

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

JOSÉ CARLOS MARCOLINO JÚNIOR

**Desempenho de Redes Cooperativas do tipo Full Duplex e Amplifica-e-Encaminha com
Diversidade Multiusuário e Transferência Sem Fio Simultânea de Informação e Potência**

São João da Boa Vista

2020

José Carlos Marcolino Júnior

Desempenho de Redes Cooperativas do tipo Full Duplex e Amplifica-e-Encaminha com Diversidade Multiusuário e Transferência Sem Fio Simultânea de Informação e Potência

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

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

São João da Boa Vista

2020

Marcolino Júnior, José Carlos

Desempenho de redes cooperativas do tipo full duplex e amplifica-e-encaminha com diversidade multiusuário e transferência sem fio simultânea de informação e potência / José Carlos Marcolino Júnior -- São João da Boa Vista, 2020.

37 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado - Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista.

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"
CAMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESEMPENHO DE REDES COOPERATIVAS DO TIPO FULL DUPLEX E
AMPLIFICA-E-ENCAMINHA COM DIVERSIDADE MULTIUSUÁRIO E
TRANSFERÊNCIA SEM FIO SIMULTÂNEA DE INFORMAÇÃO E POTÊNCIA**

Aluno: José Carlos Marcolino Júnior
Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Banca Examinadora:
- Edgar Eduardo Benitez Olivo (Orientador)
- Jozué Vieira Filho (Examinador)
- Rafael Abrantes Penchel (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno
(Expediente nº 15/2019)

São João da Boa Vista, 09 de setembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Carlos e Maria Aparecida, por além de todo o amor e educação que me deram, o apoio que recebi nessa empreitada universitária, sem o qual não conseguiria realizar nada. Contar com esse refúgio me permitiu tirar forças das quais eu não sabia que tinha para trilhar esse caminho. Aos meus irmãos, João Victor e Vinícius, que junto com meus pais sempre foram compreensivos com minha escolha e me apoiaram nesse caminho, nenhuma palavra descreve o quão abençoado me sinto por ter uma família que sempre me incentivou e apoiou, enquanto muitos casos em que ocorre o contrário acaba acontecendo.

Agradeço também ao meu orientador, prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo, por todo o apoio desde a iniciação científica. Com sua inabalável paciência e disposição em me explicar as dúvidas, tão frequentes. Especialmente nessa reta final, em que as circunstâncias se tornaram desfavoráveis e acabei me desmotivando várias vezes, o prof. Edgar conseguiu me levantar e me colocar no rumo novamente.

“Per aspera ad astra”

RESUMO

Neste trabalho é realizada uma análise do desempenho em termos da probabilidade de *outage* para uma rede cooperativa de duplo salto composta por uma fonte, múltiplos retransmissores capazes de captar energia a partir de sinais de radiofrequência e múltiplos destinos. Considera-se que os enlaces de transmissão direta entre a fonte e os destinos estão disponíveis e, portanto, a comunicação entre esses nós pode ser realizada tanto por meio desses enlaces diretos quanto pelos enlaces de retransmissão. Considera-se ainda que os retransmissores operam em modo full duplex e com o protocolo de retransmissão sendo o amplifica-e-encaminha de ganho variável. Neste esquema de comunicação, considera-se a seleção de um destino e um retransmissor para a transmissão das mensagens da fonte, que é realizada por etapas, baseada nos estados de canal, sendo escolhido inicialmente um destino e posteriormente, o retransmissor que maximiza o sinal recebido por esse destino. Na recepção, o destino usa um esquema de seleção entre o sinal proveniente do enlace de transmissão direta e aquele proveniente do enlace de retransmissão. Este estudo caracteriza primeiramente o modelo de sinais, desenvolvido com a finalidade de se obter uma expressão analítica para a relação sinal-ruído fim-a-fim do sistema e a partir desta, realiza-se uma análise matemática para a obtenção de uma expressão analítica assintótica da probabilidade de *outage*, a fim de caracterizar o desempenho do sistema. Os resultados obtidos indicam que a ordem de diversidade obtida pelo sistema é igual ao número de destinos, com os retransmissores não fornecendo ganho de diversidade, devido ao fenômeno de autointerferência inerente ao modo de retransmissão full duplex. Porém, o uso de retransmissores apresenta melhor desempenho no regime de baixa relação sinal-ruído, onde o efeito da autointerferência não se manifesta de forma mais severa.

PALAVRAS-CHAVE: amplifica-e-encaminha, diversidade cooperativa, diversidade multiusuário, probabilidade de *outage*, retransmissão full duplex, transferência sem fio simultânea de informação e potência.

ABSTRACT

In this work, a performance analysis in terms of the outage probability for a cooperative network consisting of one source, multiple relays capable of harvesting energy from radiofrequency signals, and multiple destinations is performed. The direct links between the source and destinations are assumed to be available, so that the communication between these nodes can be accomplished through these links as well as through the relaying links. It is also considered that the relays operate in full-duplex mode and with the variable-gain amplify-and-forward protocol. In this communication scheme, the selection of a destination and a relay for the transmission of messages from the source is considered, which is carried out in stages, based on the channel states, initially choosing a destination, and then, the relay that maximizes the signal received by the selected destination. At reception, the destination uses a selection scheme between the signal coming from the direct-transmission link and that coming from the relaying link. This study first characterizes the signal model, developed with the purpose of obtaining an analytical expression for the end-to-end signal-to-noise ratio (SNR) of the system, and, from this expression, a mathematical analysis is performed to obtain an asymptotic analytical expression to characterize the system performance. The obtained results show that the diversity order attained by the system is equal to the number of destinations, while the relays do not provide diversity gain, due to the self-interference phenomenon inherent to the full-duplex relaying mode. However, the use of relays allows for a better performance in low SNR, where the effect of self-interference is not too severe.

KEYWORDS: amplify-and-forward, cooperative diversity, full-duplex relaying, multiuser diversity, outage probability, simultaneous wireless information and power transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Perda de percurso, sombreamento e desvanecimento <i>versus</i> distância.	14
Figura 2	Diversidade espacial na recepção.	16
Figura 3	Exemplo de rede com uso de diversidade multiusuário.	16
Figura 4	Exemplo de rede cooperativa HD.	17
Figura 5	Exemplo de rede cooperativa FD.	18
Figura 6	Diagrama de blocos de um dispositivo de EH genérico.	18
Figura 7	SWIPT por comutação no tempo.	19
Figura 8	SWIPT por divisão de potência.	20
Figura 9	Modelo do Sistema.	21
Figura 10	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR transmitida para diferentes valores de Ω_{RR}	32
Figura 11	Probabilidade de Outage da rede estudada para diferentes valores de K e M . .	32
Figura 12	Probabilidade de <i>Outage</i> para redes HD e FD	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros gerais utilizados para avaliação da rede.	31
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Quinta Geração
SNR	Relação Sinal-Ruído (<i>Sinal-to-Noise Ratio</i>)
AF	Amplifica-e-Encaminha (<i>Amplify-and-Forward</i>)
DF	Decodifica-e-Encaminha (<i>Decode-and-Forward</i>)
FG	Ganho Fixo (<i>Fixed Gain</i>)
CSI	Informação de Estado do Canal (<i>Channel State Information</i>)
VG	Ganho Variável (<i>Variable Gain</i>)
HD	Half Duplex
FD	Full Duplex
EH	Captação de Energia (<i>Energy Harvesting</i>)
RF	Radiofrequência
DC	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)
SWIPT	Transmissão Sem Fio Simultânea de Informação e Potência (<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i>)
TS	Comutação no Tempo (<i>Time Switching</i>)
PS	Divisão de Potência (<i>Power Splitting</i>)
ER	Reciclagem de Energia (<i>Energy Recycling</i>)
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (<i>Multiple Input, Multiple Output</i>)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
SC	Seleção Pura (<i>Selection Combining</i>)
AWGN	Ruído Aditivo Gaussiano Branco (<i>Additive White Gaussian Noise</i>)
PDF	Função Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
CDF	Função Distribuição Acumulada (<i>Cumulative Distribution Function</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Expoente de perda de percurso
P_r	Potência recebida
P_t	Potência transmitida
d_{XY}	Distância entre os nós X e Y
P_{out}	Probabilidade de <i>outage</i>
P_{th}	Limiar de potência que define o evento de <i>outage</i>
γ	SNR recebida instantânea fim-a-fim do sistema
γ_{th}	Limiar de SNR que define o evento de <i>outage</i>
S	Nó fonte
R_k	k -ésimo nó retransmissor
D_m	m -ésimo nó destino
K	Número de retransmissores
M	Número de destinos
ρ	Razão de divisão de potência
η	Fator de eficiência de conversão de energia
h_{XY}	Coefficiente complexo de canal do enlace entre X e Y
Ω_{XY}	Ganho médio de canal do enlace entre X e Y
$E[\cdot]$	Operador de esperança
n_{XY}	Ruído do enlace entre os nós X e Y
N_0	Variância do ruído
P_X	Potência transmitida pelo nó X
$\bar{\gamma}$	SNR transmitida média pela fonte S
m^*	Índice do destino selecionado
k^*	Índice do retransmissor selecionado para cooperação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	12
1.2	Contribuições e Organização do Trabalho	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Características do Canal Rádio Móvel	14
2.2	Diversidade Multiusuário	16
2.3	Comunicações Cooperativas	16
2.3.1	Protocolos de Retransmissão	16
2.3.2	Modos de Retransmissão	17
2.4	Tecnologias para Aprimoramento da Eficiência Energética em Redes Sem Fio	18
2.4.1	Captação de Energia (EH, <i>Energy Harvesting</i>)	18
2.4.2	Transmissão Sem Fio Simultânea de Informação e Potência	18
2.5	Trabalhos Relacionados	19
3	MODELO DO SISTEMA	21
3.1	Seleção de Destino e Retransmissor	24
3.2	SNR fim-a-fim recebida do sistema	25
4	PROBABILIDADE DE OUTAGE	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
6	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é dada uma breve introdução ao contexto por trás do desenvolvimento trabalho, suas contribuições e sua organização. Na seção 1.1, é apresentado um contexto das redes móveis atuais e a motivação para o desenvolvimento do trabalho. Já na seção 1.2, é feito um destaque das contribuições originais deste trabalho e é dada uma visão geral sobre a organização dos capítulos restantes.

1.1 MOTIVAÇÃO

Com o advento da quinta geração (5G) de comunicações móveis, diversas tecnologias foram e vem sendo desenvolvidas para o cumprimento de todos os seus requisitos. Além da melhoria esperada em relação a taxa de dados de banda larga móvel e suporte a um número maior de conexões, o surgimento de serviços inéditos possibilitados pela nova geração dependerá essencialmente de novas tecnologias, desenvolvidas sob medida para atender essas novas demandas.

Esses novos serviços exigem outras características até então não fornecidas pelas redes atuais, como latências extremamente baixas e conexões com confiabilidade extrema, para aplicações de missão crítica ou eficiência energética e suporte a grande densidade de conexões, como no caso da comunicação entre máquinas [1]. A escassez de espectro também exige o uso de tecnologias para aumento da eficiência espectral, como as comunicações full duplex, e a migração para bandas de frequências mais elevadas, na faixa das ondas milimétricas, o que impacta na propagação do sinal, pois é sujeito a uma atenuação mais severa [2]. Portanto, formas de se fazer frente a estes fenômenos, como a técnica de comunicações cooperativas, são candidatas promissoras para se aumentar a capacidade e confiabilidade da rede [3].

Em suma, o uso combinado de redes cooperativas e tecnologias que visam aumentar tanto a eficiência energética quanto a eficiência espectral da rede é um tópico que tem atraído a atenção da comunidade científica, devido ao potencial para atender aos requisitos das redes 5G e futuras.

1.2 CONTRIBUIÇÕES E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A rede cooperativa estudada neste trabalho, considera o modo de retransmissão full duplex (FD), o protocolo amplifica-e-encaminha de ganho variável (VG-AF, *Variable Gain Amplify-and-Forward*), transferência sem fio simultânea de informação e energia (SWIPT, *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer* por divisão de potência (PS, *Power Splitting*) e a presença do enlace de transmissão direto, para qual o desempenho em termos da probabilidade de *outage* é analisado. A seguir, destacam-se as contribuições deste trabalho:

- O modelo de sinais é desenvolvido com o intuito de se obter uma expressão para a relação sinal-ruído recebida instantânea fim-a-fim do sistema em estudo, e a partir desta chega-se a uma expressão analítica assintótica para a probabilidade de *outage*. Trata-se de uma contribuição

original, que será validada por meio de resultados de simulação obtidos pelo método de Monte Carlo.

- A influência de parâmetros do sistema no desempenho da rede é avaliada, incluindo o ganho médio do canal de autointerferência, número de retransmissores e número de destinos.
- Finalmente, o desempenho da rede em estudo, que opera em modo de retransmissão FD, é confrontado com uma rede cooperativa baseada no modo de retransmissão HD e que utiliza AF-VG, SWIPT por PS e considera os enlaces de transmissão direta.
- O desempenho do sistema é confrontado com curvas de referência com ordem de diversidade (inclinação conhecida), a fim de determinar a ordem de diversidade do sistema sob estudo.

Os capítulos seguintes deste trabalho são organizados da seguinte maneira:

- **Capítulo 2:** São apresentados os conceitos chave necessários para o entendimento do funcionamento da rede.
- **Capítulo 3:** O modelo do sistema considerado é descrito neste capítulo, além do esquema de seleção de retransmissor e seleção de destino. Para o modelo proposto, a relação sinal-ruído recebida instantânea fim-a-fim é apresentada.
- **Capítulo 4:** Neste capítulo é apresentada a expressão analítica assintótica para a probabilidade de *outage* da rede cooperativa estudada.
- **Capítulo 5:** Os resultados numéricos são mostrados neste capítulo, para validação da expressão analítica desenvolvida.
- **Capítulo 6:** Por fim, as conclusões deste trabalho são apresentadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos necessários para o entendimento das tecnologias consideradas neste estudo, bem como a motivação por trás do uso dessas tecnologias. A Seção 2.1 descreve de forma resumida as principais características de propagação do canal rádio móvel, bem como o conceito de probabilidade de *outage*. O uso da diversidade multiusuário como forma alternativa à diversidade na recepção é apresentado na Seção 2.2. O conceito de comunicações cooperativas é apresentado na Seção 2.3, e em suas subseções são apresentados seus conceitos associados, como protocolos e modos de retransmissão. A Seção 2.4 apresenta tecnologias que oferecem ganho de autonomia e eficiência energética para redes sem fio. Uma breve revisão bibliográfica é apresentada na Seção 2.5, com um levantamento de trabalhos relevantes da área.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO CANAL RÁDIO MÓVEL

A propagação das ondas de rádio no meio pode ser caracterizada principalmente pelo efeito de três fenômenos deletérios principais, a perda de percurso, o sombreamento e o desvanecimento. A caracterização desses efeitos adversos e o posterior desenvolvimento de técnicas com a finalidade de se contornar, combater ou amenizar os prejuízos causados por esses fenômenos foi essencial para a popularização e desenvolvimento cada vez mais crescente das comunicações sem fio. A Figura 1 representa os níveis de potência recebida em relação à transmitida em função da distância, com a presença da perda de percurso, do sombreamento e do desvanecimento.

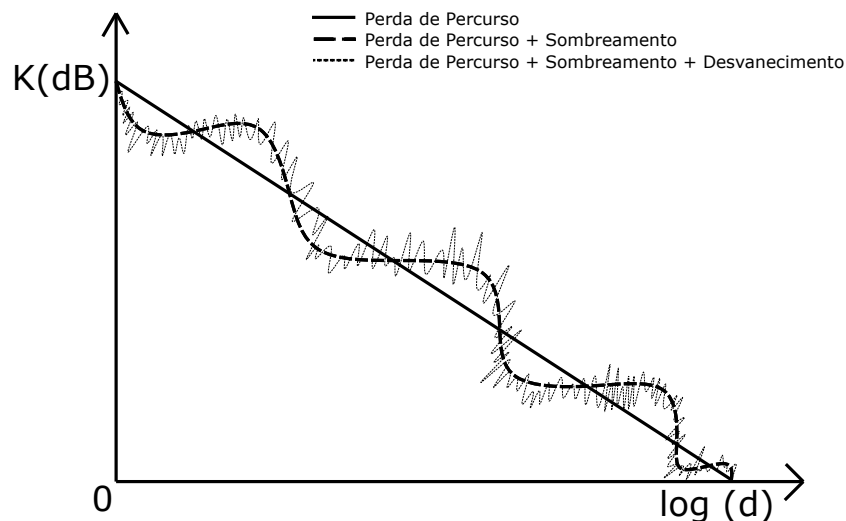


Figura 1 – Perda de percurso, sombreamento e desvanecimento *versus* distância.

fonte: Produção do próprio autor.

A perda de percurso é a perda resultante da própria propagação da onda eletromagnética. É um fenômeno que pode ser modelado de maneira determinística, dado o expoente de perda de percurso α , baseado no grau de urbanização do meio que a onda se propaga. Um modelo simplificado para a

caracterização da perda de percurso é o seguinte

$$P_r = P_t d_{XY}^{-\alpha}, \quad (1)$$

em que P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, d é a distância entre o transmissor e o receptor, e α é o expoente de perda de percurso, que é utilizado para caracterizar os diferentes cenários, com o valor 4 sendo usual para meios urbanos.

O sombreamento é causado pela presença de obstáculos que bloqueiam o caminho do sinal, causando variações aleatórias para uma dada distância. Como para um cálculo analítico seriam necessárias as propriedades elétricas, posições e tamanho de todos os objetos no caminho da onda propagante, geralmente é feito uma modelagem estatística para este fenômeno. Também é chamado de desvanecimento de larga escala, pois sua variação depende dos objetos presentes do meio, que tem dimensões bem maiores em relação ao comprimento de onda do sinal.

O desvanecimento de pequena escala, comumente referido apenas como desvanecimento, se refere a uma variação mais abrupta no sinal, resultante da interferência de múltiplas componentes do sinal vindas dos múltiplos caminhos até o receptor, que podem se somar construtivamente ou destrutivamente gerando grandes alterações em deslocamentos curtos, na ordem do comprimento de onda do sinal. Sua modelagem também é feita de maneira estatística [4, 5].

Com a inclusão de fenômenos físicos modelados de maneira estatística, se faz necessário o uso de métricas para a avaliação do desempenho de uma rede. Uma métrica amplamente aceita como indicador de confiabilidade de uma rede sujeita a desvanecimento é a probabilidade de *outage*, que é definida como a probabilidade da potência recebida ser menor que um determinado limiar alvo, ou seja [5]

$$P_{out} = \Pr[P_r < P_{th}], \quad (2)$$

em que P_{out} é a probabilidade de *outage* e P_{th} é o limiar alvo de potência. A definição em (2) também pode ser expressa em termos de relação sinal-ruído (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*), ao se dividir ambos os lados da desigualdade pela potência do ruído, ou seja

$$P_{out} = \Pr[\gamma < \gamma_{th}], \quad (3)$$

em que γ é a SNR recebida e γ_{th} é o limiar de SNR que define o evento de *outage*. As variáveis P_{th} e γ_{th} podem ser mapeadas para valores de interesse como, por exemplo, a sensibilidade do receptor a uma taxa de erro de bit aceitável.

Devido à natureza aleatória do sinal recebido e seus efeitos adversos, várias técnicas foram e são desenvolvidas para fazer frente ao desvanecimento. Uma técnica usualmente aplicada é o uso de diversidade espacial. Geralmente é empregada através do uso de arranjos de múltiplas antenas adequadamente espaçadas, na transmissão ou na recepção, como ilustrado na Figura 2, para este último caso. Esse espaçamento é projetado de modo que os múltiplos sinais sejam descorrelacionados. Deste modo, esses sinais podem ser combinados de forma a elevar o nível de confiabilidade da rede [4, 5]. Porém, como o uso de múltiplas antenas exige um determinado espaço no receptor, em dispositivos com restrição de espaço, como aparelhos celulares e sensores sem fio, pode ser inviável aplicar as técnicas tradicionais de combinação por diversidade espacial.

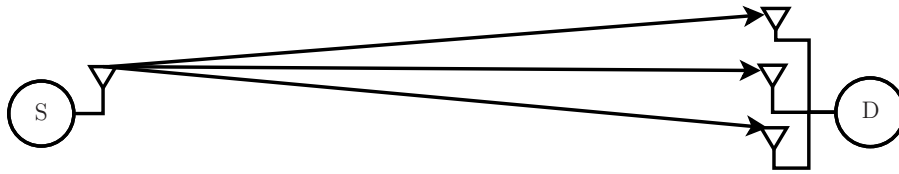


Figura 2 – Diversidade espacial na recepção.
fonte: Produção do próprio autor.

2.2 DIVERSIDADE MULTIUSUÁRIO

Uma outra técnica que busca explorar a diversidade espacial na recepção de maneira distribuída é a diversidade multiusuário, que independe das restrições de espaço inerentes aos métodos tradicionais de arranjo de antenas [6]. A Figura 3 ilustra uma topologia de rede com o uso da diversidade multiusuário. Observa-se que seria necessário um critério para a seleção do destino a cada transmissão da fonte. O resultado é uma rede que emula o arranjo de antenas na recepção de técnicas tradicionais.

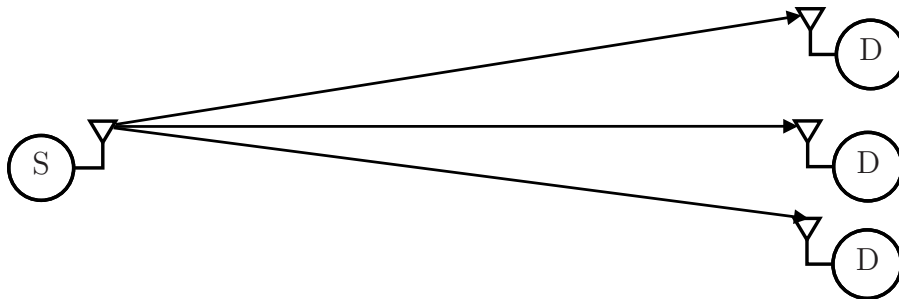


Figura 3 – Exemplo de rede com uso de diversidade multiusuário.
fonte: Produção do próprio autor.

2.3 COMUNICAÇÕES COOPERATIVAS

Com o fim de contornar possíveis restrições espaciais no tamanho dos receptores, a técnica de comunicações cooperativas surge como uma outra alternativa que visa explorar a diversidade espacial de maneira distribuída. De acordo com esta técnica, nós retransmissores dispostos a cooperar auxiliam a fonte, encaminhando a mensagem desejada para o destino. Com um critério apropriado para a seleção de retransmissores, é possível obter a mesma ordem de diversidade observada nas técnicas tradicionais [7]. Como a diversidade explorada não depende das dimensões do transmissor ou receptor, essa técnica é mais flexível, podendo ser aplicada em cenários mais abrangentes, visto que não há o requerimento de espaçamento entre antenas.

2.3.1 Protocolos de Retransmissão

Os protocolos de retransmissão ditam como o retransmissor encaminhará a mensagem para o destino final. São divididos principalmente em duas categorias: amplifica-e-encaminha (AF, *Amplify-and-Forward*) e decodifica e encaminha (DF, *Decode-and-Forward*):

- **Amplifica-e-Encaminha:** de acordo com este protocolo, o retransmissor amplifica o sinal recebido por um ganho e o retransmite, sem nenhum processamento adicional. O protocolo AF

pode ser subdividido quanto ao critério utilizado para determinar o ganho. Caso esse ganho seja um valor fixo, pré-definido no projeto do retransmissor, o protocolo é chamado de Amplifica-e-encaminha de ganho fixo (FG-AF, *Fixed-Gain Amplify-and-Forward*) cego. A mudança do ganho de amplificação com a média da informação de estado do canal (CSI, *Channel State Information*) classifica o protocolo como FG-AF semi-cego. Se o ganho baseia-se na CSI instantânea, é chamado de AF de ganho variável (VG-AF, *Variable Gain Amplify-and-Forward*) [7].

- **Decodifica-e-Encaminha:** um retransmissor que opera sob o protocolo DF irá decodificar o sinal recebido, obtendo a informação vinda do nó fonte e a codificando novamente para retransmiti-la adiante [7]. Este protocolo tem uma implementação mais complexa e requer mais recursos de processamento, porém apresenta o melhor desempenho em termos da probabilidade de *outage* quando comparado ao protocolo AF, apresentando um ganho maior nos regimes de baixa SNR.

A família de protocolos AF é considerada ser de complexidade de implementação mais simples que sua contrapartida DF e, em particular, por apresentar desempenho similar em termos da probabilidade de *outage* no regime de alta SNR, o protocolo VG-AF foi considerado para a rede deste estudo.

2.3.2 Modos de Retransmissão

Existem dois modos de retransmissão em que os retransmissores de uma rede cooperativa podem operar, sendo eles:

- **Half Duplex (HD):** No modo de retransmissão HD, o retransmissor necessita de dois canais ortogonais (intervalos de tempo ou frequências), um exclusivamente para a recepção e outro para a retransmissão do sinal vindo da fonte. Desta maneira, um retransmissor HD necessita do dobro de recursos da rede. Uma topologia de rede cooperativa HD de dois saltos (*dual-hop*) é ilustrada na Figura 4, em que a mesma antena é utilizada para transmissão e recepção em intervalos de tempo distintos.

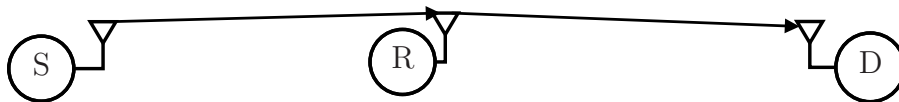


Figura 4 – Exemplo de rede cooperativa HD.

fonte: Produção do próprio autor.

- **Full Duplex (FD):** O modo de retransmissão FD utiliza apenas um canal (mesmo intervalo de tempo e mesma frequência) para a recepção e transmissão simultânea do sinal, efetivamente possuindo o dobro da eficiência espectral do modo HD. Em contrapartida, a retransmissão FD sofre com o fenômeno da autointerferência, uma vez que são necessárias duas antenas no retransmissor, uma para recepção e outra retransmissão, sendo que a antena receptora captará o sinal da própria antena transmissora, como consequência do uso simultâneo do canal. Uma

topologia de rede cooperativa FD de dois saltos é ilustrada na Figura 5, em que o retransmissor possui uma antena para recepção e outra antena para retransmissão e a autointerferência é representada por uma linha tracejada.

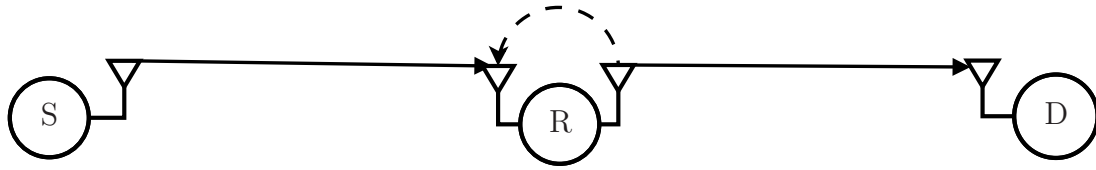


Figura 5 – Exemplo de rede cooperativa FD.
fonte: Produção do próprio autor.

2.4 TECNOLOGIAS PARA APRIMORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES SEM FIO

Com a perspectiva do aumento em escala inédita no número de dispositivos em diversos cenários como a Internet das Coisas (IoT, Internet of Things) e sua inerente limitação energética, o desenvolvimento de tecnologias para extensão de autonomia e aumento da eficiência energética tem ganhado destaque ultimamente. Dentre essas técnicas, vale destacar algumas que vêm demonstrando desempenho promissor e podem ser aplicadas a redes cooperativas.

2.4.1 Captação de Energia (EH, *Energy Harvesting*)

A captação da energia de sinais de radiofrequência (RF) é uma tecnologia que visa obter energia elétrica a partir dos vários sinais de RF que estão presentes no entorno. Um diagrama de um dispositivo de EH genérico é apresentado na Figura 6, onde a partir da recepção, o sinal de RF é convertido em um sinal de corrente contínua (DC, *Direct Current*), e a partir desse ponto pode ser utilizado como fonte de energia útil. Cabe mencionar que dispositivos baseados em EH já estão disponíveis no mercado [8].

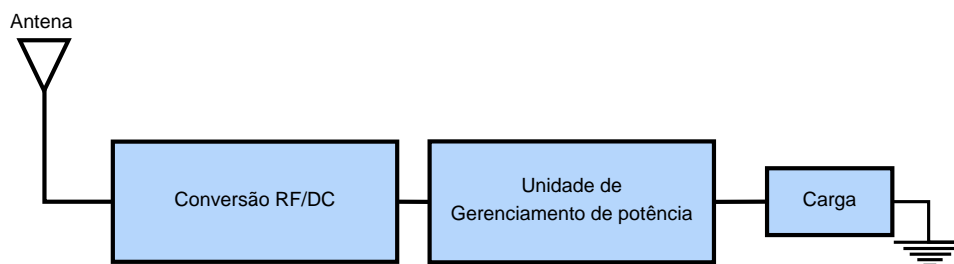


Figura 6 – Diagrama de blocos de um dispositivo de EH genérico.
fonte: Produção do próprio autor.

2.4.2 Transmissão Sem-Fio Simultânea de Informação e Potência (SWIPT, *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*)

Combinando o uso tradicional dos sinais de RF como meio de transmissão de informação com a técnica de EH, a técnica SWIPT busca usufruir das duas utilidades das ondas de RF, sendo uma

solução conveniente para redes sem fio cujos dispositivos são cada vez mais restritos em energia. Aplicando esse conceito a redes cooperativas, é possível definir uma rede em que o retransmissor não receberá somente a informação que será transmitida pela fonte, mas também a energia necessária para encaminhar essa informação ao destino.

A técnica SWIPT geralmente pode ser empregada de duas maneiras principais, sendo divididas pelo método que o receptor separa os sinais de informação e energia: comutação no tempo (TS, *Time Switching*) e divisão de potência (PS, *Power Splitting*).

- **Comutação no Tempo:** A Figura 7 ilustra a técnica SWIPT por meio de TS, onde um bloco de potência P e duração T tem uma porção βT da duração designada para captação de energia, e o restante do bloco, $(1 - \beta)T$ é dedicado ao recebimento da informação. O método SWIPT por TS possui requerimentos de hardware mais simples em relação ao método seguinte.

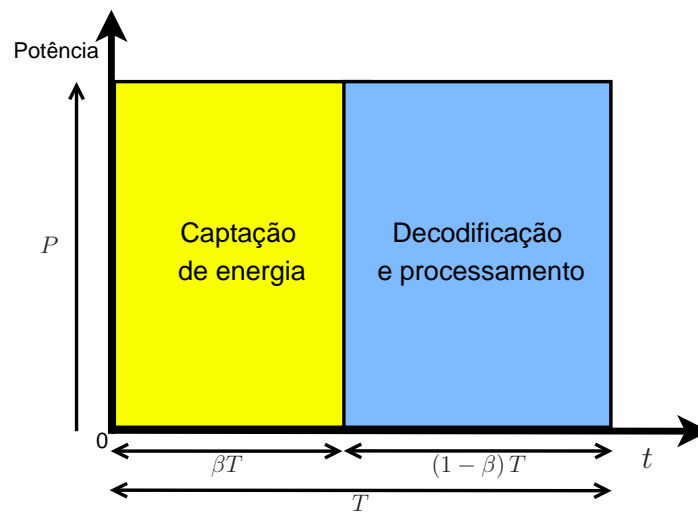


Figura 7 – SWIPT por comutação no tempo.
fonte: Produção do próprio autor.

- **Divisão de Potência:** A Figura 8 ilustra a técnica SWIPT por meio de PS, onde um bloco de potência P e duração T tem uma porção ρP da potência designada para captação de energia, e o restante do potência, $(1 - \rho)P$ é dedicado ao recebimento da informação.

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

A comunidade científica vem desenvolvendo diversos trabalhos sobre o uso de redes cooperativas com uso da técnica SWIPT, pois oferecem a possibilidade de se aumentar a confiabilidade da rede pela exploração da diversidade espacial ao mesmo tempo em que se melhora a eficiência energética de rede. Em [6], avaliou-se o desempenho de uma rede cooperativa HD, com protocolos de retransmissão FG com uso de SWIPT por PS, que também se aproveita da diversidade multiusuário; porém ao considerar o modo HD, a eficiência espectral da rede é comprometida. Já em [9], foi avaliado o desempenho de uma rede cooperativa HD, com protocolo de retransmissão DF e uso de SWIPT por PS, com a presença do enlace de transmissão direta, porém sem considerar múltiplos retransmissores ou múltiplos destinos, que podem levar a ganhos de diversidade. Em [10], foram propostas várias

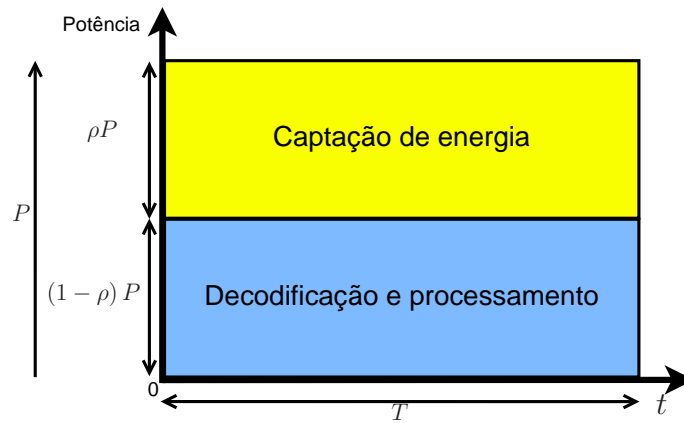


Figura 8 – SWIPT por divisão de potência.
 fonte: Produção do próprio autor.

estratégias de transferência de potência para redes cooperativas com o intuito de se maximizar a taxa de transferência de informação; porém é importante ressaltar que não foi feita a avaliação da confiabilidade da rede. Nos trabalhos [11–13], o conceito de reciclagem de energia (ER, *energy recycling*) foi introduzido, quando um nó da rede que opera em FD utiliza EH para captar a energia de sua autointerferência. Nos trabalhos [11,12], o conceito foi aplicado a redes cooperativas, enquanto em [13] o estudo se realizou em cima das redes MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*). Por fim, o trabalho [14] avaliou o desempenho de uma rede cooperativa com um veículo aéreo não tripulado (VANT) atuando como retransmissor, com otimizações sendo propostas quanto ao fornecimento de energia ao VANT e a eficiência energética da rede.

3 MODELO DO SISTEMA

O modelo do sistema considerado é apresentado na Figura 9, composta por uma fonte (S), um *cluster* de K retransmissores (R_k), para $k = 1, 2, \dots, K$, e outro *cluster* de M destinos (D_m), para $m = 1, 2, \dots, M$. Como o modo de retransmissão considerado é o *full duplex*, os retransmissores são equipados com um par de antenas, sendo uma dedicada para a transmissão e a outra para a recepção. Os demais nós necessitam apenas de uma antena para desempenhar suas funções, no caso da fonte, uma antena de transmissão e no caso do destino, uma antena de recepção. É considerado que os receptores dos retransmissores utilizam SWIPT por meio da técnica PS, com razão de divisão de potência ρ e fator de eficiência de conversão de energia η . Os destinos combinam os sinais provenientes do enlace de transmissão direta e do enlace de retransmissão por seleção pura (SC, *Selection Combining*). Para tal, assume-se que o tempo de processamento nos retransmissores é suficientemente grande em relação ao tempo de símbolo, tornando os dois sinais separáveis [15, 16].

Os estados dos enlaces são caracterizados pelos coeficientes complexos de canal h_{XY} , para $XY \in \{SD_m, SR_k, R_k D_m, R_k R_k\}$, que são sujeitos a desvanecimento do tipo Rayleigh e modelados como variáveis aleatórias gaussianas complexas e circularmente simétricas, $h_{XY} \sim \mathcal{CN}(0, \Omega_{XY})$, em que $\Omega_{XY} = E[|h_{XY}|^2]$ é o ganho médio de canal e $E[\cdot]$ denota o operador esperança. Os ganhos de canal são caracterizados pelo módulo ao quadrado dos coeficientes, com distribuição Rayleigh, $|h_{XY}|^2 \sim \text{Rayleigh}(\Omega_{XY})$.

Também é considerada a introdução de ruído aditivo gaussiano branco (AWGN, *Additive White*

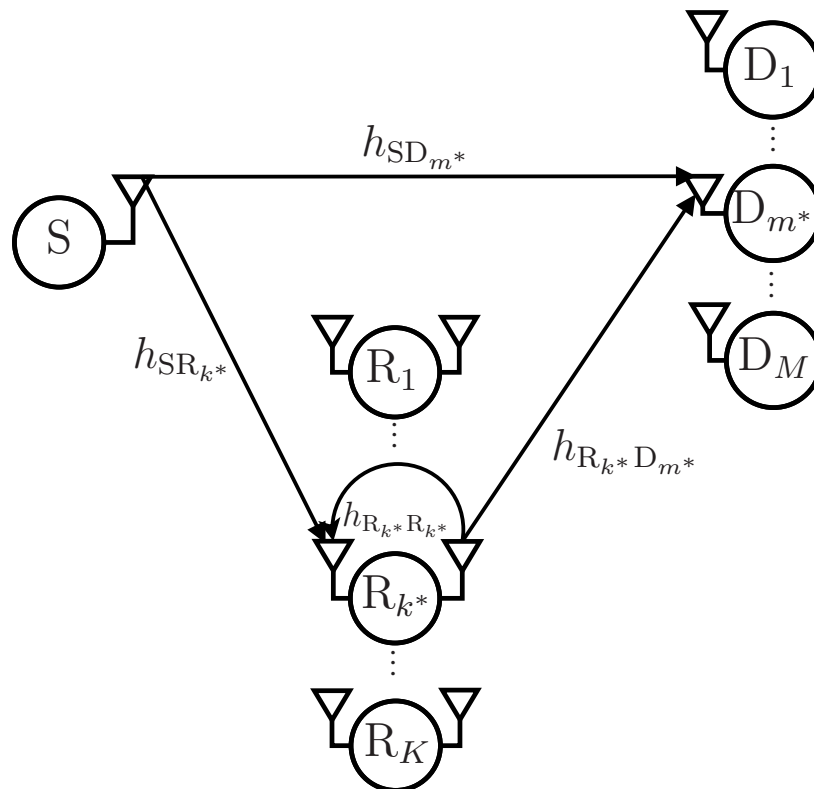


Figura 9 – Modelo do Sistema.
fonte: Produção do próprio autor.

Gaussian Noise), em todas antenas receptoras, modelado pela variável aleatória $n_{XY} \sim \mathcal{N}(0, N_0)$ em que N_0 é a variância do ruído. A fonte S transmite com potência P_S .

A SNR recebida no enlace de transmissão direta do m -ésimo destino, $(S) \rightarrow (D_m)$, é dada por

$$\gamma_{SD_m} = \bar{\gamma} |h_{SD_m}|^2, \quad (4)$$

em que $\bar{\gamma} = P_S/N_0$ é a SNR transmitida média pela fonte S, sendo P_S a potência transmitida. Por outro lado, a SNR recebida no enlace de retransmissão de duplo salto é obtida no seguinte lema.

Lema 1: a SNR fim-a-fim recebida do enlace de retransmissão de duplo salto, $(S) \rightarrow (R_k) \rightarrow (D_m)$, é dada por

$$\gamma_{SR_k D_m} = \frac{(1-\rho)\bar{\gamma}|h_{SR_k}|^2 \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{SR_k}|^2}{1-\eta\rho|h_{R_k R_k}|^2} |h_{R_k D_m}|^2}{(1-\rho) \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{SR_k}|^2}{1-\eta\rho|h_{R_k R_k}|^2} |h_{R_k R_k}|^2 + 1} \cdot \frac{(1-\rho)\bar{\gamma}|h_{SR_k}|^2}{(1-\rho) \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{SR_k}|^2}{1-\eta\rho|h_{R_k R_k}|^2} |h_{R_k R_k}|^2 + 1} + \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{SR_k}|^2}{1-\eta\rho|h_{R_k R_k}|^2} |h_{R_k D_m}|^2 + 1} \quad (5)$$

Definindo as expressões:

$$X = (1-\rho)\bar{\gamma}|h_{SR_k}|^2, \quad (6)$$

$$Y = \beta|h_{R_k D_m}|^2, \quad (7)$$

$$U = (1-\rho)\beta|h_{R_k R_k}|^2, \quad (8)$$

com X a SNR recebida no primeiro salto, Y a SNR recebida no segundo salto, e U a SNR recebida do enlace de autointerferência; com $\beta \triangleq \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{SR_k}|^2}{1-\eta\rho|h_{R_k R_k}|^2}$, podemos expressar (5) da seguinte maneira:

$$\gamma_{SR_k D_m} = \frac{\frac{X}{U+1}Y}{\frac{X}{U+1} + Y + 1}, \quad (9)$$

que é uma forma conhecida da SNR fim-a-fim recebida para redes cooperativas FD [15].

Prova:

Nesta prova, o modelo de sinais da rede cooperativa que opera no modo de retransmissão FD, utiliza o protocolo de retransmissão VG-AF e SWIPT por PS é desenvolvido com o intuito de se chegar a uma expressão para a SNR recebida do enlace de retransmissão de dois saltos, $(S) \rightarrow (R_k) \rightarrow (D_m)$. Sinais transmitidos são denotados por $x_A(t)$ com $A \in \{S, R_k\}$ e sinais recebidos são denotados por $y_B(t)$ com $B \in \{R_k, D_m\}$. O sinal $x_S(t)$ que carrega a informação de interesse, é de potência unitária normalizada, de modo que $E[|x_S(t)|^2] = 1$.

O sinal enviado pelo retransmissor é dado por

$$x_{R_k}(t) = G[h_{SR_k}\sqrt{(1-\rho)P_S}x_S(t-\tau) + h_{R_k R_k}\sqrt{(1-\rho)P_R}x_R(t-\tau) + n_{R_k}(t-\tau)], \quad (10)$$

em que P_R é a potência transmitida pelo retransmissor, G é o fator de amplificação utilizado pelo retransmissor e $n_{R_k}(t)$ é o ruído aditivo na antena receptora do retransmissor. Com o uso de substituições recursivas, (10) pode ser expresso da seguinte forma:

$$x_{R_k}(t) = G \sum_{j=1}^L (h_{R_k R_k} \sqrt{(1-\rho)P_R G})^{j-1} [\sqrt{(1-\rho)P_S} h_{SR_k} x_S(t-j\tau) + n_{R_k}(t-j\tau)], \quad (11)$$

em que L é o comprimento do quadro, denotando o número de transmissões consecutivas de símbolos considerados na série. O sinal $x_{R_k}(t)$ também é considerado um sinal de potência unitária normalizada, ou seja, $E[|x_{R_k}(t)|^2] = 1$. O valor de G^2 é encontrado à partir do valor quadrático médio como

$$\begin{aligned} E[|x_{R_k}(t)|^2] &= G^2 \sum_{j=1}^L (|h_{R_k R_k}|^2 (1-\rho) P_R G^2)^{j-1} [(1-\rho) P_S |h_{SR_k}|^2 + N_0] \\ &\stackrel{(a)}{=} \frac{G^2 [(1-\rho) P_S |h_{SR_k}|^2 + N_0]}{1 - |h_{R_k R_k}|^2 (1-\rho) P_R G^2} \\ G^2 &= \frac{1}{(1-\rho) P_S |h_{SR_k}|^2 + (1-\rho) P_R |h_{R_k R_k}|^2 + N_0}, \end{aligned} \quad (12)$$

em que no passo (a) é considerado que o somatório converge se $|h_{R_k R_k}|^2 (1-\rho) P_R G^2 < 1$ e que L é um valor suficientemente grande. A potência utilizada pelo retransmissor é dada por

$$\begin{aligned} P_R &= \eta \rho (P_S |h_{SR_k}|^2 + P_R |h_{R_k R_k}|^2) \\ &= \frac{\eta \rho P_S |h_{SR_k}|^2}{1 - \eta \rho |h_{R_k R_k}|^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Substituindo (13) em (12) e retirando a raiz quadrada, o ganho é dado por

$$G = \sqrt{\frac{1}{(1-\rho) P_S |h_{SR_k}|^2 + (1-\rho) \frac{\eta \rho P_S |h_{SR_k}|^2}{1 - \eta \rho |h_{R_k R_k}|^2} |h_{R_k R_k}|^2 + N_0}}. \quad (14)$$

O sinal recebido no destino é dado por:

$$\begin{aligned} y_{D_m} &= \sqrt{P_R} G \sum_{j=1}^L (h_{R_k R_k} \sqrt{P_R} G \sqrt{1-\rho})^{j-1} [\sqrt{P_S(1-\rho)} h_{SR_k} x_S(t-j\tau) + n_{R_k}(t-j\tau)] h_{R_k D_m} \\ &\quad + n_{D_m}(t), \end{aligned} \quad (15)$$

sendo possível separar as componentes de sinal e de ruído, bem como considerar a convergência da série como anteriormente. O sinal reorganizado é o seguinte:

$$\begin{aligned} y_{D_m} &= \underbrace{\sqrt{P_R} G \sqrt{P_S(1-\rho)} h_{SR_k} h_{R_k D_m} x_S(t-\tau)}_{\text{Mensagem}} + \underbrace{\sqrt{P_R} G h_{R_k D_m} n_{R_k}(t-j\tau)}_{\text{Ruído 1º salto}} + \\ &\underbrace{\sqrt{P_R} G \frac{h_{R_k R_k} \sqrt{P_R} G \sqrt{1-\rho}}{1 - h_{R_k R_k} \sqrt{P_R} G \sqrt{1-\rho}} [\sqrt{P_S(1-\rho)} h_{SR_k} x_S(t-j\tau) + n_{R_k}(t-j\tau)] h_{R_k D_m}}_{\text{Autointerferência}} + \underbrace{n_{D_m}(t)}_{\text{Ruído 2º salto}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Calculando a potência média do sinal recebido em (16) por meio do valor quadrático médio e fazendo a razão da componente referente à informação atual pelas componentes restantes do sinal, que não são de interesse, temos a SNR na forma:

$$\gamma_{\text{SR}_k\text{D}_m} = \frac{(1 - \rho)P_S|h_{\text{SR}_k}|^2P_R G^2|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}{\frac{P_R^2 G^4|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2(1-\rho)[(1-\rho)P_S|h_{\text{SR}_k}|^2+N_0]}{1-P_R G^2|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2} + (P_R G^2|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2 + 1)N_0}. \quad (17)$$

Com a substituição de (13) e (12) em (17) e o uso de manipulações algébricas, a forma final da SNR fim-a-fim do enlace cooperativo é obtida:

$$\gamma_{\text{SR}_k\text{D}_m} = \frac{\frac{(1 - \rho)\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2 \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}{(1 - \rho)\frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2 + 1}}{\frac{(1 - \rho)\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{(1 - \rho)\frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2 + 1} + \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2 + 1}}, \quad (18)$$

o que conclui a prova do Lema 1.

3.1 SELEÇÃO DE DESTINO E RETRANSMISSOR

Como se trata de um sistema multiusuário e com múltiplos nós retransmissores, a seleção dos nós é realizada em duas etapas. Em uma primeira etapa, o destino é escolhido baseado na maximização da SNR recebida do enlace direto (S) \rightarrow (D_m), ou seja

$$m^* = \arg \max_m [\gamma_{\text{SD}_m}] = \arg \max_m [\bar{\gamma}|h_{\text{SD}_m}|^2], \quad (19)$$

em que m^* denota o índice do destino selecionado. A seleção do retransmissor é realizada em seguida, de acordo com o critério comumente chamado de oportunista, que escolha o nó que irá cooperar na etapa de comunicação baseado na maximização da SNR fim-a-fim recebida do enlace de duplo salto (S) \rightarrow (R_k) \rightarrow (D_{m*}) tendo em vista que o m^* -ésimo destino foi selecionado na etapa anterior,

$$k^* = \arg \max_k [\gamma_{\text{SR}_k\text{D}_{m^*}}] = \arg \max_k \left[\frac{\frac{(1 - \rho)\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2 \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}|h_{\text{R}_k\text{D}_{m^*}}|^2}{(1 - \rho)\frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2 + 1}}{\frac{(1 - \rho)\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{(1 - \rho)\frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2 + 1} + \frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}|h_{\text{R}_k\text{D}_{m^*}}|^2 + 1}} \right], \quad (20)$$

em que k^* denota o índice do retransmissor selecionado para cooperação.

3.2 SNR FIM-A-FIM RECEBIDA DO SISTEMA

Como o destino realiza uma seleção entre os dois sinais recebidos, a SNR fim-a-fim recebida do sistema é dada pelo máximo entre a SNR do enlace de transmissão direta $\gamma_{SD_{m^*}}$ e a SNR fim-a-fim recebida do enlace de retransmissão com dois saltos, $\gamma_{SR_{k^*}D_{m^*}}$

$$\begin{aligned} \gamma &= \max[\gamma_{SD_{m^*}}, \gamma_{SR_{k^*}D_{m^*}}] \\ &= \max \left[\bar{\gamma} |h_{SD_{m^*}}|^2, \frac{\frac{(1-\rho)\bar{\gamma} |h_{SR_{k^*}}|^2 \mu |h_{R_{k^*}D_{m^*}}|^2}{(1-\rho)\mu |h_{R_{k^*}R_{k^*}}|^2 + 1}}{\frac{(1-\rho)\bar{\gamma} |h_{SR_{k^*}}|^2}{(1-\rho)\mu |h_{R_{k^*}R_{k^*}}|^2 + 1} + \mu |h_{R_{k^*}D_{m^*}}|^2 + 1} \right], \end{aligned} \quad (21)$$

em que

$$\mu = \frac{\eta\rho\bar{\gamma} |h_{SR_{k^*}}|^2}{1 - \eta\rho |h_{R_{k^*}R_{k^*}}|^2}. \quad (22)$$

4 PROBABILIDADE DE OUTAGE

Neste capítulo é obtida uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* da rede estudada, ao se substituir (21) em (3), como demonstrado na seguinte proposição.

Proposição 1: Uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* considerando o regime de alta SNR, para uma rede cooperativa multiusuário e multirretransmissor, que utiliza a técnica SWIPT por divisão de potência; opera com o protocolo de retransmissão VG-AF e com o modo de retransmissão FD; realiza a seleção de destino e retransmissor em duas etapas de acordo com o critério oportunista; e considera a informação proveniente do enlace de transmissão direta, é dada por

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} = & \sum_{m=0}^M (-1)^m \binom{M}{m} e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma} \sum_{t=1}^m \frac{1}{\Omega_{\text{SD}_t}}} \sum_{m=0}^M \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M (-1)^i \binom{M}{i} \frac{\frac{1}{\Omega_{\text{SD}_m}}}{\frac{1}{\Omega_{\text{SD}_m}} + \sum_{t=1}^i \frac{1}{\Omega_{\text{SD}_t}}} \\
& \times \prod_{k=1}^K \left[\int_{\gamma_{\text{th}}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} \frac{\gamma_{\text{th}} z (1 - \eta\rho w) e^{-\frac{w}{\Omega_{\text{R}_k \text{R}_k}} e^{-\frac{v}{\Omega_{\text{R}_k \text{D}_m}} e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k \text{R}_k} (1+z)}}}{\eta^2 \rho^2 \gamma \Omega_{\text{SR}_k} \Omega_{\text{R}_k \text{R}_k} \Omega_{\text{R}_k \text{D}_m} \Omega_{\text{R}_k \text{R}_k} (z - \gamma_{\text{th}}) (1+z)^v} dw dv dz \right. \\
& \left. + e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k \text{R}_k} (1+\gamma_{\text{th}})}} (1 - e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k \text{R}_k}}}) + e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k \text{R}_k}} \right]. \quad (23)
\end{aligned}$$

Prova: No esquema considerado, o evento de *outage* ocorre quando a SNR fim-a-fim recebida, γ , está abaixo de determinado limiar γ_{th} . A probabilidade de *outage* pode então ser expressa como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \Pr[\gamma < \gamma_{\text{th}}] \\
&= \Pr[\max\{\gamma_{\text{SR}_k^* \text{D}_{m^*}}, \gamma_{\text{SD}_{m^*}}\} < \gamma_{\text{th}}] \\
&= \Pr[\gamma_{\text{SD}_{m^*}} < \gamma_{\text{th}}] \Pr[\gamma_{\text{SR}_k^* \text{D}_{m^*}} < \gamma_{\text{th}}] \\
&\stackrel{(b)}{=} \Pr[\gamma_{\text{SD}_{m^*}} < \gamma_{\text{th}}] \sum_{m=0}^M \Pr[m^* = m] \Pr[\gamma_{\text{SR}_k^* \text{D}_m} < \gamma_{\text{th}}] \\
&= \underbrace{\Pr[\gamma_{\text{SD}_{m^*}} < \gamma_{\text{th}}]}_{\Delta} \sum_{m=0}^M \underbrace{\Pr[m^* = m]}_{\Theta} \prod_{k=1}^K \underbrace{\Pr[\gamma_{\text{SR}_k \text{D}_m} < \gamma_{\text{th}}]}_{\Psi_{FD}}, \quad (24)
\end{aligned}$$

em que no passo (b) é utilizado o Teorema da Probabilidade Total [17, capítulo 2] para separar o termo referente a $\gamma_{\text{SR}_k^* \text{D}_{m^*}}$ nos termos Ψ_{FD} e Θ , que serão derivados posteriormente. O termo Δ pode ser escrito como

$$\begin{aligned}
\Delta &= \Pr[\gamma_{\text{SD}_1} < \gamma_{\text{th}}, \gamma_{\text{SD}_2} < \gamma_{\text{th}}, \dots, \gamma_{\text{SD}_M} < \gamma_{\text{th}}] \\
&= \Pr[\gamma_{\text{SD}_1} < \gamma_{\text{th}}] \Pr[\gamma_{\text{SD}_2} < \gamma_{\text{th}}] \dots \Pr[\gamma_{\text{SD}_M} < \gamma_{\text{th}}] \\
&= F_{\gamma_{\text{SD}_1}}(\gamma_{\text{th}}) F_{\gamma_{\text{SD}_2}}(\gamma_{\text{th}}), \dots, F_{\gamma_{\text{SD}_M}}(\gamma_{\text{th}}) \\
&= \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{SD}_1}}}\right) \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{SD}_2}}}\right), \dots, \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{SD}_M}}}\right) \\
&= \prod_{m=0}^M \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{SD}_m}}}\right)
\end{aligned}$$

$$\stackrel{(c)}{=} \sum_{m=0}^M (-1)^m \binom{M}{m} e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}} \sum_{t=1}^m \frac{1}{\Omega_{\text{SD}_t}}}, \quad (25)$$

em que no passo (c) é utilizada a identidade binomial [18]. O termo Θ é a probabilidade do m -ésimo destino ser o escolhido, ou seja, é a probabilidade que a SNR fim-a-fim recebida do enlace de transmissão direta $S \rightarrow D_m$ seja maior que todas as outras SNRs γ_{SD_i} , com $i = 0, 1, \dots, M$ e $i \neq m$. O termo Θ pode ser escrito como

$$\begin{aligned} \Theta &= \Pr [\gamma_{\text{SD}_m} > \gamma_{\text{SD}_1}, \gamma_{\text{SD}_m} > \gamma_{\text{SD}_2}, \dots, \gamma_{\text{SD}_m} > \gamma_{\text{SD}_M}] \setminus m \\ &= \Pr [\gamma_{\text{SD}_m} > \gamma_{\text{SD}_1}] \Pr [\gamma_{\text{SD}_m} > \gamma_{\text{SD}_2}], \dots, \Pr [\gamma_{\text{SD}_m} > \gamma_{\text{SD}_M}] \setminus m \\ &= \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^m \Pr [\gamma_{\text{SD}_m} > \gamma_{\text{SD}_i}] \\ &= \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^m \Pr [\gamma_{\text{SD}_i} < \gamma_{\text{SD}_m}] \\ &= \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^m F_{\gamma_{\text{SD}_i}}(\gamma_{\text{SD}_m}). \end{aligned} \quad (26)$$

Descondicionando γ_{SD_m} e substituindo a CDF de γ_{SD_i} , o termo Θ pode ser escrito como

$$\begin{aligned} \Theta &= \int_0^\infty \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M \left(1 - e^{-\frac{x}{\gamma_{\text{SD}_i}}}\right) f_{\gamma_{\text{SD}_m}}(x) dx \\ &\stackrel{(d)}{=} \int_0^\infty \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M (-1)^i \binom{M}{i} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}} \sum_{t=1}^i \frac{1}{\Omega_{\text{SD}_t}}} f_{\gamma_{\text{SD}_m}}(x) dx \\ &\stackrel{(e)}{=} \int_0^\infty \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M (-1)^i \binom{M}{i} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}} \sum_{t=1}^i \frac{1}{\Omega_{\text{SD}_t}}} \frac{1}{\gamma_{\text{SD}_m}} e^{-\frac{x}{\gamma_{\text{SD}_m}}} dx \\ &= \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M (-1)^i \binom{M}{i} \frac{1}{\bar{\gamma} \Omega_{\text{SD}_m}} \int_0^\infty e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}} \left(\frac{1}{\Omega_{\text{SD}_m}} + \sum_{t=1}^i \frac{1}{\Omega_{\text{SD}_t}} \right)} dx \\ &= \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M (-1)^i \binom{M}{i} \frac{\frac{1}{\bar{\gamma} \Omega_{\text{SD}_m}}}{\frac{1}{\bar{\gamma}} \left(\frac{1}{\Omega_{\text{SD}_m}} + \sum_{t=1}^i \frac{1}{\Omega_{\text{SD}_t}} \right)} \\ &= \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M (-1)^i \binom{M}{i} \frac{\frac{1}{\Omega_{\text{SD}_m}}}{\frac{1}{\Omega_{\text{SD}_m}} + \sum_{t=1}^i \frac{1}{\Omega_{\text{SD}_t}}}, \end{aligned} \quad (27)$$

em que no passo (d) é utilizada a identidade binomial [18], no passo (e) é substituída a PDF exponencial de γ_{SD_m} , $f_{\gamma_{\text{SD}_m}}(x) = \frac{1}{\gamma_{\text{SD}_m}} e^{-\frac{x}{\gamma_{\text{SD}_m}}}$. Para tornar a expressão da SNR fim-a-fim recebida do enlace *dual-hop* mais tratável, é feita uma primeira aproximação, onde são suprimidos os termos 1 de

$\gamma_{\text{SR}_k\text{D}_m}$, ou seja

$$\gamma_{\text{SR}_k\text{D}_m} \approx \frac{\frac{X}{U}Y}{\frac{X}{U} + Y}, \quad (28)$$

A segunda aproximação feita é assumir descorrelação entre X, Y e U , apesar que de fato esta correlação existir. Apesar de não existir um regime específico que torne essa aproximação razoável, esse tipo de aproximação é comumente adotado na literatura tornar as expressões tratáveis [15] e os resultados obtidos são válidos para o regime de alta SNR. Desta maneira pode-se definir $\frac{X}{U} \triangleq Z$ como uma única variável aleatória e chegar a um resultado com manipulações mais simples.

Com essa definição de Z , Ψ_{FD} pode ser expresso como

$$\begin{aligned} \Psi_{FD} &\approx \Pr \left[\frac{ZY}{Z+Y} < \gamma_{\text{th}} \right] \\ &= \Pr [ZY < \gamma_{\text{th}}Z + \gamma_{\text{th}}Y] \\ &= \Pr [Y(Z - \gamma_{\text{th}}) < \gamma_{\text{th}}Z] \\ &\stackrel{(f)}{=} \int_0^\infty \Pr [Y(z - \gamma_{\text{th}}) < \gamma_{\text{th}}z] f_Z(z) dz, \end{aligned} \quad (29)$$

em que no passo (f) a variável Z foi descondicionada. Em (29), quando $z \in [0, \gamma_{\text{th}}]$, o valor da probabilidade é sempre 1, e A_{FD} assume a forma

$$\begin{aligned} \Psi_{FD} &\approx \int_0^{\gamma_{\text{th}}} f_Z(z) dz + \int_{\gamma_{\text{th}}}^\infty F_Y \left(\frac{\gamma_{\text{th}}z}{z - \gamma_{\text{th}}} \right) f_Z(z) dz \\ &= F_z(\gamma_{\text{th}}) + \int_{\gamma_{\text{th}}}^\infty F_Y \left(\frac{\gamma_{\text{th}}z}{z - \gamma_{\text{th}}} \right) f_Z(z) dz. \end{aligned} \quad (30)$$

A CDF $F_Z(z)$ é dada pela seguinte probabilidade

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= \Pr \left[\frac{X}{U} < z \right] \\ &= \Pr \left[\frac{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}{\eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2} < z \right] \\ &= \Pr [1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2 < \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2 z] \\ &= \Pr \left[|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2 > \frac{1}{\eta\rho(1+z)} \right] \\ &= 1 - F_{|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2} \left(\frac{1}{\eta\rho(1+z)} \right) \\ &\stackrel{(g)}{=} e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k\text{R}_k}(1+z)}}, \end{aligned} \quad (31)$$

em que no passo (g) foi substituída a CDF exponencial de $|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2$. A PDF de Z pode ser obtida derivando $F_Z(z)$ com relação a z , ou seja

$$\begin{aligned} f_Z(z) &= \frac{d}{dz} \left[e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k\text{R}_k}(1+z)}} \right] \\ &= \frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k\text{R}_k}(1+z)} e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k\text{R}_k}(1+z)}}. \end{aligned} \quad (32)$$

A CDF de $Y, F_Y(y)$, é dada por

$$F_Y(y) = \Pr \left[\frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}{1 - \eta\rho|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2} < y \right] \\ \stackrel{(h)}{=} \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[\frac{\eta\rho\bar{\gamma}|h_{\text{SR}_k}|^2v}{1 - \eta\rho w} < y \right] f_{|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}(w) f_{|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}(v) dw dv, \quad (33)$$

em que no passo (h), foram descondicionados os ganhos de canal $|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2$ e $|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2$. Em (33) quando $w \in [\frac{1}{\eta\rho}, \infty)$, o valor da probabilidade é sempre 1, e $F_Y(y)$ pode ser expressa como

$$F_Y(y) = \int_0^\infty \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} \Pr \left[|h_{\text{SR}_k}|^2 < \frac{y(1 - \eta\rho w)}{\eta\rho\bar{\gamma}v} \right] f_{|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}(w) f_{|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}(v) dw dv \\ + \int_0^\infty \int_{\frac{1}{\eta\rho}}^\infty f_{|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}(w) f_{|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}(v) dw dv \\ = \int_0^\infty \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} F_{|h_{\text{SR}_k}|^2} \left(\frac{y(1 - \eta\rho w)}{\eta\rho\bar{\gamma}v} \right) f_{|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}(w) f_{|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}(v) dw dv \\ + \int_0^\infty f_{|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}(v) dv \int_{\frac{1}{\eta\rho}}^\infty f_{|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}(w) dw \\ = \int_0^\infty \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} F_{|h_{\text{SR}_k}|^2} \left(\frac{y(1 - \eta\rho w)}{\eta\rho\bar{\gamma}v} \right) f_{|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2}(w) f_{|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2}(v) dw dv \\ + 1 - F_{|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2} \left(\frac{1}{\eta\rho} \right). \quad (34)$$

A terceira simplificação adotada é igualar o valor de $F_{|h_{\text{SR}_k}|^2}(a)$ aos dois primeiros termos da série de Maclaurin da função exponencial, visto que o argumento se torna suficientemente pequeno conforme $\bar{\gamma}$ aumenta. $F_{|h_{\text{SR}_k}|^2}(a)$ é aproximada então por

$$F_{|h_{\text{SR}_k}|^2}(a) = 1 - e^{-\frac{a}{\Omega_{\text{SR}_k}}} \\ \stackrel{(i)}{\approx} 1 - \left(1 - \frac{a}{\Omega_{\text{SR}_k}} \right) \\ = \frac{a}{\Omega_{\text{SR}_k}}, \quad (35)$$

em que no passo (i) a exponencial é substituída pelos dois primeiros termos da série de Maclaurin de e^x , dada por [19, cap. 11, eq. 11]

$$e^{-x} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^n}{n!} \approx 1 - x. \quad (36)$$

Substituindo (35), a CDF exponencial de $|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2$ e as PDFs exponenciais de $|h_{\text{R}_k\text{R}_k}|^2$ e $|h_{\text{R}_k\text{D}_m}|^2$ em (34), $F_Y(y)$ assume a forma

$$F_Y(y) = \int_0^\infty \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} \frac{y(1 - \eta\rho w) e^{-\frac{w}{\Omega_{\text{R}_k\text{R}_k}}} e^{-\frac{v}{\Omega_{\text{R}_k\text{D}_m}}}}{\Omega_{\text{SR}_k} \eta\rho\bar{\gamma}v \Omega_{\text{R}_k\text{R}_k} \Omega_{\text{R}_k\text{D}_m}} dw dv + e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{\text{R}_k\text{R}_k}}}. \quad (37)$$

Substituindo (37), (31) e (32) em (29), é obtida a expressão aproximada para Ψ_{FD}

$$\begin{aligned}
\Psi_{FD} &\approx e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}(1+\gamma_{th})}} + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} \frac{\gamma_{th}z(1-\eta\rho w)e^{-\frac{w}{\Omega_{R_k R_k}}e^{-\frac{v}{\Omega_{R_k D_m}}e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}(1+z)}}}}{\eta^2\rho^2\bar{\gamma}\Omega_{SR_k}\Omega_{R_k R_k}\Omega_{R_k D_m}\Omega_{R_k R_k}(z-\gamma_{th})(1+z)v} dw dv dz \\
&+ \int_{\gamma_{th}}^{\infty} e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}}} \frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}(1+z)} e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}(1+z)}} dz \\
&= \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} \frac{\gamma_{th}z(1-\eta\rho w)e^{-\frac{w}{\Omega_{R_k R_k}}e^{-\frac{v}{\Omega_{R_k D_m}}e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}(1+z)}}}}{\eta^2\rho^2\bar{\gamma}\Omega_{SR_k}\Omega_{R_k R_k}\Omega_{R_k D_m}\Omega_{R_k R_k}(z-\gamma_{th})(1+z)v} dw dv dz \\
&+ e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}(1+\gamma_{th})}} (1 - e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}}} + e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}}}. \tag{38}
\end{aligned}$$

Substituindo (38), (25) e (27) em (24), é obtida a expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica para o sistema, dada por

$$\begin{aligned}
P_{out} &= \sum_{m=0}^M (-1)^m \binom{M}{m} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} \sum_{t=1}^m \frac{1}{\Omega_{SD_t}}} \sum_{m=0}^M \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M (-1)^i \binom{M}{i} \frac{\frac{1}{\Omega_{SD_m}}}{\frac{1}{\Omega_{SD_m}} + \sum_{t=1}^i \frac{1}{\Omega_{SD_t}}} \\
&\times \prod_{k=1}^K \left[\int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} \frac{\gamma_{th}z(1-\eta\rho w)e^{-\frac{w}{\Omega_{R_k R_k}}e^{-\frac{v}{\Omega_{R_k D_m}}e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}(1+z)}}}}{\eta^2\rho^2\bar{\gamma}\Omega_{SR_k}\Omega_{R_k R_k}\Omega_{R_k D_m}\Omega_{R_k R_k}(z-\gamma_{th})(1+z)v} dw dv dz \right. \\
&\quad \left. + e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}(1+\gamma_{th})}} (1 - e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}}} + e^{-\frac{1}{\eta\rho\Omega_{R_k R_k}}}, \tag{39}
\end{aligned}$$

o que conclui a prova da Proposição 1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da avaliação da expressão (23) e de sua validação por meio de simulações usando o método de Monte Carlo com base em (21), realizando 10^8 iterações. A Tabela 1 apresenta os parâmetros gerais adotados para a obtenção dos resultados. O ganho médio do canal de cada enlace foi definido pela perda de percurso, com exceção do enlace de autointerferência. O limiar da probabilidade de *outage* foi mapeado de acordo com a eficiência espectral alvo, dada por R .

Tabela 1 – Parâmetros gerais utilizados para avaliação da rede.

Parâmetro	Valor
SNR que define o evento de <i>outage</i>	$\gamma_{\text{th}} = 2^R - 1$
Eficiência espectral alvo	$R = 3 \text{ b/s/Hz}$
Fator de eficiência de conversão de energia.	$\eta = 0,7$
Razão de divisão de potência	$\rho = 0,5$
Expoente de perda de percurso	$\alpha = 4$
Distância entre fonte e destinos	$d_{\text{SD}} = 1$
Distância entre fonte e retransmissores	$d_{\text{SR}} = 0,5$
Distância entre retransmissores e destinos	$d_{\text{RD}} = 0,5$
Ganho médio dos canais fonte-destinos	$\Omega_{\text{SD}} = d_{\text{SD}}^{-\alpha}$
Ganho médio dos canais fonte-retransmissores	$\Omega_{\text{SR}} = d_{\text{SR}}^{-\alpha}$
Ganho médio dos canais retransmissores-destinos	$\Omega_{\text{RD}} = d_{\text{RD}}^{-\alpha}$

fonte: Produção do Próprio Autor.

A Figura 10 mostra a probabilidade de *outage* da rede estudada em função da SNR transmitida, para diferentes valores de Ω_{RR} , considerando o número de retransmissores $K = 3$ e o número de destinos $M = 1$. A figura mostra que um valor menor de Ω_{RR} resultará em um melhor desempenho em termos de *outage*, ou seja, quanto mais eficaz seja a técnica de cancelamento de autointerferência entre as antenas transmissora e receptora no retransmissor, melhor será o desempenho do modo de retransmissão FD. No entanto, nota-se que no regime de alta SNR a inclinação das curvas é idêntica, indicando que esse ganho de desempenho não se traduz em um ganho de ordem de diversidade. Observa-se que pelas aproximações adotadas, a curva da expressão analítica assintótica converge com os pontos obtidos pela simulação no regime de alta SNR, como esperado.

A Figura 11 mostra a probabilidade de *outage* da rede estudada em função da SNR transmitida, para diferentes combinações de número de retransmissores K e número de destinos M , considerando $\Omega_{\text{RR}} = -8 \text{ dB}$. As combinações de K e M são escolhidas de forma a manter fixo o número total de nós na rede, para critério de comparação. Também nota-se que no regime de baixa SNR, a curva de melhor desempenho é que considera o maior número de retransmissores, enquanto nas SNRs mais altas, a curva com melhor desempenho é a do cenário com maior número de destinos. Isso indica que em baixa SNR, onde a autointerferência é menos severa, o desempenho de uma rede com maior número de retransmissores é ligeiramente melhor ao desempenho de uma rede com maior número de destinos. Esse cenário se inverte no regime de alta SNR, onde os retransmissores FD sofrem com

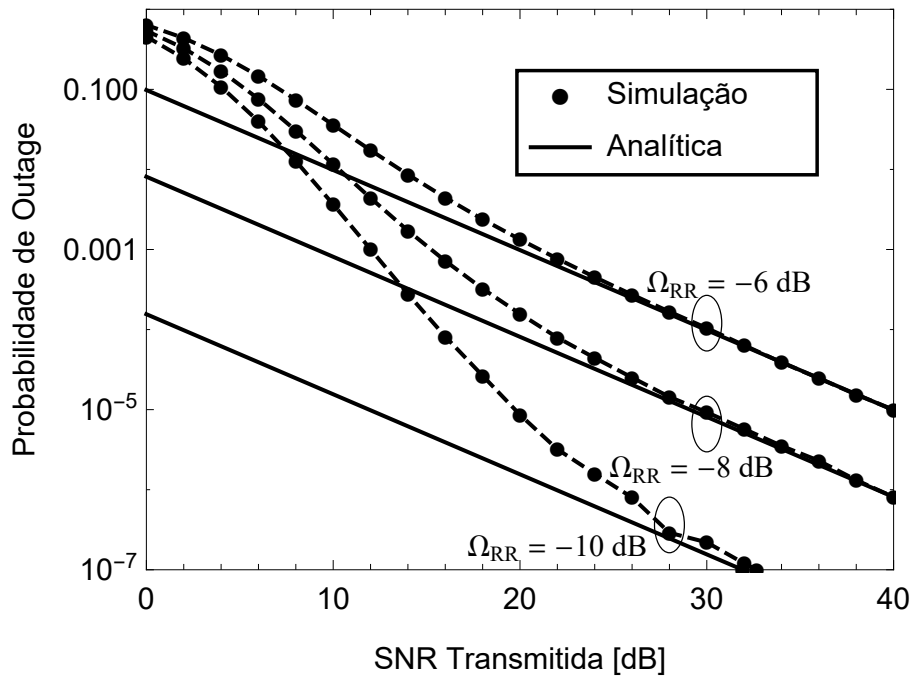


Figura 10 – Probabilidade de *outage* versus SNR transmitida para diferentes valores de Ω_{RR} , considerando o número de destinos $M = 1$ e o número de retransmissores $K = 3$.
fonte: Produção do próprio autor.

autointerferência mais severa, perdendo desempenho enquanto as curvas que consideram um número maior de destinos não são tão afetadas tanto com esse fenômeno.

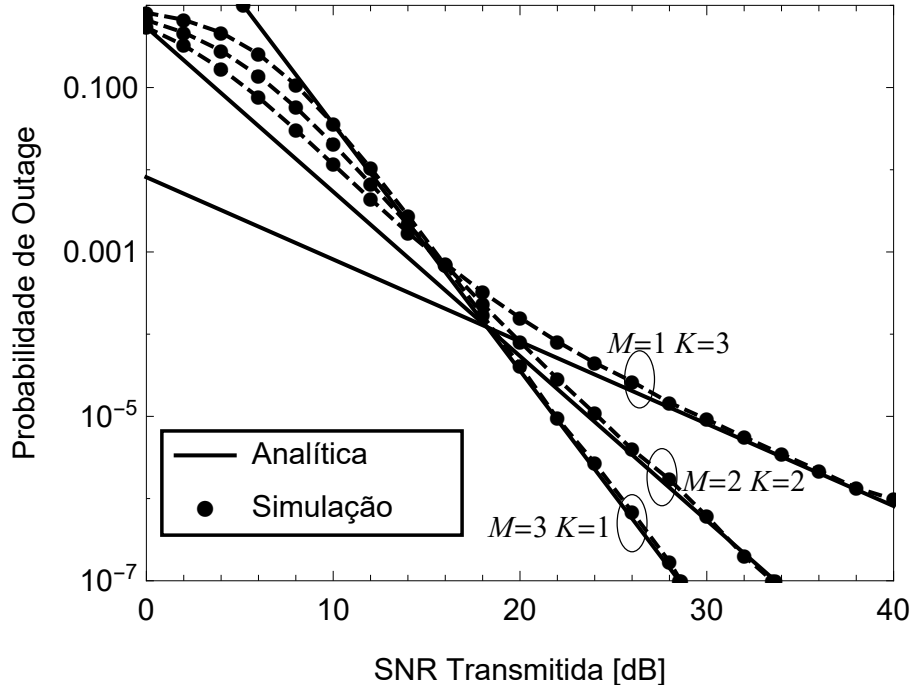


Figura 11 – Probabilidade de *outage* versus SNR transmitida para diferentes combinações do número de destinos M e do número de retransmissores K , considerando $\Omega_{RR} = -8$ dB.
fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 12 mostra uma comparação em termos da probabilidade de *outage* em função da SNR transmitida, considerando a rede sob estudo e uma rede baseada no modo de retransmissão HD. A

curva apresentada em preto representa a rede neste trabalho, enquanto a curva em cinza representa uma rede baseada no modo HD, estudada em [6], que também utiliza SWIPT por PS, protocolo de retransmissão VG-AF e SC com o sinal do enlace de transmissão direta. Também são exibidas curvas de referência com ordem de diversidade (inclinação) K (preto) e $K + M$ (cinza), com o intuito de evidenciar a ordem de diversidade dos sistemas. A SNR fim-a-fim recebida instantânea da rede baseada em modo HD é dada por [6, eq. 12]

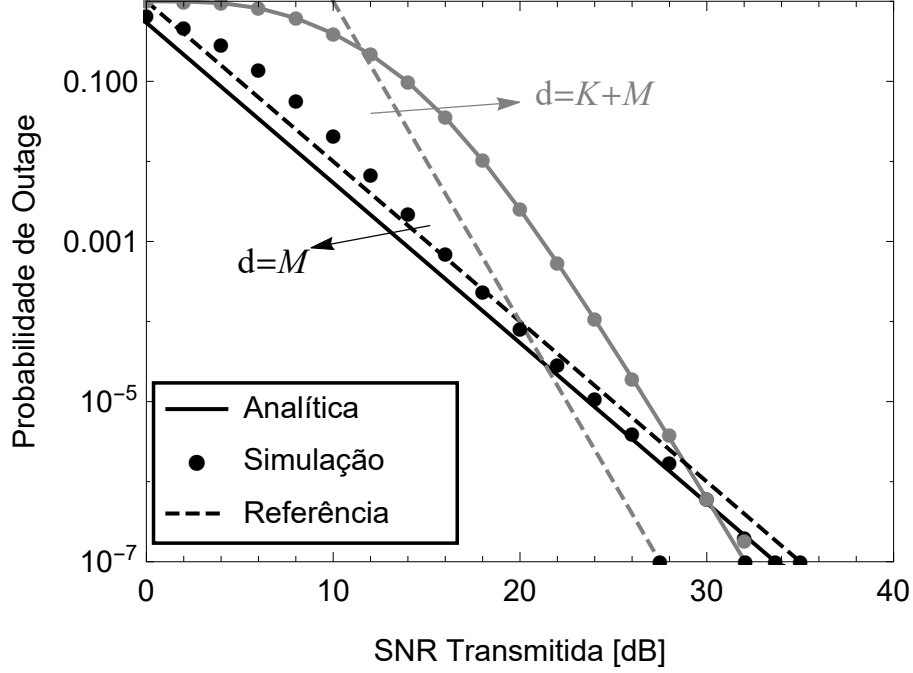


Figura 12 – Probabilidade de *Outage* da rede sob estudo (preto) e da rede HD (cinza), considerando $\Omega_{RR} = -8$ dB, $M = 2$ e $K = 2$, curvas de com ordem de diversidade M (preto) e $K + M$ (cinza).

fonte: Produção do próprio autor.

$$\gamma_{HD} = \max \left[\bar{\gamma} |h_{SD_{m^*}}|^2, \frac{(1-\rho)\bar{\gamma} |h_{SR_{k^*}}|^2 \rho \bar{\gamma} |h_{SR_{k^*}}|^2 |h_{R_{k^*}D_{m^*}}|^2}{(1-\rho)\bar{\gamma} |h_{SR_{k^*}}|^2 + \rho \bar{\gamma} |h_{SR_{k^*}}|^2 |h_{R_{k^*}D_{m^*}}|^2 + 1} \right], \quad (40)$$

e sua expressão analítica exata para probabilidade de *outage* é dada por [6, eq. 20]:

$$P_{out} = \sum_{m=0}^M (-1)^m \binom{M}{m} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} \sum_{t=1}^m \frac{1}{\Omega_{SD_t}}} \sum_{m=0}^M \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq m}}^M (-1)^i \binom{M}{i} \frac{\frac{1}{\Omega_{SD_m}}}{\frac{1}{\Omega_{SD_m}} + \sum_{t=1}^i \frac{1}{\Omega_{SD_t}}} \times \prod_{k=1}^K \left[1 - \frac{1}{\Omega_{SR_k}} \int_{\frac{\gamma_{th,HD}}{(1-\rho)\bar{\gamma}}}^{\infty} e^{-\frac{y}{\Omega_{SR_k}} \frac{(1-\rho)\bar{\gamma} \gamma_{th,HD} y + \gamma_{th,HD}}{[(1-\rho)\bar{\gamma} y - \gamma_{th,HD}] \eta \rho \bar{\gamma} \Omega_{R_k D_m} y}} dy \right]. \quad (41)$$

Os parâmetros adotados foram os seguintes: $\gamma_{th,HD} = 2^{2R} - 1$; $K = 2$; $M = 2$; $\Omega_{RR} = -8$ dB. É importante notar que o fator 2 aparece no parâmetro $\gamma_{th,HD}$ se deve ao modo de retransmissão HD, em que são necessários dois intervalos de tempo para se transmitir a mesma informação. Desta maneira, é feita uma comparação justa em termos da eficiência espectral alvo. No regime de alta SNR, podemos

observar o paralelismo da curva de referência $K + M$ com as curvas da rede HD, enquanto aquelas da rede FD apresentam paralelismo com a curva de referência com inclinação M . Dessa forma, conclui-se que a ordem de diversidade da rede estudada é M .

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado o estudo do desempenho, em termos de probabilidade e *outage*, de uma rede cooperativa que utiliza o modo de retransmissão FD, o protocolo de retransmissão AF-VG, a técnica SWIPT por PS, bem como os sinais provenientes dos enlaces diretos por meio da técnica de combinação SC. O modelo de sinais do sistema proposto foi desenvolvido, com a obtenção da SNR fim-a-fim do sistema, utilizada nas simulações do método de Monte Carlo, e também foi realizado o desenvolvimento de uma expressão analítica assintótica, obtida a partir do regime de alta SNR. A expressão analítica obtida foi confrontada com as simulações e mostrou ser válida para o regime de alta SNR transmitida, como esperado.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a ordem de diversidade fornecida pela rede é igual ao número de destinos M , sendo que os enlaces de retransmissão não acrescentam diversidade, devido ao fenômeno da autointerferência nos retransmissores FD. Melhorar a eficácia das técnicas de cancelamento de autointerferência entre as antenas transmissora e receptora leva a um ganho de desempenho, mas sem alteração na ordem de diversidade. E em regimes de baixa SNR, onde a autointerferência não se manifesta de maneira severa, é preferível usar um maior número de retransmissores do que destinos, mantendo fixo o número total de nós na rede.

REFERÊNCIAS

- [1] DAHLMAN, E. *et al.* 5G Wireless Access: Requirements and Realization. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 12, p. 42-47, dez. 2014.
- [2] AL-OGAILI F.; SHUBAIR, R. M. Millimeter-Wave Mobile Communications for 5G: Challenges and Opportunities. In: **IEEE International Symposium on Antennas and Propagation**, 2016, Puerto Rico.
- [3] DOHLER, M.; LI Y. **Cooperative Communications: Hardware, Channel and PHY**. John Wiley & Sons, 2010. 464 p.
- [4] RAPPAPORT T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2. ed. Prentice Hall, 2002. 707 p.
- [5] GOLDSMITH A. **Wireless Communications**. Cambridge University Press, 2005. 561 p.
- [6] DO, N. T. *et al.* Exploiting direct links in multiuser multirelay SWIPT cooperative networks with opportunistic scheduling. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, n. 8, p. 5410-5427, ago. 2017.
- [7] LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062-3080, dez. 2004.
- [8] E-PEAS Semiconductors. **Highly-efficient, regulated dual-output, ambient energy manager for high-frequency RF input with optional primary battery**. Disponível em: <https://e-peas.com/wp-content/uploads/2020/04/E-peas_RF_Energy_Harvesting_Datasheet_AEM30940.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2020.
- [9] YE Y. *et al.* Power Splitting-Based SWIPT With Dual-Hop DF Relaying in the Presence of a Direct Link. **IEEE Systems Journal**, v. 13, n. 2, p. 1316-1319, jun. 2019.
- [10] ZHANG, C.; CHEN, Y. Wireless power transfer strategies for cooperative relay system to maximize information throughput. **IEEE Access**, v. 5, p. 2573–2582, mar. 2017.
- [11] NA, H.; LEE, C. A full-duplex SWIPT system with self-energy recycling to minimize energy consumption. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, out. 2018.
- [12] ZENG Y.; ZHANG, R. Full-Duplex Wireless-Powered Relay With Self-Energy Recycling. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 4, n. 2, p. 201-204, abr. 2015.
- [13] CHAE J. *et al.* Self Energy Recycling Techniques for MIMO Wireless Communication Systems. In: **IEEE ICC 2017 Wireless Communications Symposium**, 2017, Paris.

- [14] JAYAKODY, D. N. K. *et. al.* Self-energized UAV-assisted Scheme for Cooperative Wireless Relay Networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 69, n. 1, p. 578-592, jan. 2020.
- [15] OSORIO, D. P. M. *et. al.* Exploiting the Direct Link in Full-Duplex Amplify-and-Forward Relaying Networks. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 22., n. 10, p. 1766-1770, out. 2015.
- [16] NGUYEN, B. C. *et. al.* Full-duplex amplify-and-forward relay system with direct link: Performance analysis and optimization. **Physical Communication**, v. 38, out. 2019.
- [17] WALPOLE, R. E. *et al.* **Probability and Statistics for Engineers and Scientists**. 9. ed. Boston: Prentice Hall, 2012. 808 p.
- [18] WEISSTEIN, E. W. **Binomial Theorem**: from MathWorld –A Wolfram Web Resource. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/BinomialTheorem.html>>. Acesso em 18 fev. 2020.
- [19] STEWART, J. **Cálculo, volume 2**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 664 p.