe e retransmite a informação de maneira simultânea e na mesma banda de frequência, permitindo recuperar a perda de eficiência espectral inerente ao modo HD [12]. No entanto, o ganho em eficiência espectral do modo FD é obtido à custa da auto interferência sofrida na antena receptora do *relay*, a partir de sua própria antena transmissora, como consequência da retransmissão simultânea.

A Fig. 4 apresenta uma topologia de rede cooperativa com dois saltos (*dual hop*) em que se faz uso de um *relay* FD para a cooperação entre fonte e destino, sendo possível notar a presença duas antenas no *relay*, uma para transmissão e outra para recepção de informação, além da existência do enlace de auto interferência (linha tracejada) inerente ao modo de retransmissão FD.

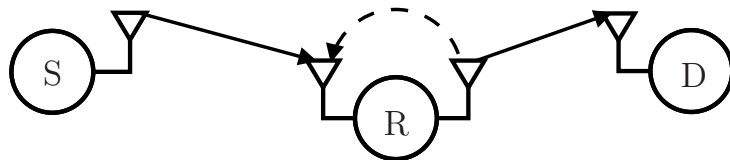


Figura 4 – Cenário cooperativo de dois saltos (*dual hop*) com um *relay* do tipo FD.

Dessa maneira, este trabalho considera *relays* operando em modo de retransmissão FD, pois estes apresentam maiores ganhos em eficiência espectral se comparados com *relays* HD.

1.3.3 Seleção de *Relays*

Comunicações cooperativas que fazem uso de múltiplos *relays* podem ter seu desempenho aprimorado em termos da eficiência espectral ao selecionar apenas um dos *relays* disponíveis para a comunicação [13]. Os esquemas de seleção de *relay* podem ser classificados como: (i) seleção oportunista de *relay* (ORS, *Opportunistic Relay Selection*), em que o *relay* escolhido é aquele que fornece o melhor desempenho no enlace fim-a-fim do sistema (através dos enlaces fonte-*relay* e *relay*-destino), sendo que, para tanto, é necessário que o *relay* possua conhecimento global de CSI, ou seja, conhecimento de todos os estados de canal existentes da rede; e (ii) seleção parcial de *relays* (PRS, *Partial Relay Selection*), em que o *relay* é escolhido por meio de CSI parcial da rede, podendo este fazer referência aos enlaces do primeiro salto (fonte-*relay*), do segundo salto (*relay*-destino), ou até mesmo dos enlaces de auto-interferência, quando o *relay* utilizado opera em modo FD. Em termos de desempenho, o critério de seleção ORS é superior ao PRS, pois escolhe o *relay* com melhor desempenho fim-a-fim da rede. No entanto, em termos de custo computacional e ônus de realimentação da informação (*feedback overhead*), o critério PRS é mais vantajoso, já que é necessário menos informação para selecionar o *relay*.

A seleção de *relays* pode ser realizada de maneira centralizada, com um nó central realizando a aquisição e processamento das informações para então comunicar aos outros nós da rede qual é o *relay* escolhido, ou distribuída, em que cada *relay* processa sua própria informação e aquele que apresentar as melhores condições de canal comunica aos outros nós sobre essa condição, sendo assim o *relay* escolhido. [14].

Neste trabalho, serão considerados quatro critérios diferentes de seleção de *relays*, apresentados no Capítulo 3.

1.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Atualmente, a comunidade científica tem dado especial atenção às redes cooperativas-cognitivas, já que o uso combinado de comunicações cooperativas e técnicas de compartilhamento de espectro possibilita melhorar de maneira simultânea a confiabilidade e a eficiência espectral da rede [10, 16]. Particularmente, em [16], avaliou-se uma rede cooperativa-cognitiva *full duplex* sob o protocolo amplifica-e-encaminha em termos da probabilidade de *outage*, para três critérios de seleção de *relay*; porém, o impacto do enlace direto no desempenho do sistema foi desconsiderado nesse trabalho, sendo que a sua presença permite alcançar ganhos significativos de diversidade [10]. Por outro lado, em [10], uma rede cooperativa-cognitiva, consistindo de um esquema adaptativo de retransmissão sob o protocolo decodifica-e-encaminha, foi analisada em termos da probabilidade de *outage*, considerando a presença do enlace direto; no entanto, o ganho obtido a partir de esquemas de seleção de *relay* não foi avaliado. Recentemente, em [17], analisou-se o desempenho em termos da probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa-cognitiva *full duplex* sob o protocolo decodifica-e-encaminha e com seleção de *relay*; no entanto, no modelo de potência transmitida da fonte e *relay*, a potência máxima disponível dos nós secundários foi desconsiderada. Em [18], o desempenho de *outage* em uma rede cooperativa-cognitiva *full duplex* sob o protocolo amplifica-e-encaminha é analisado, considerando o esquema de seleção oportunista de *relay*; no entanto, nesse trabalho, desconsiderou-se a existência do enlace direto e a limitação das potências transmitidas entre fonte e *relays* secundários. Nesse contexto, este trabalho pretende contribuir no estudo de redes cooperativas-cognitivas ao avaliar os efeitos do enlace direto e de diferentes esquemas de seleção de *relay* no desempenho da rede em termos da probabilidade de *outage*, para uma rede secundária *full duplex* sob o protocolo decodifica-e-encaminha, em que a potência transmitida da fonte e do *relay* são limitadas tanto pela potência máxima disponível nos nós secundários, assim como pela temperatura de interferência tolerada pela rede primária.

1.5 CONTRIBUIÇÕES E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste trabalho, considerando uma rede cooperativa-cognitiva FD-DF com a presença do enlace direto, analisa-se o desempenho em termos da probabilidade de *outage* para quatro critérios de seleção de *relay*, de tal maneira que:

- Expressões analíticas para a probabilidade de *outage* assintótica foram derivadas para cada critério de seleção de *relay* considerado. Estas expressões foram validadas por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo e constituem contribuições originais deste trabalho.
- O impacto dos diferentes parâmetros do sistema foram avaliados a partir das expressões analíticas obtidas. Estes parâmetros incluem o número de *relays*, o valor do ganho médio do enlace de auto interferência e o valor da temperatura de interferência imposta pelo receptor da rede primária.
- O impacto do fator de alocação de potência e da distância normalizada entre fonte e *relay* foram avaliados a partir de simulações de Monte Carlo.

Os capítulos seguintes deste trabalho são organizados da seguinte maneira:

- **Capítulo 2:** Neste capítulo, apresenta-se o modelo do sistema avaliado, em que explicita-se expressões e terminologias fundamentais para o entendimento do problema avaliado.
- **Capítulo 3:** Os critérios de seleção de *relay* utilizados e as suas respectivas expressões são apresentados neste capítulo.
- **Capítulo 4:** As expressões analíticas da probabilidade de *outage* assintótica para cada um dos critérios de seleção de *relay* apresentados no Capítulo 3 são derivadas neste capítulo.
- **Capítulo 5:** Neste capítulo, os resultados numéricos são apresentados, a fim de validar as expressões analíticas derivadas e de avaliar o impacto dos parâmetros no sistema.
- **Capítulo 6:** Por fim, as conclusões deste trabalho são apresentadas.

2 MODELO DO SISTEMA

Considera-se uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, como apresentada na Fig. 5, composta por uma fonte S, um *cluster* de *relays* R_n , para $n = 1, \dots, N$, e um destino D, os quais operam sob a presença de um receptor primário P. Para tornar possível o modo de retransmissão *full duplex*, assume-se que os *relays* são equipados com duas antenas (uma para transmissão e outra para recepção), diferentemente dos nós restantes da rede, que são considerados possuírem apenas uma antena.

Os coeficientes de canal do n -ésimo primeiro salto, do n -ésimo segundo salto e do enlace direto, presentes na rede secundária, são denotados por h_{SR_n} , h_{R_nD} e h_{SD} , respectivamente; o coeficiente do canal de auto interferência residual no n -ésimo *relay* (obtido após um processo de cancelamento imperfeito de interferência) é denotado por h_{SI_n} , em que $n = 1, \dots, N$; e os coeficientes de canal dos enlaces de interferência, $S \rightarrow P$ e $R_n \rightarrow P$, são respectivamente denotados por h_{SP} e h_{R_nP} . Considera-se que todos os enlaces da rede experimentam desvanecimento do tipo Rayleigh e que seus respectivos coeficientes de canal são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.). Dessa forma, os ganhos de canal correspondentes são definidos como $g_A = |h_A|^2$, para $A \in \{SR_n, R_nD, SD, SI_n, SP, R_nP\}$, os quais seguem distribuições exponenciais com valor médio $\Omega_A = E\{|h_A|^2\}$.

Ademais, denota-se por I a temperatura de interferência máxima tolerada pelo receptor primário P, causada de maneira simultânea por S e R_n . Sendo assim, é necessário que as potências transmitidas da fonte e do *relay* escolhido para cooperação, respectivamente denotadas por P_S e P_{R_n} , satisfaçam a seguinte restrição:

$$g_{SP}P_S + g_{R_nP}P_{R_n} \leq I, \quad (2.1)$$

em que

$$P_S = \eta_1 \min \left\{ P_t, \frac{I}{g_{SP}} \right\}, \quad (2.2)$$

$$P_{R_n} = (1 - \eta_1) \min \left\{ P_t, \frac{I}{g_{R_nP}} \right\}, \quad (2.3)$$

sendo P_t a potência transmitida máxima disponível em S e R_n , e $0 \leq \eta_1 \leq 1$ um fator de alocação de potência arbitrário entre os nós S e R_n , para que a restrição dada em (2.1) seja satisfeita. Assim, as SNRs recebidas instantâneas no n -ésimo primeiro salto, n -ésimo segundo salto, enlace direto e n -ésimo enlace de auto interferência, podem ser expressas como $\gamma_{SR_n} = g_{SR_n}P_S/N_0$, $\gamma_{R_nD} = g_{R_nD}P_{R_n}/N_0$, $\gamma_{SD} = g_{SD}P_S/N_0$ e $\gamma_{SI_n} = g_{SI_n}P_{R_n}/N_0$, respectivamente, em que P_S e P_{R_n} são dadas em (2.2) e (2.3), e N_0 é a potência do ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), existente nos terminais receptores da rede. Define-se ainda $\gamma_P \triangleq P_t/N_0$ como a SNR transmitida máxima dos nós da rede secundária

e $\gamma_I \triangleq I/N_0$ como a relação interferência-ruído máxima suportada pelo receptor da rede primária. Logo, tem-se que γ_{SR_n} , γ_{R_nD} , γ_{SD} , e γ_{SI_n} podem ser expressas, respectivamente, como

$$\gamma_{SR_n} = \eta_1 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{SP}} \right\} g_{SR_n}, \quad (2.4)$$

$$\gamma_{R_nD} = (1 - \eta_1) \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{R_nP}} \right\} g_{R_nD}, \quad (2.5)$$

$$\gamma_{SD} = \eta_1 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{SP}} \right\} g_{SD}, \quad (2.6)$$

$$\gamma_{SI_n} = (1 - \eta_1) \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{R_nP}} \right\} g_{SI_n}. \quad (2.7)$$

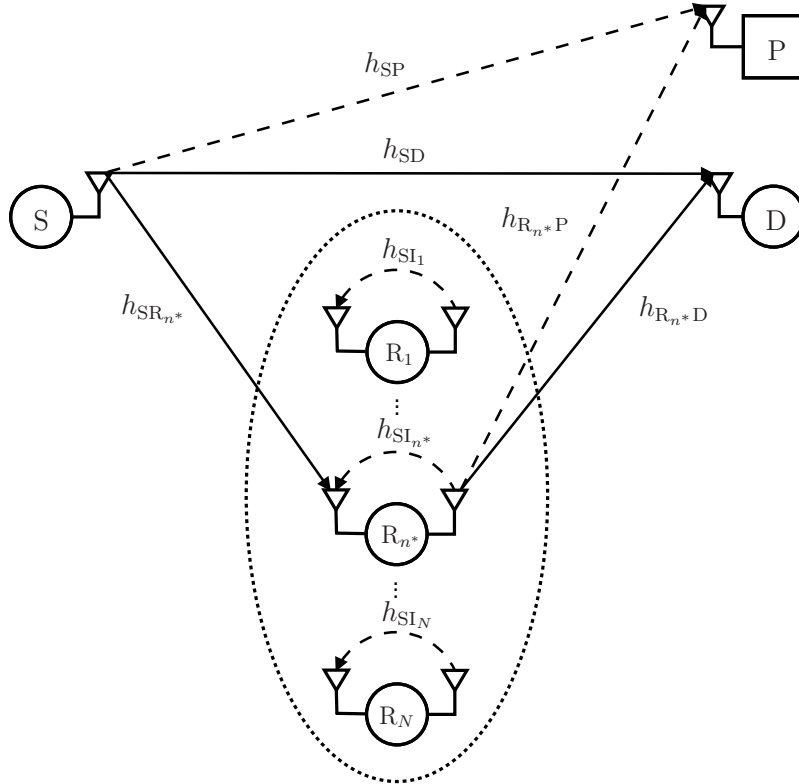


Figura 5 – Modelo do sistema (sinal de interesse: linha sólida; sinal de interferência: linha tracejada).

Para o sistema sob análise, que considera uma rede cooperativa-cognitiva do tipo FD-DF e com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, assume-se que a combinação dos sinais provenientes de S e R_{n^*} em D, é feita por meio da técnica JD (*Joint Decoding*) [10], de tal forma que a SNR do sinal recebido em D é obtida pela soma das SNRs combinadas de S e R_{n^*} . Logo, tem-se que a SNR fim-a-fim recebida instantânea é dada por

$$\gamma = \min \left(\frac{\gamma_{SR_{n^*}}}{1 + \gamma_{SI_{n^*}}}, \gamma_{R_{n^*}D} + \gamma_{SD} \right), \quad (2.8)$$

sendo que o índice n^* refere-se ao *relay* que é selecionado para cooperação, segundo um dos quatro critérios de seleção de *relay* apresentados no capítulo a seguir.

3 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE *RELAY*

Neste capítulo, quatro critérios diferentes de seleção de *relay* para a configuração de rede exposta no Capítulo 2 são apresentados. O índice n^* nas expressões refere-se ao *relay* selecionado de acordo com o critério de seleção utilizado.

- **Seleção Oportunista de *Relay*:** Trata-se do critério de seleção ótimo, neste trabalho denotado como ORS, pois utiliza conhecimento global de CSI de todos os enlaces que constituem a rede. Segundo este critério, o *relay* escolhido para a cooperação, R_{n^*} , é aquele que maximiza a SNR fim-a-fim recebida instantânea em D, cujo índice é obtido como

$$n^* = \arg \max_n \left\{ \min \left(\frac{\gamma_{SR_n}}{1 + \gamma_{SI_n}}, \gamma_{R_n D} + \gamma_{SD} \right) \right\}. \quad (3.1)$$

- **Seleção Parcial Baseada nos Enlaces do Primeiro Salto:** Considerado um critério subótimo, aqui denotado por PRS-1H (*Partial Relay Selection based on First-hop links*), este critério escolhe o *relay* R_{n^*} que maximiza a relação sinal-ruído-mais-interferência (SINR, *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) recebida instantânea no primeiro salto. Portanto, tem-se que

$$n^* = \arg \max_n \left\{ \frac{\gamma_{SR_n}}{1 + \gamma_{SI_n}} \right\}. \quad (3.2)$$

- **Seleção Parcial Baseada nos Enlaces do Segundo Salto:** Neste critério, aqui denotado como PRS-2H (*Partial Relay Selection based on Second-hop links*), o *relay* escolhido é aquele que maximiza a soma das SNRs recebidas instantâneas do enlace direto (comum a todos os *relays*) e do segundo salto, portanto tratando-se de um critério de seleção subótimo, em que

$$n^* = \arg \max_n \{ \gamma_{SD} + \gamma_{R_n D} \}. \quad (3.3)$$

- **Seleção Parcial Baseada nos Enlaces de Auto Interferência:** Também considerado um critério subótimo, aqui denotado como PRS-SI (*Partial Relay Selection based on Self-interference links*), sendo que o *relay* escolhido R_{n^*} é aquele que apenas possui a menor SNR recebida instantânea no enlace de auto interferência, γ_{SI_n} , com o intuito de minimizar a influência da mesma na retransmissão de informação no *relay*. Logo, tem-se que

$$n^* = \arg \min_n \{ \gamma_{SI_n} \}. \quad (3.4)$$

4 PROBABILIDADE DE *OUTAGE*

Para os critérios de seleção de *relay* supracitados, avalia-se o desempenho do sistema em termos da probabilidade de *outage*, definida como em (1.1).

Para o sistema sob análise, substituindo (2.8) em (1.1), tem-se que

$$P_{\text{out}} = \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_{\text{SR}_n^*}}{1 + \gamma_{\text{SI}_n^*}}, \gamma_{\text{R}_n^* \text{D}} + \gamma_{\text{SD}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right]. \quad (4.1)$$

Neste capítulo serão apresentadas as expressões analíticas da probabilidade de *outage* para os critérios de seleção de *relay* em estudo, obtidas a partir de uma análise assintótica. Para tanto, considera-se a região de alta SNR transmitida, isto é, para $\gamma_P \rightarrow \infty$. Assim, as expressões (2.4) a (2.7), respectivamente, podem ser reduzidas a

$$\gamma_{\text{SR}_n} = \eta_1 \frac{\gamma_I}{g_{\text{SP}}} g_{\text{SR}_n}, \quad (4.2)$$

$$\gamma_{\text{R}_n \text{D}} = (1 - \eta_1) \frac{\gamma_I}{g_{\text{R}_n \text{P}}} g_{\text{R}_n \text{D}}, \quad (4.3)$$

$$\gamma_{\text{SD}} = \eta_1 \frac{\gamma_I}{g_{\text{SP}}} g_{\text{SD}}, \quad (4.4)$$

$$\gamma_{\text{SI}_n} = (1 - \eta_1) \frac{\gamma_I}{g_{\text{R}_n \text{P}}} g_{\text{SI}_n}. \quad (4.5)$$

A partir de (4.1), considerando que o *relay* é escolhido segundo os critérios de seleção apresentados no Capítulo 3, expressões assintóticas para a probabilidade de *outage* do esquema de comunicação sob estudo são obtidas conforme apresentado nas proposições das seções a seguir.

4.1 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* - CRITÉRIO ORS

Proposição 1. Uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica, no regime de alta SNR, de uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, em que o critério oportunista de seleção de *relay* é usado para escolher um dentre N *relays* do tipo FD-DF e em que a transmissão pelo enlace direto entre fonte e destino é explorada como fonte de informação, é dada por

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{x^{\gamma_{\text{th}}}}{\eta_1^{\gamma_I}} \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty \left[1 - \exp \left(- \frac{\frac{\gamma_I \eta_1 y_n z - \gamma_{\text{th}} x y_n}{x \Omega_{\text{RD}} - \eta_1 x \Omega_{\text{RD}}} - \frac{\gamma_{\text{th}} x \left(1 - \frac{\gamma_I (\eta_1 - 1) w}{y_n} \right)}{\eta_1 \Omega_{\text{SR}}} \right)}{\gamma_I} \right] \frac{e^{-\frac{w}{\Omega_{\text{SI}}}}}{\Omega_{\text{SI}}} \frac{e^{-\frac{y_n}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RP}}} dw dy_n \right\}^N \\ &\quad \times \frac{e^{-\frac{z}{\Omega_{\text{SD}}}}}{\Omega_{\text{SD}}} \frac{e^{-\frac{x}{\Omega_{\text{SP}}}}}{\Omega_{\text{SP}}} dz dx \end{aligned}$$

$$+ \int_0^\infty \int_{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}}^\infty \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty \left[1 - e^{-\frac{\gamma_{th}x(\frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n}+1)}{\gamma_I\eta_1\Omega_{SR}}} \right] \frac{e^{-\frac{w}{\Omega_{SI}}}}{\Omega_{SI}} \frac{e^{-\frac{yn}{\Omega_{RP}}}}{\Omega_{RP}} dw dy_n \right\}^N \frac{e^{-\frac{z}{\Omega_{SD}}}}{\Omega_{SD}} \frac{e^{-\frac{x}{\Omega_{SP}}}}{\Omega_{SP}} dz dx \quad (4.6)$$

Prova. Vide Apêndice A. $\square$

4.2 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* - CRITÉRIO PRS-1H

Proposição 2. Uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica, no regime de alta SNR, de uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, em que o critério de seleção parcial de *relay* baseado nos enlaces do primeiro salto é usado para escolher um dentre N *relays* do tipo FD-DF e em que a transmissão pelo enlace direto entre fonte e destino é explorada como fonte de informação, é dada por

$$\begin{aligned} P_{out} &= N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{th}} \left[\int_0^\infty \frac{e^{-\frac{y_i}{\Omega_{RP}}} \left(1 - \frac{\eta_1 y_i \Omega_{SR} e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{SR}}}}{\eta_1 y_i \Omega_{SR} - (\eta_1 - 1) ux \Omega_{SI}} \right)}{\Omega_{RP}} dy_i \right]^{N-1} \\ &\quad \times \frac{xy_n(\eta_1 \Omega_{SR}(y_n - \gamma_I(\eta_1 - 1)\Omega_{SI}) - (\eta_1 - 1)ux\Omega_{SI}) e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{SR}} - \frac{x}{\Omega_{SP}} - \frac{yn}{\Omega_{RP}}}}{\gamma_I \Omega_{RP} \Omega_{SP} ((\eta_1 - 1)ux\Omega_{SI} - \eta_1 y_n \Omega_{SR})^2} dud y_n dx \\ &+ N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{\gamma_{th}x}{\gamma_I \eta_1}} \int_0^\infty \left(1 - e^{-\frac{\gamma_I \eta_1 y_n z - \gamma_{th} x y_n}{\gamma_I x \Omega_{RD} - \gamma_I \eta_1 x \Omega_{RD}}} \right) \left[\int_0^\infty \frac{e^{-\frac{y_i}{\Omega_{RP}}} \left(1 - \frac{\eta_1 y_i \Omega_{SR} e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{SR}}}}{\eta_1 y_i \Omega_{SR} - (\eta_1 - 1)ux\Omega_{SI}} \right)}{\Omega_{RP}} dy_i \right]^{N-1} \\ &\quad \times \frac{xy_n(\eta_1 \Omega_{SR}(y_n - \gamma_I(\eta_1 - 1)\Omega_{SI}) - (\eta_1 - 1)ux\Omega_{SI}) e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{SR}} - \frac{x}{\Omega_{SP}} - \frac{yn}{\Omega_{RP}} - \frac{z}{\Omega_{SD}}}}{\gamma_I \Omega_{RP} \Omega_{SD} \Omega_{SP} ((\eta_1 - 1)ux\Omega_{SI} - \eta_1 y_n \Omega_{SR})^2} \\ &\quad \times dud z dy_n dx \\ &- N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{\gamma_{th}x}{\gamma_I \eta_1}} \int_0^{\gamma_{th}} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_I \eta_1 y_n z - \gamma_{th} x y_n}{\gamma_I x \Omega_{RD} - \gamma_I \eta_1 x \Omega_{RD}}} \right) \left[\int_0^\infty \frac{e^{-\frac{y_i}{\Omega_{RP}}} \left(1 - \frac{\eta_1 y_i \Omega_{SR} e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{SR}}}}{\eta_1 y_i \Omega_{SR} - (\eta_1 - 1)ux\Omega_{SI}} \right)}{\Omega_{RP}} dy_i \right]^{N-1} \\ &\quad \times \frac{xy_n(\eta_1 \Omega_{SR}(y_n - \gamma_I(\eta_1 - 1)\Omega_{SI}) - (\eta_1 - 1)ux\Omega_{SI}) e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{SR}} - \frac{x}{\Omega_{SP}} - \frac{yn}{\Omega_{RP}} - \frac{z}{\Omega_{SD}}}}{\gamma_I \Omega_{RP} \Omega_{SD} \Omega_{SP} ((\eta_1 - 1)ux\Omega_{SI} - \eta_1 y_n \Omega_{SR})^2} \\ &\quad \times dud z dy_n dx \end{aligned} \quad (4.7)$$

Prova. Vide Apêndice B. $\square$

4.3 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* - CRITÉRIO PRS-2H

Proposição 3. Uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica, no regime de alta SNR, de uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, em que o critério de seleção parcial de *relay* baseado nos enlaces do

segundo salto é usado para escolher um dentre N relays do tipo FD-DF e em que a transmissão pelo enlace direto entre fonte e destino é explorada como fonte de informação, é dada por

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= N \int_0^\infty \int_0^\infty \left(1 - \frac{\eta_1 y_n \Omega_{\text{SR}} e^{-\frac{\gamma_{\text{th}} x}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{\text{SR}}}}}{\eta_1 y_n \Omega_{\text{SR}} - (\eta_1 - 1) \gamma_{\text{th}} x \Omega_{\text{SI}}} \right) \left[\int_0^\infty \int_0^\infty \frac{(1 - e^{-\frac{v y_i}{y_n \Omega_{\text{RD}}}}) e^{-\frac{v}{\Omega_{\text{RD}}} - \frac{y_i}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RD}} \Omega_{\text{RP}}} dv dy_i \right]^{N-1} \\
&\quad \times \frac{e^{-\frac{x}{\Omega_{\text{SP}}} - \frac{y_n}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RP}} \Omega_{\text{SP}}} dy_n dx \\
&+ N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\gamma_{\text{th}} x}{\gamma_I \eta_1} \left[\int_0^\infty \int_0^\infty \frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I \eta_2} \frac{(1 - e^{-\frac{v y_i}{y_n \Omega_{\text{RD}}}}) e^{-\frac{v}{\Omega_{\text{RD}}} - \frac{y_i}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RD}} \Omega_{\text{RP}}} dv dy_i \right]^{N-1} \frac{e^{-\frac{x}{\Omega_{\text{SP}}} - \frac{y_n}{\Omega_{\text{RP}}} - \frac{z}{\Omega_{\text{SD}}}}}{\Omega_{\text{RP}} \Omega_{\text{SD}} \Omega_{\text{SP}}} \\
&\quad \times dz dy_n dx \\
&- N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\gamma_{\text{th}} x}{\gamma_I \eta_1} \left(1 - \frac{\eta_1 y_n \Omega_{\text{SR}} e^{-\frac{\gamma_{\text{th}} x}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{\text{SR}}}}}{\eta_1 y_n \Omega_{\text{SR}} - (\eta_1 - 1) \gamma_{\text{th}} x \Omega_{\text{SI}}} \right) \\
&\quad \times \left[\int_0^\infty \int_0^\infty \frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I \eta_2} \frac{(1 - e^{-\frac{v y_i}{y_n \Omega_{\text{RD}}}}) e^{-\frac{v}{\Omega_{\text{RD}}} - \frac{y_i}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RD}} \Omega_{\text{RP}}} dv dy_i \right]^{N-1} \\
&\quad \times \frac{e^{-\frac{x}{\Omega_{\text{SP}}} - \frac{y_n}{\Omega_{\text{RP}}} - \frac{z}{\Omega_{\text{SD}}}}}{\Omega_{\text{RP}} \Omega_{\text{SD}} \Omega_{\text{SP}}} dz dy_n dx \tag{4.8}
\end{aligned}$$

Prova. Vide Apêndice C. $\square$

4.4 PROBABILIDADE DE OUTAGE - CRITÉRIO PRS-SI

Proposição 4. Uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica, no regime de alta SNR, de uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, em que o critério de seleção parcial de *relay* baseado nos enlaces de auto interferência é usado para escolher um dentre N relays do tipo FD-DF e em que a transmissão pelo enlace direto entre fonte e destino é explorada como fonte de informação, é dada por

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{\text{th}} x \left(\frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} + 1 \right)}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{\text{SR}}}} \right) \left(\int_0^\infty \frac{e^{-\frac{w y_i}{y_n \Omega_{\text{SI}}}} e^{-\frac{y_i}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RP}}} dy_i \right)^{N-1} \frac{e^{-\frac{w}{\Omega_{\text{SI}}} - \frac{x}{\Omega_{\text{SP}}} - \frac{y_n}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RP}} \Omega_{\text{SI}} \Omega_{\text{SP}}} dw dy_n dx \\
&+ N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\gamma_{\text{th}} x}{\gamma_I \eta_1} \left(1 - e^{-\frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I \eta_2 \Omega_{\text{RD}}}} \right) \left(\int_0^\infty \frac{e^{-\frac{w y_i}{y_n \Omega_{\text{SI}}}} e^{-\frac{y_i}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RP}}} dy_i \right)^{N-1} \frac{e^{-\frac{w}{\Omega_{\text{SI}}} - \frac{x}{\Omega_{\text{SP}}} - \frac{y_n}{\Omega_{\text{RP}}} - \frac{z}{\Omega_{\text{SD}}}}}{\Omega_{\text{RP}} \Omega_{\text{SD}} \Omega_{\text{SI}} \Omega_{\text{SP}}} \\
&\quad \times dz dw dy_n dx \\
&- N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\gamma_{\text{th}} x}{\gamma_I \eta_1} \left[\left(1 - e^{-\frac{\gamma_{\text{th}} w (\gamma_I \eta_2 x + y_n)}{\gamma_I \eta_1 y_n \Omega_{\text{SR}}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{x (\gamma_I \eta_1 \gamma_{\text{th}} - y_n z)}{\gamma_I \eta_2 \Omega_{\text{RD}} z}} \right) \right] \left(\int_0^\infty \frac{e^{-\frac{w y_i}{y_n \Omega_{\text{SI}}}} e^{-\frac{y_i}{\Omega_{\text{RP}}}}}{\Omega_{\text{RP}}} dy_i \right)^{N-1} \\
&\quad \times dz dw dy_n dx
\end{aligned}$$

$$\times \frac{e^{-\frac{w}{\Omega_{\text{SI}}} - \frac{x}{\Omega_{\text{SP}}} - \frac{y_n}{\Omega_{\text{RP}}} - \frac{z}{\Omega_{\text{SD}}}}}{\Omega_{\text{RP}}\Omega_{\text{SD}}\Omega_{\text{SI}}\Omega_{\text{SP}}} dz dw dy_n dx \quad (4.9)$$

Prova. Vide Apêndice D.

□

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, utiliza-se de exemplos numéricos para avaliar o desempenho de *outage* para os critérios de seleção de *relay* expostos no Capítulo 3. Os resultados numéricos foram obtidos a partir das expressões analíticas para a probabilidade de *outage* assintótica derivadas no Capítulo 4 e validados por meio de simulações de Monte Carlo, em que utilizou-se 10^8 iterações. Para tanto, considerou-se uma topologia de rede bidimensional com distâncias normalizadas entre seus nós pertencentes, como mostrado na Fig. 6, em que nas coordenadas $(0;0)$, $(0,5;0)$ e $(1;0)$, localizam-se, respectivamente, a fonte, o *cluster* de *relays* e o destino da rede secundária, e na coordenada $(0,25;1)$, localiza-se o receptor da rede primária. Assume-se que o ganho médio do canal entre um dado par de nós é $\Omega_A = d_A^{-\alpha}$, para $A \in \{SR_n, R_nD, SD, SP, R_nP\}$, onde d_A é a distância entre os nós, e α é o expoente de perda de percurso. Estabelece-se $\alpha = 4$ e o limiar alvo de SNR recebida instantânea $\gamma_{th} = 0$ dB. Um resumo dos parâmetros utilizados para a avaliação do desempenho é apresentado na Tabela 1.

A Fig. 7 apresenta o desempenho de *outage* pela SNR máxima transmitida do sistema, γ_P , para os quatro critérios de seleção avaliados e um número diferente de *relays* $N = 1, 2, 3$. Assumiu-se que $\Omega_{SI_n} = -10$ dB, $\gamma_I = 20$ dB e $\eta_1 = 0,5$ (isto é, um esquema de alocação igual de potência entre os nós S e R_n^*). Note que, para $N = 1$, todos os critérios apresentam o mesmo desempenho, como esperado. Note ainda que, para $N > 1$, pelo fato de explorar o conhecimento global dos estados de canal da rede, o critério oportunista possui um desempenho superior em relação aos critérios de seleção parcial. Porém, o critério PRS-1H, baseado no conhecimento de CSI dos primeiros saltos, apresenta o mesmo desempenho que o critério oportunista para a região de alta SNR. Logo, o uso deste critério parcial mostra ser mais eficiente em termos do *feedback overhead* requerido,

Tabela 1 – Parâmetros do sistema.

Parâmetro	Valor
Expoente de perda de percurso	$\alpha = 4$
Limiar alvo	$\gamma_{th} = 0$ dB
Alocação igual de potência entre fonte e relay	$\eta_1 = 0,5$
Restrição de temperatura de interferência	$\gamma_I = 20$ dB
Ganho médio do enlace de auto interferência	$\Omega_{SI_n} = -10$ dB
Ganho médio do enlace S→D	$\Omega_{SD} = d_{SD}^{-\alpha}$
Ganho médio do enlace S→ R_n	$\Omega_{SR_n} = d_{SR_n}^{-\alpha}$
Ganho médio do enlace R_n →D	$\Omega_{R_nD} = d_{R_nD}^{-\alpha}$
Ganho médio do enlace S→P	$\Omega_{SP} = d_{SP}^{-\alpha}$
Ganho médio do enlace R_n →P	$\Omega_{R_nP} = d_{R_nP}^{-\alpha}$
Número de relays	$N = 1, 2, 3$

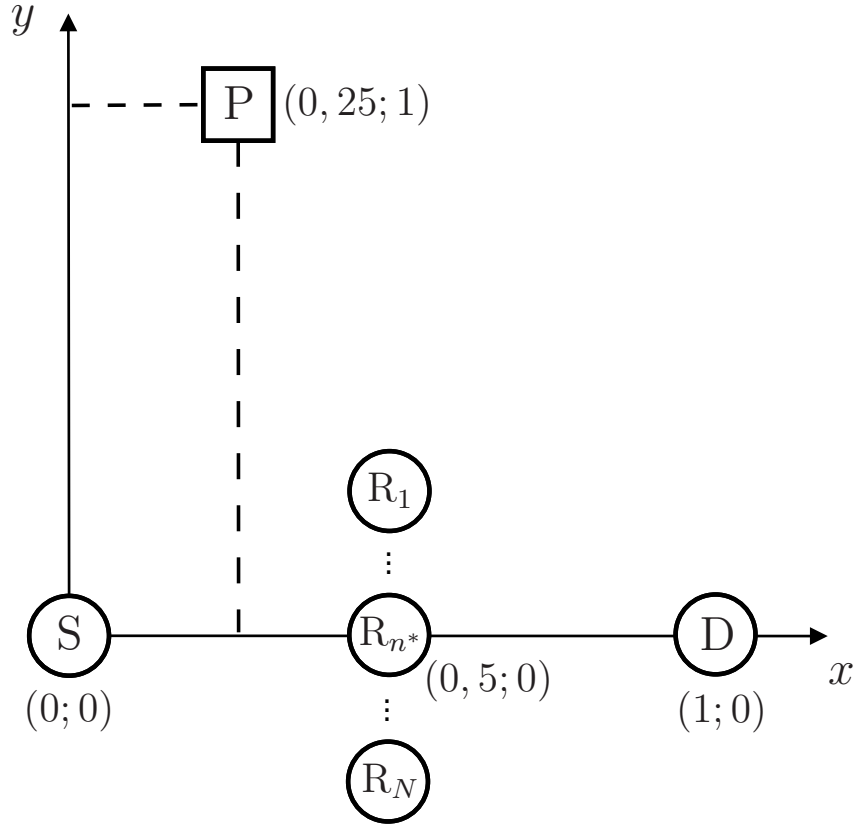


Figura 6 – Topologia da rede com distâncias normalizadas entre os nós.

já que uma menor quantidade de CSI é necessária para determinar o *relay* escolhido, quando comparado ao uso do critério oportunista. Por outro lado, observe que o critério PRS-SI apresenta um desempenho melhor quando comparado ao critério PRS-2H, que, interessante, apresenta degradação no desempenho conforme o número de *relays* aumenta. Isto deve-se ao fato de que, a fim de maximizar a SNR recebida no segundo salto de acordo com o critério em (3.3), a SINR correspondente ao primeiro salto do *relay* escolhido pode resultar severamente comprometida pela auto interferência, sendo este o gargalo da comunicação entre S e D, sob o protocolo de retransmissão DF, conforme dado por (2.8). Observe ainda que esse efeito se acentua com o aumento de N . Cabe destacar que, as assíntotas obtidas a partir da avaliação das expressões analíticas em (4.6) a (4.9) coincidem perfeitamente com os resultados obtidos por simulação na região de alta SNR, validando assim a análise.

Na Fig. 8, é ilustrado o efeito da auto interferência inerente aos *relays* FD no desempenho de *outage* do sistema para os quatro critérios de seleção avaliados, em que dois valores de ganho médio do canal de auto interferência são considerados, $\Omega_{SI_n} = -5$ e -10 dB, assim como um número fixo de *relays*, $N = 3$. Para este cenário, assumiu-se que $\gamma_I = 20$ dB e $\eta_1 = 0,5$. Observe que nas curvas de desempenho surgem patamares na região de alta SNR. Isto se deve a dois fatores principais: a auto interferência presente no *relay* e a restrição de temperatura de interferência no receptor primário. Note que,

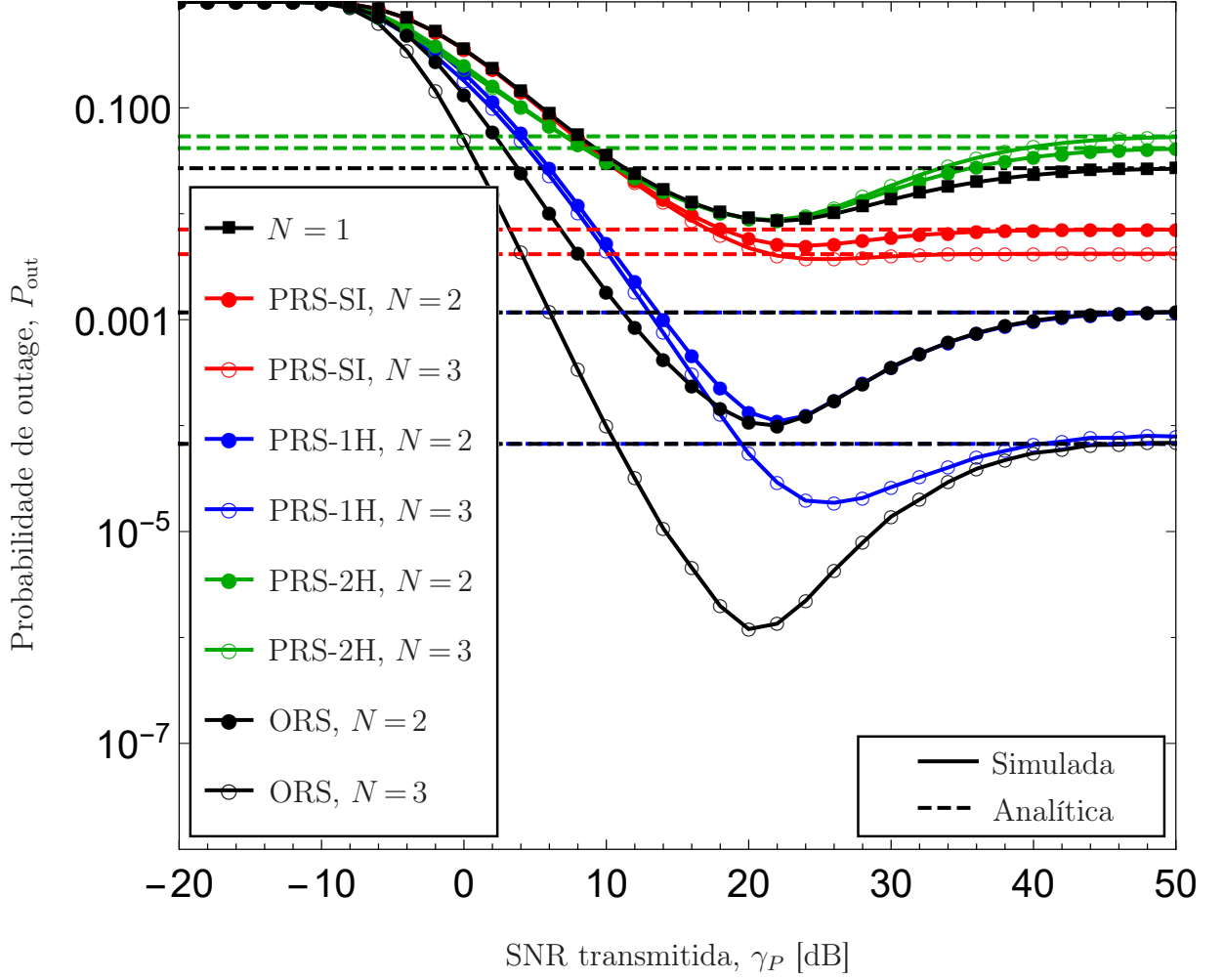


Figura 7 – Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número diferente de *relays* $N = 1, 2, 3$; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB; $\gamma_I = 20$ dB e $\eta_1 = 0,5$.

para baixos valores do ganho médio do canal de auto interferência (como, por exemplo, $\Omega_{SI_n} = -10$ dB), a probabilidade de *outage* é governada de maneira majoritária pela restrição de temperatura de interferência, γ_I , uma vez que, para valores de SNR transmitida aproximadamente igual ao valor de γ_I , ou seja, $\gamma_P \approx \gamma_I = 20$ dB, patamares são obtidos nas curvas de desempenho. Em contrapartida, com o aumento do ganho médio do canal de auto interferência, deteriora-se o desempenho de *outage* do sistema, comportamento esperado e que resulta em um aumento do nível do patamar nas curvas. Observe ainda que, para diferentes valores de Ω_{SI_n} , o comportamento das curvas de desempenho é semelhante ao caso da Fig. 7. Logo, neste cenário, o critério PRS-SI também apresenta melhor desempenho em relação ao critério PRS-2H, assim como o desempenho do critério PRS-1H converge àquele apresentado pelo critério ORS para regiões de alta SNR.

O desempenho de *outage* do sistema para dois valores de restrição de temperatura de interferência no receptor primário, $\gamma_I = 20$ e 30 dB, é apresentado na Fig. 9. Para tanto, considerando uma rede com um número fixo de *relays* $N = 3$, assumiu-se $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e

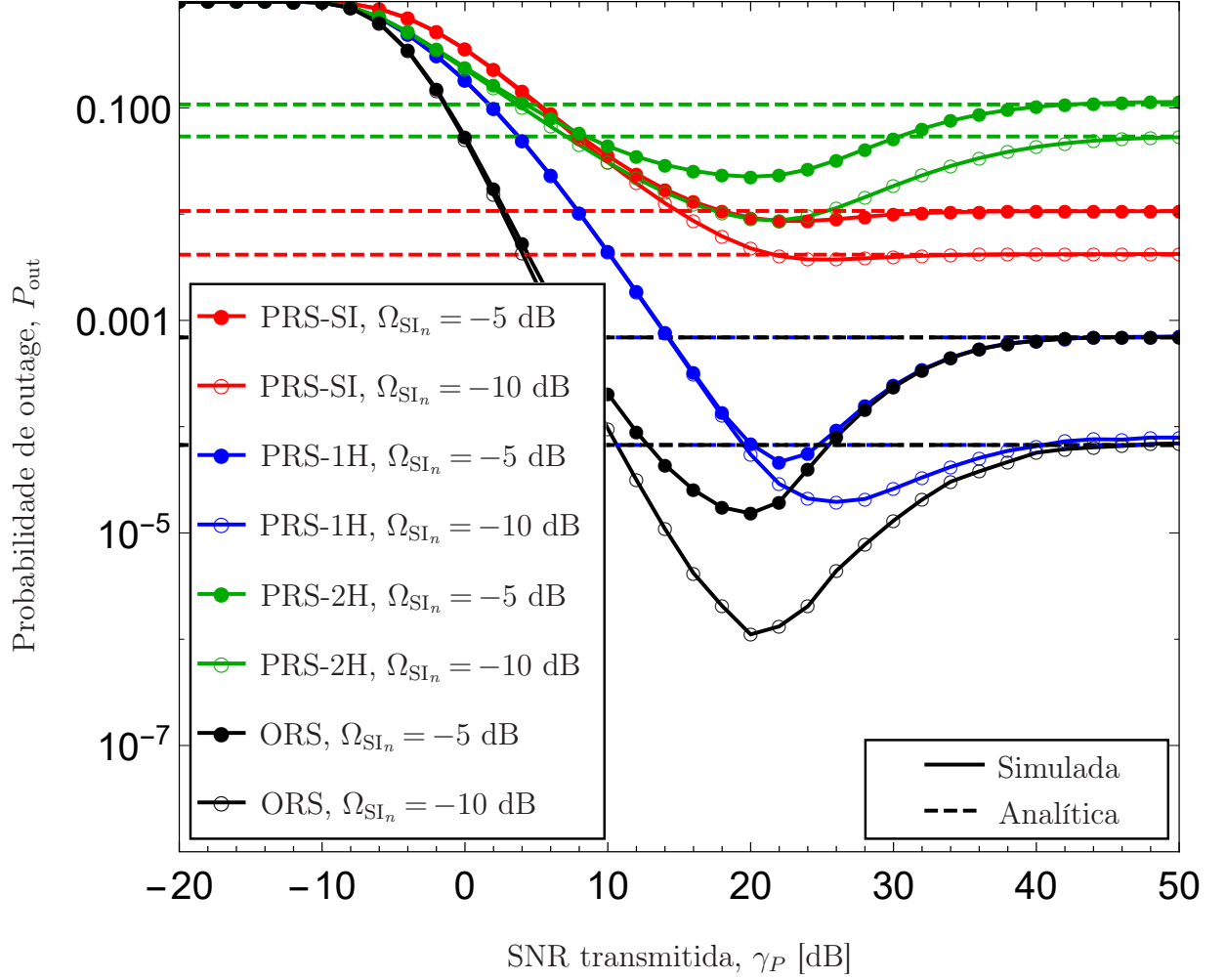


Figura 8 – Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número de *relays* $N = 3$; $\Omega_{SIn} = -5$ e -10 dB; $\gamma_I = 20$ dB e $\eta_1 = 0,5$.

$\eta_1 = 0,5$. Observe que, para valores elevados de γ_I , como por exemplo $\gamma_I = 30$ dB, melhora-se o desempenho de *outage* dos critérios de seleção estudados, resultando em uma leve diminuição do nível dos patamares de *outage*, enquanto que no intervalo de SNR de 20 dB a 40 dB, o desempenho das curvas referentes a $\gamma_I = 30$ dB apresenta superioridade evidente em relação às curvas com $\gamma_I = 20$ dB. Para este cenário, o estado do enlace de auto interferência no *relay* possui influência majoritária nas curvas de desempenho, já que com o aumento da SNR transmitida, diminui-se a SINR recebida do primeiro salto, pois o efeito da auto interferência no *relay* é acentuado, tornando-se, portanto, o gargalo da comunicação entre S e D. Note que, para os valores de γ_I avaliados, os critérios ORS e PRS-1H convergem em alta SNR. Note também que, nas curvas até aqui apresentadas, há um ponto de inflexão nas regiões de SNR próximas aos valores de temperatura de interferência utilizados ($\gamma_P \approx \gamma_I$). Isso ocorre devido à restrição de potência inerente aos cenários com compartilhamento de espectro do tipo *underlay*, já que a partir deste valor de temperatura de interferência, o desempenho da rede se degrada, ao passo que a potência

de transmissão da rede secundária é limitada. Já para um cenário cooperativo puro (ou seja, sem compartilhamento de espectro), as curvas de desempenho apenas saturariam devido ao efeito da auto interferência e este ponto de inflexão não existiria.

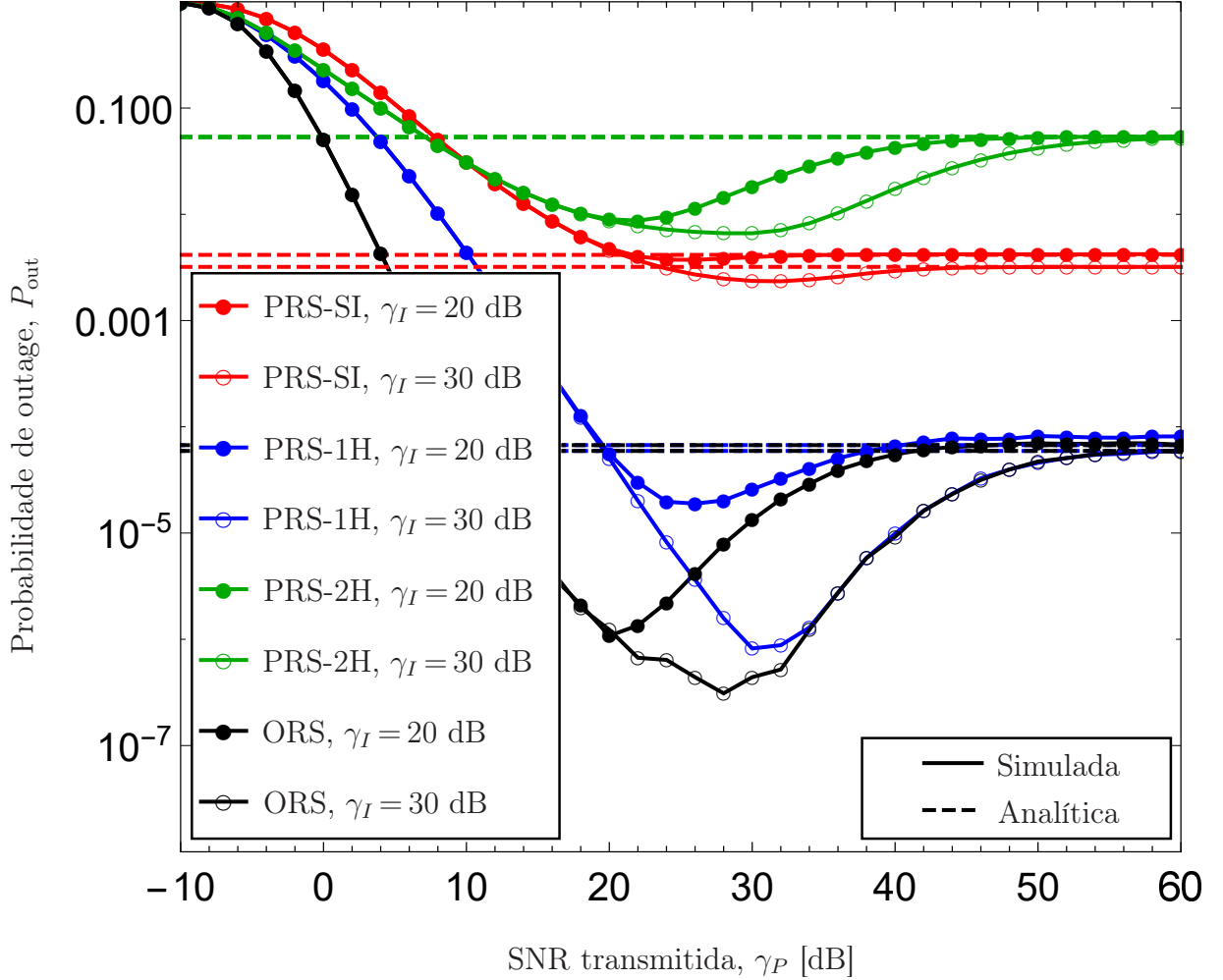


Figura 9 – Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número de *relays* $N = 3$; $\gamma_I = 20$ e 30 dB; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\eta_1 = 0,5$.

Na Fig. 10, o impacto do fator de alocação de potência entre fonte e *relay* na probabilidade de *outage* do sistema é apresentado para os quatro critérios de seleção estudados. Desta forma, considerou-se que $\gamma_I = 20$ dB, $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\gamma_P = 10$ dB. Nota-se que, para os critérios avaliados, de acordo com o aumento da potência alocada à fonte (aumento de η_1), há uma melhoria no desempenho de *outage* do sistema, já que para um valor fixo de Ω_{SI_n} , o efeito da auto interferência é menos prejudicial a medida que a potência transmitida do *relay* diminui. Em contrapartida, note que o ganho de desempenho dos critérios PRS-SI e PRS-2H é desprezível conforme o número de *relays* aumenta, enquanto que o ganho do critério de seleção ótimo (ORS) é sempre significativo.

A Fig. 11 apresenta o desempenho de *outage* do sistema versus a distância normalizada entre a fonte e o *cluster* de *relays*, d_{SR_n} , tal que $0 < d_{SR_n} < 1$ e $d_{SR_n} + d_{R_nD} = 1$. Ademais,

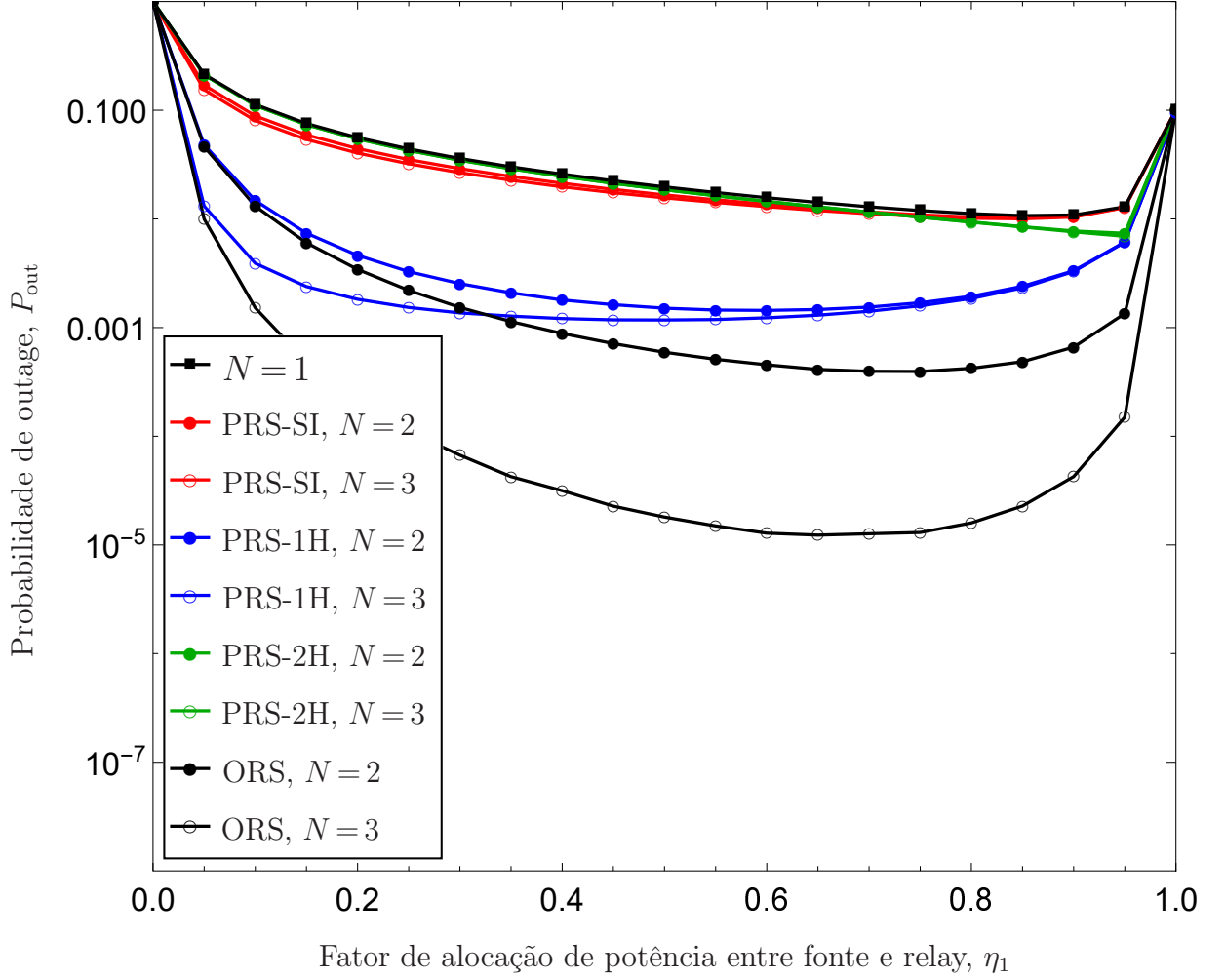


Figura 10 – Probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de potência entre fonte e *relay*, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número diferente de *relays* $N = 1, 2, 3$; $\gamma_I = 20$ dB; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\gamma_P = 10$ dB.

para fins ilustrativos, o receptor primário é localizado na coordenada $(d_{SR_n}/2, 1)$, para que haja simetria com respeito a S e R_n . Neste caso, assumiu-se $\gamma_I = 20$ dB, $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\gamma_P = 10$ dB. Note que, conforme N aumenta, há um ganho significativo de desempenho em $d_{SR_n} \approx 0,4$, para o critério ORS. Note também que, no caso do critério PRS-2H, há uma rápida deterioração no desempenho do sistema a medida que R_n se aproxima de D, pois ao maximizar a SNR recebida do segundo salto (vide (3.3)), a diversidade espacial do enlace entre S e R_n não é explorada por esse critério e esse enlace então possui um ganho médio do canal degradado para posições do *relay* próximas do destino, tornando-o o gargalo do sistema. Em contrapartida, para o critério PRS-1H, observa-se um ganho de desempenho conforme N aumenta, a partir de $d_{SR_n} \approx 0,5$, dado que o ganho médio do canal no primeiro salto é enfraquecido para essas posições do *relay*. No entanto, o critério PRS-1H melhora o desempenho do sistema ao explorar a diversidade espacial dos enlaces entre a fonte e o *cluster* de *relays*. Observe ainda que, as curvas de desempenho dos critérios PRS-1H e ORS convergem a partir de $d_{SR_n} \approx 0,6$, enquanto que os critérios PRS-

2H e ORS convergem em posições muito próximas de S. Já o critério PRS-SI praticamente não apresenta ganho de desempenho, uma vez que o enlace de auto interferência inerente ao *relay* não depende da distância entre os nós S e R_n .

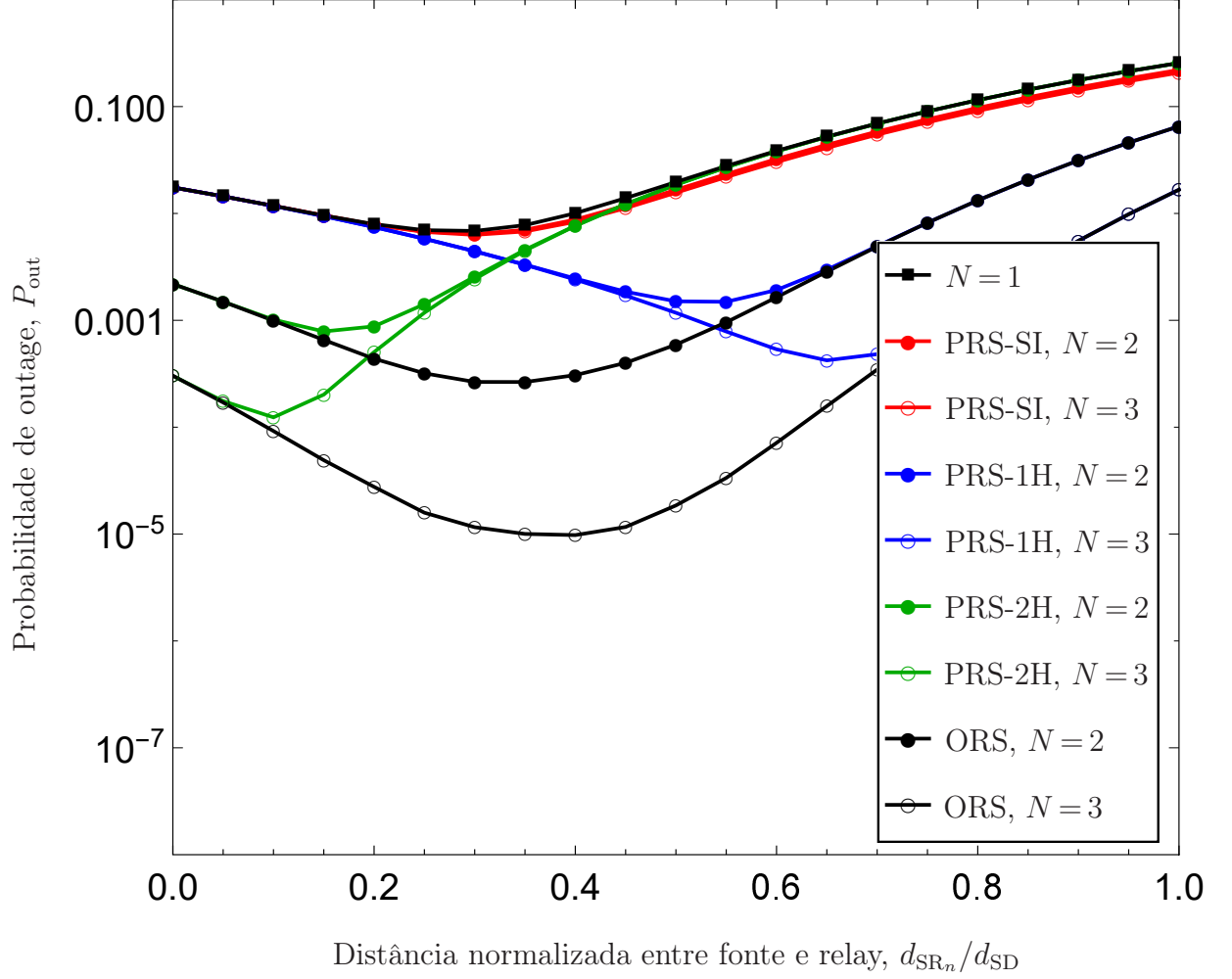


Figura 11 – Probabilidade de *outage* vs. distância normalizada entre fonte e *relay*, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número diferente de *relays* $N = 1, 2, 3$; $\gamma_I = 20$ dB; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB; $\gamma_P = 10$ dB e $\eta_1 = 0,5$.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisou-se a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa-cognitiva baseada em *relays* do tipo *full duplex* sob o protocolo decodifica-e-encaminha, para diferentes parâmetros do sistema e quatro critérios de seleção de *relay*. Expressões analíticas para a probabilidade de *outage* assintótica para cada critério de seleção de *relay* foram obtidas e validadas por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo. Constatou-se que o desempenho do sistema pode ser degradado de maneira significativa a depender do valor da auto interferência inerente aos *relays* do tipo FD. Constatou-se também que o melhor desempenho é obtido por meio do critério de seleção oportunista, como esperado, já que o mesmo detém conhecimento do CSI global da rede. Porém, o critério PRS-1H, que considera as informações de estado de canal do primeiro salto, atingiu o mesmo desempenho que o critério de seleção oportunista na região de alta SNR transmitida. Dessa maneira, o uso do critério PRS-1H nessa região é mais eficiente em termos do *feedback overhead* requerido. Notou-se ainda que o critério de seleção PRS-SI, baseado apenas em CSI dos enlaces de auto interferência, apresentou melhor desempenho em relação ao critério PRS-2H, baseado em CSI do segundo salto. Por fim, constatou-se que patamares de desempenho são provocados por dois fatores principais, a saber: a auto interferência presente no *relay* FD e a restrição de temperatura de interferência imposta pelo receptor primário.

Para trabalhos futuros, pode ser contemplada a avaliação do efeito da transmissão de usuários primários no desempenho da rede secundária, já que neste trabalho apenas foi considerada a presença do receptor primário.

APÊNDICES

A. PROBABILIDADE DE *OUTAGE* - CRITÉRIO ORS

Prova da Proposição 1

Neste apêndice, deriva-se uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica de uma rede cooperativa-cognitiva FD-DF com compartilhamento espectral do tipo *underlay* e seleção oportunista de *relay*. No esquema considerado, o evento de *outage* ocorre quando a SNR fim-a-fim recebida, γ , está abaixo de um dado limiar γ_{th} . Portanto, a probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_{\text{SR}_{n^*}}}{1 + \gamma_{\text{SI}_{n^*}}}, \gamma_{\text{R}_{n^*}\text{D}} + \gamma_{\text{SD}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
 &= \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_{\text{SR}_1}}{1 + \gamma_{\text{SI}_1}}, \gamma_{\text{R}_1\text{D}} + \gamma_{\text{SD}} \right) < \gamma_{\text{th}}, \dots, \min \left(\frac{\gamma_{\text{SR}_N}}{1 + \gamma_{\text{SI}_N}}, \gamma_{\text{R}_N\text{D}} + \gamma_{\text{SD}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
 &= \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_1}}{g_{\text{SP}} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_1}}{g_{\text{R}_1\text{P}}} \right)}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_1\text{D}}}{g_{\text{R}_1\text{P}}} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{g_{\text{SP}}} \right) < \gamma_{\text{th}}, \right. \\
 &\quad \left. \dots, \min \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_N}}{g_{\text{SP}} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_N}}{g_{\text{R}_N\text{P}}} \right)}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_N\text{D}}}{g_{\text{R}_N\text{P}}} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{g_{\text{SP}}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
 &\stackrel{(a)}{=} \int_0^\infty \int_0^\infty \prod_{n=1}^N \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{g_{\text{R}_n\text{P}}} \right)}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{g_{\text{R}_n\text{P}}} + \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
 &\quad \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dx, \tag{A.1}
 \end{aligned}$$

em que, no passo (a), descondicionou-se a probabilidade de *outage* do sistema, P_{out} , em relação aos ganhos de canal variáveis g_{SP} e g_{SD} , a fim de tornar o evento conjunto em um produto, ao passo que o *relay* escolhido ($n^* = n$) é obtido por meio de (3.1), sendo aquele que apresenta a maior SNR fim-a-fim recebida instantânea em comparação com os outros *relays*. No passo (b), para separar o operador $\min(\cdot, \cdot)$ tal que [20, cap. 6],

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &\stackrel{(b)}{=} \int_0^\infty \int_0^\infty \prod_{n=1}^N \int_0^\infty \left[\Pr \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right)} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right. \\
 &\quad \left. + \Pr \left(\frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right. \\
 &\quad \left. - \Pr \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right)} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right] \\
 &\quad \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dx
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \Pr \left(\frac{\gamma_I(1-\eta_1)g_{R_nD}}{y_n} + \frac{\gamma_I\eta_1 g_{SD}}{x} < \gamma_{th} \middle| n^* = n \right) f_{g_{R_nP}}(y_n) dy_n \Big] \\ & \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx, \end{aligned} \quad (A.2)$$

foi necessário descondicionar P_{out} em relação ao ganho de canal g_{R_nP} , comum no primeiro e segundo salto (vide (2.5) e (2.7)). Dessa forma, tem-se que

$$\begin{aligned} P_{out} = & \int_0^\infty \int_0^\infty \prod_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \middle| n^* = n \right) \right. \\ & + \underbrace{\Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \middle| n^* = n \right)}_{A_1} \\ & - \Pr \left(g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \middle| n^* = n \right) \\ & \times \underbrace{\Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \middle| n^* = n \right)}_{A_2} f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) dw dy_n \Big] \\ & \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx. \end{aligned} \quad (A.3)$$

De (A.3), observa-se que, para os termos A_1 e A_2 , o evento de *outage* pode ocorrer para $z < x\gamma_{th}/\eta_1\gamma_I$, sendo que para valores de z maiores que este, o ganho do canal g_{R_nD} teria que ser menor que uma grandeza negativa, o que é improvável, já que o mesmo é sempre positivo. Portanto, tem-se que $\Pr(g_{R_nD} < y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})/\gamma_I(1-\eta_1)) = 0$. Logo, a expressão da probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned} P_{out} = & \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \prod_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \middle| n^* = n \right) \right. \\ & + \Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \middle| n^* = n \right) \\ & - \Pr \left(g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \middle| n^* = n \right) \\ & \times \Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \middle| n^* = n \right) f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) dw dy_n \Big] \\ & \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx \\ & + \int_0^\infty \int_{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}}^\infty \left[\prod_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left(g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \middle| n^* = n \right) \right. \\ & \times f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) dw dy_n \Big] f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx \\ = & \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \prod_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[F_{g_{SR_n}} \left(\frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \right) \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + F_{g_{\text{RD}}} \left(\frac{y_n (\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \right) - F_{g_{\text{SR}_n}} \left(\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} \right) \right) \\
& \times F_{g_{\text{RD}}} \left(\frac{y_n (\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \right) f_{g_{\text{SI}_n}}(w) f_{g_{\text{RP}}}(y_n) dw dy_n \Big] f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dx \\
& + \int_0^\infty \int_{\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}}^\infty \left[\prod_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{\text{SR}_n}} \left(\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} \right) \right) f_{g_{\text{SI}_n}}(w) f_{g_{\text{RP}}}(y_n) dw dy_n \right] \\
& \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dx. \tag{A.4}
\end{aligned}$$

Assumindo que os coeficientes de canal são independentes e identicamente distribuídos, os produtórios em (A.4) podem ser expressos como potência de seus fatores, já que as variáveis aleatórias que representam cada canal podem ser consideradas instâncias independentes de uma mesma distribuição. Portanto, de (A.4), tem-se que

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} = & \int_0^\infty \int_{\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}}^\infty \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty \left[F_{g_{\text{SR}}} \left(\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} \right) \right) \right. \right. \\
& + F_{g_{\text{RD}}} \left(\frac{y_n (\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \right) - F_{g_{\text{SR}}} \left(\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} \right) \right) \\
& \times F_{g_{\text{RD}}} \left(\frac{y_n (\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \right) \Big] f_{g_{\text{SI}}}(w) f_{g_{\text{RP}}}(y_n) dw dy_n \Big\}^N f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dx \\
& + \int_0^\infty \int_{\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}}^\infty \left[\int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{\text{SR}}} \left(\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} \right) \right) f_{g_{\text{SI}}}(w) f_{g_{\text{RP}}}(y_n) dw dy_n \right]^N \\
& \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dx, \tag{A.5}
\end{aligned}$$

em que

$$F_{g_{\text{SR}}} \left(\frac{x \gamma_{\text{th}}}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} \right) \right) = 1 - e^{-\frac{\gamma_{\text{th}} x \left(\frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} + 1 \right)}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{\text{SR}}}}, \tag{A.6}$$

$$F_{g_{\text{RD}}} \left(\frac{y_n (\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \right) = 1 - e^{-\frac{y_n (\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I (1 - \eta_1) \Omega_{\text{RD}}}}, \tag{A.7}$$

são as CDFs (*Cumulative Distribution Functions*) de g_{SR} e g_{RD} , respectivamente, e

$$f_{g_{\text{SI}}}(w) = \frac{1}{\Omega_{\text{SI}}} e^{-\frac{w}{\Omega_{\text{SI}}}}, \tag{A.8}$$

$$f_{g_{\text{RP}}}(y_n) = \frac{1}{\Omega_{\text{RP}}} e^{-\frac{y_n}{\Omega_{\text{RP}}}}, \tag{A.9}$$

$$f_{g_{\text{SD}}}(z) = \frac{1}{\Omega_{\text{SD}}} e^{-\frac{z}{\Omega_{\text{SD}}}}, \tag{A.10}$$

$$f_{g_{\text{SP}}}(x) = \frac{1}{\Omega_{\text{SP}}} e^{-\frac{x}{\Omega_{\text{SP}}}}, \tag{A.11}$$

são as PDFs (*Probability Density Functions*) de g_{SI} , g_{RP} , g_{SD} e g_{SP} , respectivamente. Substituindo (A.6)–(A.11) em (A.5) e após algumas simplificações matemáticas, obtém-

se uma expressão para a probabilidade de *outage* assintótica do sistema, usando o esquema ORS, como apresentada em (4.6).

B. PROBABILIDADE DE *OUTAGE* - CRITÉRIO PRS-1H

Prova da Proposição 2

Neste apêndice, deriva-se uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica de uma rede cooperativa-cognitiva FD-DF com compartilhamento espectral do tipo *underlay* e seleção parcial de *relay* baseada nos enlaces do primeiro salto. No esquema considerado, o evento de *outage* ocorre quando a SNR fim-a-fim recebida, γ , está abaixo de um dado limiar γ_{th} . Portanto, a probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_{\text{SR}_{n^*}}}{1 + \gamma_{\text{SI}_{n^*}}}, \gamma_{\text{R}_{n^*}\text{D}} + \gamma_{\text{SD}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
&= \Pr \left[\min \left(\underbrace{\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_{n^*}}}{g_{\text{SP}} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_{n^*}}}{g_{\text{R}_{n^*}\text{P}}} \right)}}_{\gamma_{\text{R}_{1,n^*}}}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_{n^*}\text{D}}}{g_{\text{R}_{n^*}\text{P}}} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{g_{\text{SP}}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
&\stackrel{(c)}{=} \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\min \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_{n}\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
&\quad \times \Pr(n^* = n) f_{g_{\text{R}_{n}\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \\
&= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\min \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_{n}\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
&\quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \Pr(\gamma_{\text{R}_{1,i}} < \gamma_{\text{R}_{1,n}}) f_{g_{\text{R}_{n}\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx, \tag{B.1}
\end{aligned}$$

em que, no passo (c), utilizou-se o Teorema da Probabilidade Total [19, cap. 2], que define a probabilidade de ocorrência de um evento A em uma partição do evento B como $\Pr(A) = \sum_{i=1}^k \Pr(A|B_i) \Pr(B_i)$. Ademais, os ganhos de canal g_{SP} e $g_{\text{R}_{n}\text{P}}$, comuns no primeiro e segundo salto, foram descondicionados para que o operador $\min(\cdot, \cdot)$ da expressão possa ser expandido como em (A.2) [20, cap. 6]. Adicionalmente, de acordo com (3.2), o n -ésimo *relay* escolhido ($n^* = n$) é aquele que apresenta a maior SINR recebida nos enlaces do primeiro salto, em comparação com os outros *relays* disponíveis (denotados com o subíndice i). Dessa forma, a expressão em (B.1) pode ser expressa como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) + \Pr \left(\frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_{n}\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right. \\
&\quad \left. - \Pr \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \Pr \left(\frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_{n}\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right] \\
&\quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \Pr(\gamma_{\text{R}_{1,i}} < \gamma_{\text{R}_{1,n}}) f_{g_{\text{R}_{n}\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\stackrel{(d)}{=} \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} \middle| n^* = n \right) \right] \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \Pr \left(\gamma_{R_{1,i}} < \gamma_{R_{1,n}} \right) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
&\quad \times f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dy_n dx \\
&+ \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \underbrace{\left[\Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right]}_{B_1} \\
&\quad \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \Pr \left(\gamma_{R_{1,i}} < \gamma_{R_{1,n}} \right) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
&\quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx \\
&- \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \underbrace{\left[\Pr \left(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} \middle| n^* = n \right) \Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right]}_{B_2} \\
&\quad \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \Pr \left(\gamma_{R_{1,i}} < \gamma_{R_{1,n}} \right) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
&\quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx, \tag{B.2}
\end{aligned}$$

em que, no passo (d), separou-se cada termo da expressão, oriundos da manipulação do operador $\min(\cdot, \cdot)$ em (B.1); isolou-se g_{R_nD} ; descondicionou-se em relação a g_{SD} nas integrais mais externas, e descondicionou-se em relação a g_{R_iP} na integral interna ao produto. De (B.2), observa-se que para os termos B_1 e B_2 , o evento de *outage* pode ocorrer para $z < x\gamma_{th}/\eta_1\gamma_I$, sendo que para valores de z maiores que este, o ganho do canal g_{R_nD} teria que ser menor que uma grandeza negativa, o que é improvável, já que o mesmo é sempre positivo. Portanto, tem-se que $\Pr \left(g_{R_nD} < y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right) / \gamma_I (1 - \eta_1) \right) = 0$. Logo, a expressão da probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
P_{out} &= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} \middle| n^* = n \right) \right] \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \Pr \left(\gamma_{R_{1,i}} < \gamma_{R_{1,n}} \right) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
&\quad \times f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dy_n dx \\
&+ \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[\Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right] \\
&\quad \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \Pr \left(\gamma_{R_{1,i}} < \gamma_{R_{1,n}} \right) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
&\quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx \\
&- \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[\Pr \left(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} \middle| n^* = n \right) \Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \Pr(\gamma_{R_{1,i}} < \gamma_{R_{1,n}}) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
& \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RnP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx \\
& = \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} | n^* = n) \right] \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(\gamma_{R_{1,n}}) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
& \times f_{g_{RnP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dy_n dx \\
& + \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[\Pr\left(g_{RnD} < \frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \middle| n^* = n\right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(\gamma_{R_{1,n}}) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
& \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RnP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx \\
& - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[\Pr(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} | n^* = n) \Pr\left(g_{RnD} < \frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \middle| n^* = n\right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(\gamma_{R_{1,n}}) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
& \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RnP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx \\
& = \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left[F_{\gamma_{R_{1,n}}}(\gamma_{th}) \right] \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(u) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] f_{\gamma_{R_{1,n}}}(u) f_{g_{RnP}}(y_n) \\
& \times f_{g_{SP}}(x) du dy_n dx \\
& + \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \int_0^\infty \left[F_{g_{RnD}}\left(\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)}\right) \right] \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(u) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
& \times f_{\gamma_{R_{1,n}}}(u) f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RnP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) du dz dy_n dx \\
& - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \int_0^\infty \left[F_{\gamma_{R_{1,n}}}(\gamma_{th}) F_{g_{RnD}}\left(\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)}\right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(u) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
& \times f_{\gamma_{R_{1,n}}}(u) f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RnP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) du dz dy_n dx. \tag{B.3}
\end{aligned}$$

Assumindo que os coeficientes de canal são independentes e identicamente distribuídos, os produtórios e somatórios em (B.3) podem ser expressos como potência e multiplicação de seus fatores, respectivamente, já que as variáveis aleatórias que representam cada canal podem ser consideradas instâncias independentes de uma mesma distribuição. Portanto,

de (B.3), tem-se que

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} = & N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{\text{th}}} \left[\int_0^\infty F_{\gamma_{\text{R}_1}}(u) f_{g_{\text{RP}}}(y_i) dy_i \right]^{N-1} f_{\gamma_{\text{R}_1}}(u) f_{g_{\text{RP}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) du dy_n dx \\
& + N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}} \int_0^\infty \left[F_{g_{\text{RD}}} \left(\frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \right) \right] \left[\int_0^\infty F_{\gamma_{\text{R}_1}}(u) f_{g_{\text{RP}}}(y_i) dy_i \right]^{N-1} \\
& \quad \times f_{\gamma_{\text{R}_1}}(u) f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{RP}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) du dz dy_n dx \\
& - N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}} \int_0^{\gamma_{\text{th}}} \left[F_{g_{\text{RD}}} \left(\frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \right) \right] \left[\int_0^\infty F_{\gamma_{\text{R}_1}}(u) f_{g_{\text{RP}}}(y_i) dy_i \right]^{N-1} \\
& \quad \times f_{\gamma_{\text{R}_1}}(u) f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{RP}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) du dz dy_n dx, \tag{B.4}
\end{aligned}$$

em que a CDF de g_{RD} é dada em (A.7). As PDFs de g_{RP} , g_{SD} e g_{SP} são expressas em (A.9) – (A.11), respectivamente. Ademais, faz-se necessário o cálculo da CDF e da PDF de γ_{R_1} , em que a CDF pode ser obtida por

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{\text{R}_1}}(u) &= \Pr(\gamma_{\text{R}_1} < u) \\
&= \Pr \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}}}{y} \right)} < u \right) \\
&= \Pr \left[g_{\text{SR}} < \frac{xu}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}}}{y} \right) \right] \\
&= \int_0^\infty F_{g_{\text{SR}}} \left[\frac{xu}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}}}{y} \right) \right] f_{g_{\text{SI}}}(w) dw \\
&= 1 - \frac{\eta_1 y \Omega_{\text{SR}} e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{\text{SR}}}}}{\eta_1 y \Omega_{\text{SR}} - (\eta_1 - 1) ux \Omega_{\text{SI}}}, \tag{B.5}
\end{aligned}$$

e a PDF por

$$\begin{aligned}
f_{\gamma_{\text{R}_1}}(u) &= \frac{dF_{\gamma_{\text{R}_1}}(u)}{du} \\
&= \frac{xy e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{\text{SR}}}} (\eta_1 \Omega_{\text{SR}} (y - \gamma_I (\eta_1 - 1) \Omega_{\text{SI}}) - (\eta_1 - 1) ux \Omega_{\text{SI}})}{\gamma_I ((\eta_1 - 1) ux \Omega_{\text{SI}} - \eta_1 y \Omega_{\text{SR}})^2}. \tag{B.6}
\end{aligned}$$

Substituindo (A.7), (A.9)–(A.11), (B.5) e (B.6) em (B.4), após algumas simplificações matemáticas, obtém-se uma expressão para a probabilidade de *outage* assintótica do sistema, usando o esquema PRS-1H, como apresentada em (4.7).

C. PROBABILIDADE DE *OUTAGE* - CRITÉRIO PRS-2H

Prova da Proposição 3

Neste apêndice, deriva-se uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica de uma rede cooperativa-cognitiva FD-DF com compartilhamento espectral do tipo *underlay* e seleção parcial de *relay* baseada nos enlaces do segundo salto. No esquema considerado, o evento de *outage* ocorre quando a SNR fim-a-fim recebida, γ , está abaixo de um dado limiar γ_{th} . Portanto, a probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_{\text{SR}_{n^*}}}{1 + \gamma_{\text{SI}_{n^*}}}, \gamma_{\text{R}_{n^*}\text{D}} + \gamma_{\text{SD}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
&= \Pr \left[\min \left(\underbrace{\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_{n^*}}}{g_{\text{SP}} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_{n^*}}}{g_{\text{R}_{n^*}\text{P}}} \right)}}_{\gamma_{\text{R}_{1,n^*}}}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_{n^*}\text{D}}}{g_{\text{R}_{n^*}\text{P}}} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{g_{\text{SP}}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
&\stackrel{(e)}{=} \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\min \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
&\quad \times \Pr(n^* = n) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \\
&= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\min \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
&\quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \Pr \left(g_{\text{R}_i\text{D}} < \frac{g_{\text{R}_i\text{P}} g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx, \quad (\text{C.1})
\end{aligned}$$

em que, no passo (e), utilizou-se o Teorema da Probabilidade Total [19, cap. 2], que define a probabilidade de ocorrência de um evento A em uma partição do evento B como $\Pr(A) = \sum_{i=1}^k \Pr(A|B_i) \Pr(B_i)$. Ademais, os ganhos de canal g_{SP} e $g_{\text{R}_n\text{P}}$, comuns no primeiro e segundo salto, foram descondicionados para que o operador $\min(\cdot, \cdot)$ da expressão possa ser expandido como em (A.2) [20, cap. 6]. Adicionalmente, de acordo com (3.3), o n -ésimo *relay* escolhido ($n^* = n$) é aquele que apresenta a maior SNR recebida nos enlaces do segundo salto, em comparação com os outros *relays* disponíveis (denotados com o subíndice i). Dessa forma, a expressão em (C.1) pode ser expressa como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) + \Pr \left(\frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right. \\
&\quad \left. - \Pr \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \Pr \left(\frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right] \\
&\quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \Pr \left(g_{\text{R}_i\text{D}} < \frac{g_{\text{R}_i\text{P}} g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \stackrel{(f)}{=} \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} \middle| n^* = n \right) \right] \\
& \quad \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left(g_{R_iD} < \frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{R_nD}}(v) f_{g_{R_iP}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \quad \times f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dy_n dx \\
& + \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \underbrace{\left[\Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right]}_{C_1} \\
& \quad \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left(g_{R_iD} < \frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{R_nD}}(v) f_{g_{R_iP}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx \\
& - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \underbrace{\left[\Pr \left(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} \middle| n^* = n \right) \Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right]}_{C_2} \\
& \quad \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left(g_{R_iD} < \frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{R_nD}}(v) f_{g_{R_iP}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx, \tag{C.2}
\end{aligned}$$

em que, no passo (f), separou-se cada termo da expressão, oriundos da manipulação do operador $\min(\cdot, \cdot)$ em (C.1); isolou-se g_{R_nD} e g_{R_iD} ; descondicionou-se em relação a g_{SD} nas integrais mais externas, e descondicionou-se em relação a g_{R_iP} e g_{R_nD} na integral interna ao produtório. De (C.2), observa-se que para os termos C_1 e C_2 , o evento de *outage* pode ocorrer para $z < x\gamma_{th}/\eta_1\gamma_I$, sendo que para valores de z maiores que este, o ganho do canal g_{R_nD} teria que ser menor que uma grandeza negativa, o que é improvável, já que o mesmo é sempre positivo. Portanto, tem-se que $\Pr \left(g_{R_nD} < y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right) / \gamma_I (1 - \eta_1) \right) = 0$. Logo, a expressão da probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
P_{out} &= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(\gamma_{R_{1,n}} < \gamma_{th} \middle| n^* = n \right) \right] \\
& \quad \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left(g_{R_iD} < \frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{R_nD}}(v) f_{g_{R_iP}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \quad \times f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dy_n dx \\
& + \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[\Pr \left(g_{R_nD} < \frac{y_n \left(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left(g_{\text{R}_i\text{D}} < \frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{D}}}(v) f_{g_{\text{R}_i\text{P}}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dy_n dx \\
& - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}} \left[\Pr \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \Pr \left(g_{\text{R}_n\text{D}} < \frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left(g_{\text{R}_i\text{D}} < \frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{D}}}(v) f_{g_{\text{R}_i\text{P}}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dy_n dx \\
& = \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{\text{R}_i\text{D}}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{D}}}(v) f_{g_{\text{R}_i\text{P}}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \times f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \\
& + \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}} \left[\Pr \left(g_{\text{R}_n\text{D}} < \frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{\text{R}_i\text{D}}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{D}}}(v) f_{g_{\text{R}_i\text{P}}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dy_n dx \\
& - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}} \left[\Pr \left(\gamma_{\text{R}_{1,n}} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \Pr \left(g_{\text{R}_n\text{D}} < \frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{\text{R}_i\text{D}}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{D}}}(v) f_{g_{\text{R}_i\text{P}}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dy_n dx \\
& = \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[F_{\gamma_{\text{R}_{1,n}}}(\gamma_{\text{th}}) \right] \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{\text{R}_i\text{D}}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{D}}}(v) f_{g_{\text{R}_i\text{P}}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \times f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \\
& + \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{\text{th}}}{\eta_1 \gamma_I}} \left[F_{g_{\text{R}_n\text{D}}} \left(\frac{y_n \left(\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right)}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{\text{R}_i\text{D}}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{\text{R}_n\text{D}}}(v) f_{g_{\text{R}_i\text{P}}}(y_i) dv dy_i \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx \\
& - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[F_{\gamma_{R_1,n}}(\gamma_{th}) F_{g_{R_nD}} \left(\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \right) \right] \\
& \times \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{R_iD}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{R_nD}}(v) f_{g_{R_iP}}(y_i) dv dy_i \right] \\
& \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx. \tag{C.3}
\end{aligned}$$

Assumindo que os coeficientes de canal são independentes e identicamente distribuídos, os produtórios e somatórios em (C.3) podem ser expressos como potência e multiplicação de seus fatores, respectivamente, já que as variáveis aleatórias que representam cada canal podem ser consideradas instâncias independentes de uma mesma distribuição. Portanto, de (C.3), tem-se que

$$\begin{aligned}
P_{out} &= N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[F_{\gamma_{R_1}}(\gamma_{th}) \right] \left[\int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{RD}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{RD}}(v) f_{g_{RP}}(y_i) dv dy_i \right]^{N-1} \\
& \quad \times f_{g_{RP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dy_n dx \\
& + N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[\int_0^\infty \int_0^{\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)}} F_{g_{RD}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{RD}}(v) f_{g_{RP}}(y_i) dv dy_i \right]^{N-1} \\
& \quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx \\
& - N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[F_{\gamma_{R_1}}(\gamma_{th}) \right] \left[\int_0^\infty \int_0^{\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)}} F_{g_{RD}} \left(\frac{y_i v}{y_n} \right) f_{g_{RD}}(v) f_{g_{RP}}(y_i) dv dy_i \right]^{N-1} \\
& \quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dy_n dx, \tag{C.4}
\end{aligned}$$

em que as CDFs de g_{RD} e γ_{R_1} são expressas em (A.7) e (B.5), respectivamente, e a PDF de g_{RD} é dada por

$$f_{g_{RD}}(v) = \frac{1}{\Omega_{RD}} e^{-\frac{v}{\Omega_{RD}}}. \tag{C.5}$$

As PDFs de g_{RP} , g_{SD} e g_{SP} são expressas em (A.9)–(A.11), respectivamente. Substituindo (A.7), (A.9)–(A.11), (B.5) e (C.5) em (C.4), após algumas simplificações matemáticas, obtém-se uma expressão para a probabilidade de *outage* assintótica do sistema, usando o esquema PRS-2H, como apresentada em (4.8).

D. PROBABILIDADE DE *OUTAGE* - CRITÉRIO PRS-SI

Prova da Proposição 4

Neste apêndice, deriva-se uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica de uma rede cooperativa-cognitiva FD-DF com compartilhamento espectral do tipo *underlay* e seleção parcial de *relay* baseada nos enlaces de auto interferência. No esquema considerado, o evento de *outage* ocorre quando a SNR fim-a-fim recebida, γ , está abaixo de um dado limiar γ_{th} . Portanto, a probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_{\text{SR}_{n^*}}}{1 + \gamma_{\text{SI}_{n^*}}}, \gamma_{\text{R}_{n^*}\text{D}} + \gamma_{\text{SD}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
&= \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_{n^*}}}{g_{\text{SP}} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_{n^*}}}{g_{\text{R}_{n^*}\text{P}}} \right)}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_{n^*}\text{D}}}{g_{\text{R}_{n^*}\text{P}}} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{g_{\text{SP}}} \right) < \gamma_{\text{th}} \right] \\
&\stackrel{(g)}{=} \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right)}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
&\quad \times \Pr (n^* = n) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \\
&= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right)}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
&\quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \Pr (\gamma_{\text{SI}_i} < \gamma_{\text{SI}_i}) f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \\
&= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right)}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
&\quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N [1 - \Pr (\gamma_{\text{SI}_i} < \gamma_{\text{SI}_i})] f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \\
&= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\min \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right)}, \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n\text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} \right) < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right] \\
&\quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \left[1 - \Pr \left(g_{\text{SI}_i} < \frac{g_{\text{R}_i\text{P}} g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right) \right] f_{g_{\text{R}_n\text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \tag{D.1}
\end{aligned}$$

em que, no passo (g), utilizou-se o Teorema da Probabilidade Total [19, cap. 2], que define a probabilidade de ocorrência de um evento A em uma partição do evento B como $\Pr(A) = \sum_{i=1}^k \Pr(A|B_i) \Pr(B_i)$. Ademais, os ganhos de canal g_{SP} e $g_{\text{R}_n\text{P}}$, comuns no primeiro e segundo salto, foram descondicionados para que o operador $\min(\cdot, \cdot)$ da expressão

possa ser expandido como em (A.2) [20, cap. 6]. Adicionalmente, de acordo com (3.4), o n -ésimo *relay* escolhido ($n^* = n$) é aquele que apresenta a menor SNR recebida nos enlaces de auto interferência, em comparação com os outros *relays* disponíveis (denotados com o subíndice i). Dessa forma, a expressão em (D.1) pode ser expressa como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right)} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \right. \\
&\quad + \Pr \left(\frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n \text{D}}}{y_n} \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \\
&\quad - \Pr \left(\frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SR}_n}}{x \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right)} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \\
&\quad \times \Pr \left(\frac{\gamma_I (1 - \eta_1) g_{\text{R}_n \text{D}}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{\text{SD}}}{x} < \gamma_{\text{th}} \middle| n^* = n \right) \Big] \\
&\quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \left[1 - \Pr \left(g_{\text{SI}_i} < \frac{g_{\text{R}_i \text{P}} g_{\text{SI}_n}}{y_n} \right) \right] f_{g_{\text{R}_n \text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dy_n dx \\
&\stackrel{(h)}{=} \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr \left(g_{\text{SR}_n} < \frac{x \gamma_{\text{th}}}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} \right) \middle| n^* = n \right) \right] \\
&\quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - \Pr \left(g_{\text{SI}_i} < \frac{y_i w}{y_n} \right) \right] f_{g_{\text{R}_i \text{P}}}(y_i) dy_i \right\} \\
&\quad \times f_{g_{\text{SI}_n}}(w) f_{g_{\text{R}_n \text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dw dy_n dx \\
&\quad + \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \underbrace{\left[\Pr \left(g_{\text{R}_n \text{D}} < \frac{y_n (\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \right]}_{D_1} \\
&\quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - \Pr \left(g_{\text{SI}_i} < \frac{y_i w}{y_n} \right) \right] f_{g_{\text{R}_i \text{P}}}(y_i) dy_i \right\} \\
&\quad \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{SI}_n}}(w) f_{g_{\text{R}_n \text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dw dy_n dx \\
&\quad - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \underbrace{\left[\Pr \left(g_{\text{SR}_n} < \frac{x \gamma_{\text{th}}}{\gamma_I \eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I (1 - \eta_1) w}{y_n} \right) \middle| n^* = n \right) \right.} \\
&\quad \times \Pr \left(g_{\text{R}_n \text{D}} < \frac{y_n (\gamma_{\text{th}} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I (1 - \eta_1)} \middle| n^* = n \right) \Big]}_{D_2} \\
&\quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - \Pr \left(g_{\text{SI}_i} < \frac{y_i w}{y_n} \right) \right] f_{g_{\text{R}_i \text{P}}}(y_i) dy_i \right\} \\
&\quad \times f_{g_{\text{SD}}}(z) f_{g_{\text{SI}_n}}(w) f_{g_{\text{R}_n \text{P}}}(y_n) f_{g_{\text{SP}}}(x) dz dw dy_n dx, \quad (\text{D.2})
\end{aligned}$$

em que, no passo (h), separou-se cada termo da expressão, oriundos da manipulação do operador $\min(\cdot, \cdot)$ em (D.1); isolou-se g_{R_nD} e g_{SR_n} ; descondicionou-se em relação a g_{SD} e g_{SI_n} nas integrais mais externas, e descondicionou-se em relação a g_{R_iP} na integral interna ao produtório. De (D.2), observa-se que para os termos D_1 e D_2 , o evento de *outage* pode ocorrer para $z < x\gamma_{th}/\eta_1\gamma_I$, sendo que para valores de z maiores que este, o ganho do canal g_{R_nD} teria que ser menor que uma grandeza negativa, o que é improvável, já que o mesmo é sempre positivo. Portanto, tem-se que $\Pr(g_{R_nD} < y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})/\gamma_I(1 - \eta_1)) = 0$. Logo, a expressão da probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\Pr\left(g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1 - \eta_1)w}{y_n}\right) \middle| n^* = n\right) \right. \\
&\quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - \Pr\left(g_{SI_i} < \frac{y_i w}{y_n}\right)\right] f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right\} \\
&\quad \times f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dw dy_n dx \\
&+ \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[\Pr\left(g_{R_nD} < \frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1 - \eta_1)} \middle| n^* = n\right) \right. \\
&\quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - \Pr\left(g_{SI_i} < \frac{y_i w}{y_n}\right)\right] f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right\} \\
&\quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dw dy_n dx \\
&- \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[\Pr\left(g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1 - \eta_1)w}{y_n}\right) \middle| n^* = n\right) \right. \\
&\quad \times \Pr\left(g_{R_nD} < \frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1 - \eta_1)} \middle| n^* = n\right) \\
&\quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - \Pr\left(g_{SI_i} < \frac{y_i w}{y_n}\right)\right] f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right\} \\
&\quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dz dw dy_n dx \\
&= \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left[F_{g_{SR_n}}\left(\frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1 - \eta_1)w}{y_n}\right)\right) \right] \\
&\quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - F_{g_{SI_i}}\left(\frac{y_i w}{y_n}\right)\right] f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right\} \\
&\quad \times f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dw dy_n dx \\
&+ \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[F_{g_{R_nD}}\left(\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1 - \eta_1)}\right) \right] \\
&\quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - F_{g_{SI_i}}\left(\frac{y_i w}{y_n}\right)\right] f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times f_{g_{SD}}(z)f_{g_{SI_n}}(w)f_{g_{R_nP}}(y_n)f_{g_{SP}}(x)dzdwdy_ndx \\
& - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[F_{g_{SR_n}} \left(\frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \right) F_{g_{RD}} \left(\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \right) \right] \\
& \times \left\{ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \int_0^\infty \left[1 - F_{g_{SI_i}} \left(\frac{y_i w}{y_n} \right) \right] f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right\} \\
& \times f_{g_{SD}}(z)f_{g_{SI_n}}(w)f_{g_{R_nP}}(y_n)f_{g_{SP}}(x)dzdwdy_ndx. \tag{D.3}
\end{aligned}$$

Assumindo que os coeficientes de canal são independentes e identicamente distribuídos, os produtórios e somatórios em (D.3) podem ser expressos como potência e multiplicação de seus fatores, respectivamente, já que as varáveis aleatórias que representam cada canal podem ser consideradas instâncias independentes de uma mesma distribuição. Portanto, de (D.3), tem-se que

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} = & N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left[F_{g_{SR}} \left(\frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \right) \right] \\
& \times \left\{ \int_0^\infty \left[1 - F_{g_{SI}} \left(\frac{y_i w}{y_n} \right) \right] f_{g_{RP}}(y_i) dy_i \right\}^{N-1} \\
& \times f_{g_{SI}}(w)f_{g_{RP}}(y_n)f_{g_{SP}}(x)dwdy_ndx \\
& + N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[F_{g_{RD}} \left(\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \right) \right] \\
& \times \left\{ \int_0^\infty \left[1 - F_{g_{SI}} \left(\frac{y_i w}{y_n} \right) \right] f_{g_{RP}}(y_i) dy_i \right\}^{N-1} \\
& \times f_{g_{SD}}(z)f_{g_{SI}}(w)f_{g_{RP}}(y_n)f_{g_{SP}}(x)dzdwdy_ndx \\
& - N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I}} \left[F_{g_{SR}} \left(\frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I\eta_1} \left(1 + \frac{\gamma_I(1-\eta_1)w}{y_n} \right) \right) F_{g_{RD}} \left(\frac{y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I\eta_1 z}{x})}{\gamma_I(1-\eta_1)} \right) \right] \\
& \times \left\{ \int_0^\infty \left[1 - F_{g_{SI}} \left(\frac{y_i w}{y_n} \right) \right] f_{g_{RP}}(y_i) dy_i \right\}^{N-1} \\
& \times f_{g_{SD}}(z)f_{g_{SI}}(w)f_{g_{RP}}(y_n)f_{g_{SP}}(x)dzdwdy_ndx, \tag{D.4}
\end{aligned}$$

em que a CDF de g_{SI} é dada por

$$F_{g_{SI}} \left(\frac{y_i w}{y_n} \right) = 1 - e^{-\frac{wy_i}{y_n\Omega_{SI}}}. \tag{D.5}$$

As CDFs de g_{SR} e g_{RD} são expressas em (A.6) e (A.7), respectivamente. As PDFs de g_{SI} , g_{RP} , g_{SD} e g_{SP} são expressas em (A.8)–(A.11), respectivamente. Substituindo (A.6)–(A.11) e (D.5) em (D.4), após algumas simplificações matemáticas, obtém-se uma expressão para a probabilidade de *outage* assintótica do sistema, usando o esquema PRS-SI, como apresentada em (4.9).

REFERÊNCIAS

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*, 3rd ed. Academic Press, 2016.
- [2] “Global mobile data traffic forecast update, 2014-2019,” White Paper, Cisco, Feb. 2015. [Online]. Available: www.cisco.com.
- [3] C. X. Wang, F. Haider, X. Gao, X. H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. M. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, “Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2014.
- [4] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, “Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, Thirdquarter 2016.
- [5] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [6] Y. Yang, H. Hu, J. Xu, and G. Mao, “Relay technologies for WiMAX and LTE-Advanced mobile systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 10, pp. 100–105, Oct. 2009.
- [7] C. Hoymann, W. Chen, J. Montojo, A. Golitschek, C. Koutsimanis, and X. Shen, “Relaying operation in 3GPP LTE: Challenges and solutions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. 156–162, Feb. 2012.
- [8] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [9] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [10] E. E. B. Olivo, D. P. M. Osorio, H. Alves, J. C. S. S. Filho, and M. Latva-aho, “An adaptive transmission scheme for cognitive decode-and-forward relaying networks: Half duplex, full duplex, or no cooperation,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 8, pp. 5586–5602, Aug. 2016.
- [11] J. Laneman, D. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.

- [12] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of phy and mac layers," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2017–2046, Fourthquarter 2015.
- [13] M. Soysa, H. A. Suraweera, C. Tellambura, and H. K. Garg, "Partial and opportunistic relay selection with outdated channel estimates", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 3, pp. 840–850, Mar. 2012.
- [14] N. Yang, M. El Kashlan, and J. Yuan, "Outage probability of multiuser relay networks in Nakagami- m fading channels", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 2120–2132, Jun. 2010.
- [15] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894–914, May 2009.
- [16] Y. Deng, K. J. Kim, T. Q. Duong, M. El Kashlan, G. K. Karagiannidis and A. Nallanathan, "Full-duplex spectrum sharing in cooperative single carrier systems," *IEEE Trans. Cognitive Commun. and Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 68-82, March 2016.
- [17] M. G. Khafagy, M. Alouini and S. Aïssa, "Full-Duplex Relay Selection in Cognitive Underlay Networks," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 66, no. 10, pp. 4431-4443, Oct. 2018.
- [18] B. Zhong and Z. Zhang, "Opportunistic Two-Way Full-Duplex Relay Selection in Underlay Cognitive Networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 725-734, March 2018.
- [19] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, 9th ed. Boston, MA, USA: Prentice Hall, 2012.
- [20] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.