

DANIEL DE PAIVA MUCIN

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES ASSISTIDAS
POR VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS DO TIPO
FULL DUPLEX COM TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA
SEM FIO**

São João da Boa Vista - SP
2021

DANIEL DE PAIVA MUCIN

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES ASSISTIDAS
POR VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS DO TIPO
FULL DUPLEX COM TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA
SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PGEE - ICTS/SJBV, câmpus de São João da Boa Vista, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo
Orientador

São João da Boa Vista - SP
2021

Mucin, Daniel de Paiva

M942a Análise de desempenho de redes assistidas por veículos aéreos não tripulados do tipo full duplex com transferência de energia sem fio / Daniel de Paiva Mucin. -- São João da Boa Vista, 2021
68 f.: il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista

Orientador: Edgar Eduardo Benitez Olivo

1. Telecomunicações. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3.
Probabilidades. 4. Energia Transferência. 5. Ondas milimétricas. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor.

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

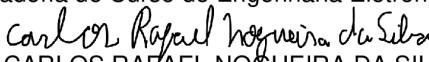
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise de desempenho de redes assistidas por veículos aéreos não tripulados do tipo full duplex com transferência de energia sem fio

AUTOR: DANIEL DE PAIVA MUCIN

ORIENTADOR: EDGAR EDUARDO BENITEZ OLIVO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. EDGAR EDUARDO BENITEZ OLIVO (Participação Virtual)
Coordenadoria de Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações / Câmpus de São João da Boa Vista


Prof. Dr. CARLOS RAFAEL NOGUEIRA DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)


Prof. Dr. HENRY RAMIRO CARVAJAL MORA (Participação Virtual)
Faculdade de Engenharia e Ciências Aplicadas, Engenharia em Telecomunicações / Universidad de Las Américas (UDLA)

Sorocaba, 16 de julho de 2021

À minha família, em especial aos meus pais Rovilso e Bernadete, aos meus irmãos Samuel, Verônica e Matheus e à minha companheira, Amanda, por todo amor, apoio, confiança, compreensão e incentivo em todos os momentos.

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.

À minha irmã, Verônica, pela disponibilidade e paciência em me auxiliar quando necessário, oferecendo meios para realizar este trabalho.

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.

Agradeço a Prof. Dra. Diana Pamela Moya Osorio, pela disponibilidade em fornecer suporte e orientações para o desenvolvimento deste trabalho.

Por último, mas não menos importante, agradeço à minha companheira, 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.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”*

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho, o desempenho de uma rede assistida por um veículo aéreo não tripulado (VANT), que é alimentado por transferência de energia sem fio, é avaliado em termos da probabilidade de *outage*, considerando canais do tipo *fluctuating two-ray* (FTR). Em particular, o modelo FTR permite caracterizar o fenômeno de desvanecimento em uma ampla faixa de frequências, incluindo a faixa das ondas milimétricas. Nesse sistema, considera-se que o VANT coopera na comunicação entre fonte e destino, operando em modo de retransmissão *full duplex* e sob o protocolo amplifica-e-encaminha. No processo de comunicação, considera-se ainda as técnicas de transferência de energia sem fio (WET, *wireless energy transfer*), transferência simultânea de energia e informação sem fio (SWIPT, *simultaneous wireless information and power transfer*) e autorreciclagem de energia. O desempenho de *outage* do sistema é caracterizado por meio de uma expressão em forma integral obtida a partir de uma análise aproximada. Além disso, uma expressão fechada é obtida a partir de uma análise assintótica no regime de alta relação sinal-ruído. A fim de validar as expressões analíticas obtidas e avaliar o desempenho da rede em função dos parâmetros-chave do sistema, são implementadas simulações usando o método de Monte Carlo. Resultados obtidos mostram que alguns parâmetros do modelo FTR possuem maior influência nas curvas de desempenho e que para determinados valores de ganho médio do canal de autointerferência, presente no VANT, o desempenho do sistema pode degradar significativamente, independentemente dos valores dos parâmetros do modelo FTR.

Palavras-chave: *Fluctuating two-ray*. *Full duplex*. Ondas milimétricas. Probabilidade de *outage*. Veículo aéreo não tripulado. Transferência simultânea de energia e informação sem fio.

ABSTRACT

In this work, the performance of a wireless-powered unmanned aerial vehicle (UAV) assisted network under fluctuating two-ray (FTR) channels is assessed in terms of the outage probability. In particular, the FTR model allows to characterize the fading phenomenon in a wide range of frequencies, including that of millimeter waves. In this system, the UAV is considered to cooperate in the communication between source and destination, operating in full duplex relaying mode under the amplify-and-forward protocol. In the communication process, wireless energy transfer (WET), simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT), and self-recycling energy techniques are also considered. The outage performance of the system is characterized by means of an integral-form expression derived from an approximate analysis. Also, a closed-form expression is obtained from an asymptotic analysis at the high signal-to-noise ratio regime. Monte Carlo simulations are provided in order to validate the obtained analytical expressions as well as to evaluate the system performance in terms of key system parameters. Obtained results show that some parameters of the FTR model have greater influence on the performance curves and that for certain values of the average channel gain of the self-interference link, present in the UAV, the system performance can degrade significantly, regardless of the values of the FTR model parameters.

Keywords: Fluctuating two-ray. Full duplex. Millimeter waves. Outage probability. Simultaneous wireless information and power transfer. Unmanned aerial vehicle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de diversidade espacial, com múltiplas antenas espacialmente distribuídas no receptor D.	24
Figura 2	Esquema de diversidade cooperativa com a presença de enlace direto entre fonte e destino, e N nós retransmissores emulando um arranjo virtual de antenas (linha cheia: sinal de informação; linha tracejada: sinal de auto interferência).	25
Figura 3	Cenário cooperativo de dois saltos (<i>dual hop</i>) com um retransmissor do tipo HD.	26
Figura 4	Cenário cooperativo de dois saltos com um retransmissor do tipo FD.	27
Figura 5	Representação em diagrama de blocos de um dispositivo de captação de energia sem a unidade de gerenciamento de energia.	29
Figura 6	Representação em diagrama de blocos de um dispositivo de captação de energia com unidade de gerenciamento de energia.	30
Figura 7	Diagrama para exemplificação da técnica TS.	30
Figura 8	Diagrama para exemplificação da técnica PS.	30
Figura 9	Modelo do sistema (transmissão de informação: linha sólida; transferência de energia sem fio: linha pontilhada; sinal de interferência: linha tracejada.) . . .	32
Figura 10	Probabilidade de propagação LOS em função do ângulo de elevação para ambientes selecionados.	36
Figura 11	Esquema de transmissão do sistema, em que α denota um fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT.	37

- Figura 12 Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, γ_S , com $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. 45
- Figura 13 Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, γ_S , para dois valores diferentes de $\Omega_{SI} = -5$ e -10 dB, com $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. 46
- Figura 14 Probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT, α , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. 47
- Figura 15 Probabilidade de *outage* vs. fator de divisão de potência na fase SWIPT, ρ , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. 48
- Figura 16 Probabilidade de *outage* vs. altura de voo normalizada do VANT, h/d_{SD} , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $\rho = 0,5$, considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5;10;20\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} = 1$ (desvanecimento Rayleigh) para condições de propagação NLOS. 49

Figura 17	Probabilidade de <i>outage</i> vs. altura de voo normalizada do VANT, h/d_{SD} , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $\rho = 0,5$, considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} \in \{0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1\}$; $m_{LOS} = 5$ para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} = 1$ (desvanecimento Rayleigh) para condições de propagação NLOS.	51
Figura 18	Região de integração para o evento de <i>outage</i> no argumento de $\Pr(\cdot)$ em (41), R_1 , correspondente à CDF de A , $F_A(\cdot)$	54
Figura 19	Região de integração para o evento de <i>outage</i> no argumento de $\Pr(\cdot)$, R_2 , em (47), correspondente à CDF de Y , $F_Y(\cdot)$	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Relações entre o desvanecimento FTR e outros modelos de desvanecimento da literatura. Os parâmetros FTR são sublinhados para diferenciá-los dos casos especiais.	33
Tabela 2	Parâmetros empíricos para probabilidade de LOS em diferentes cenários.	35

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

5GB	Quinta Geração e Gerações Futuras (<i>5G & Beyond</i>)
ADC	Conversor Analógico-Digital (<i>Analog-to-Digital Converter</i>)
AF	Amplifica-e-Encaminha (<i>Amplify-and-Forward</i>)
AWGN	Rudo Gaussiano Branco Aditivo (<i>Additive White Gaussian Noise</i>)
BER	Taxa de Erro de Bit (<i>Bit Error Rate</i>)
CDF	Função de Distribuição Acumulada (<i>Cumulative Distribution Function</i>)
CSI	Informação do Estado de Canal (<i>Channel State Information</i>)
DC	Corrente Contnua (<i>Direct Current</i>)
DF	Decodifica-e-Encaminha (<i>Decode-and-Forward</i>)
DSC	Cancelador Digital de Autointerferência (<i>Digital Self Interference Cancellor</i>)
EH	Captação de Energia (<i>Energy Harvesting</i>)
eMBB	Banda Larga Mvel Aprimorada (<i>Enhanced Mobile Broadband</i>)
FD	<i>Full Duplex</i>
FTR	<i>Fluctuating Two-Ray</i>
HD	<i>Half Duplex</i>
i.n.i.d	Independente e No Identicamente Distribuio (<i>independent and non-identically distributed</i>)
LOS	Linha de Visada (<i>Line-of-Sight</i>)
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Sadas (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)
mMTC	Comunicação Massiva do tipo Mquina (<i>Massive Machine-Type Communication</i>)
NLOS	Propagação sem Linha de Visada (<i>Non-Line-of-Sight</i>)
PDF	Função Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
PS	Diviso no domínio da potência (<i>Power Splitting</i>)
RF	Rdio Frequência
SI	Autointerferência (<i>Self-Interference</i>)
SINR	Relação Sinal-Interferncia-mais-Rudo (<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>)
SNR	Relação Sinal-Rudo (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
SWIPT	Transferência Simultânea de Energia e Informação Sem Fio (<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i>)
TDMA	Acesso Mltiplo por Diviso de Tempo (<i>Time Division Multiple Access</i>)
TS	Comutação no Tempo (<i>Time Switching</i>)

UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
URLLC	Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência (<i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communications</i>)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WET	Transferência de energia sem fio (<i>Wireless Energy Transfer</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Fator de alocação de tempo
D	Nó destino
Δ	Parâmetro do desvanecimento FTR
d_{AB}	Distância do enlace entre os nós A e B
D_x	Coordenada x do nó destino
D_y	Coordenada y do nó destino
$E[\cdot]$	Esperança matemática
ε	Expoente de perda de percurso
η	Fator de eficiência de conversão de energia
E_{SWIPT}	Energia captada na fase SWIPT
E_{WET}	Energia captada na fase WET
$\lfloor \cdot \rfloor$	Função piso
$\mathcal{G}$	Fator de amplificação do protocolo AF
g_{AB}	Ganho de canal para o enlace entre os nós $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$
γ	SNR fim-a-fim instantânea recebida
γ_{e2e}	SINR fim-a-fim instantânea recebida
γ_s	SNR transmitida pela fonte
γ_{th}	Limiar alvo de SNR instantânea recebida para a probabilidade de <i>outage</i>
h	Altura de voo do VANT
h_{AB}	Coeficiente complexo do canal para o enlace entre os nós A e B
K	Parâmetro do desvanecimento FTR
L	Comprimento do bloco de retransmissão
λ	Comprimento de Onda
m	Parâmetro da distribuição Gamma com média unitária
N_0	Potência do ruído AWGN
N	Número de retransmissores
$n_D(t)$	Componente do ruído em D no instante t
$n_R(t)$	Componente de ruído em R no instante t
$\Omega_{\mathcal{A}\mathcal{B}}$	Ganho médio do canal para o enlace entre os nós $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$
ϕ	Fase aleatória uniformemente distribuída
P	Potência total disponível no sistema
p^{LOS}	Probabilidade de propagação com linha de visada
p^{NLOS}	Probabilidade de propagação sem linha de visada

P_{out}	Probabilidade de <i>outage</i> do sistema
P_{out}^{e2e}	Probabilidade de <i>outage</i> para rede de salto duplo
P_R	Potência transmitida do nó retransmissor
P_S	Potência transmitida do nó fonte
ρ	Fator de divisão de potência
R	VANT retransmissor
R_x	Coordenada x do VANT (ou retransmissor)
S	Nó fonte da rede
S_x	Coordenada x do nó fonte
S_y	Coordenada y do nó fonte
T	Intervalo de tempo
T_a	Atraso de processamento inerente ao modo de retransmissão FD
θ	Ângulo de elevação do VANT
V	Componente especular do desvanecimento FTR
X	Variável aleatória Gaussiana de média zero e variância σ^2
$x_R(t)$	Sinal retransmitido por R no instante t
$x_S(t)$	Sinal da informação transmitido por S no instante t
Y	Variável aleatória Gaussiana de média zero e variância σ^2
$y_D(t)$	Sinal recebido em D no instante t
$y_R(t)$	Sinal recebido em R no instante t
ζ	Variável aleatória de distribuição Gamma com média unitária

TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR

- D. P. Mucin, e E. E. B. Olivo, “*Desempenho de outage de redes assistidas por VANT operando em modo full duplex sob desvanecimento fluctuating two-ray e SWIPT,*” em Proc. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT’20), Florianópolis, SC, Brasil, Nov. 2020.

OUTROS TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR

- E. G. Gomes, D. P. Mucin, e E. E. B. Olivo, “*Simulação e caracterização estatística de canais de desvanecimento do tipo fluctuating two-ray,*” em Proc. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT’20), Florianópolis, SC, Brasil, Nov. 2020.
- D. P. Mucin, E. E. B. Olivo, e D. P. M. Osorio, “*Análise de outage para redes cooperativas-cognitivas com seleção oportunista e parcial de relays full duplex,*” em Proc. XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT’19), Petrópolis, RJ, Brasil, Out. 2019.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	TRABALHOS RELACIONADOS	18
1.3	CONTRIBUIÇÕES	20
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	COMUNICAÇÕES COOPERATIVAS	23
2.1.1	Protocolos de Retransmissão	24
2.1.2	Modos de Retransmissão	26
2.1.2.1	<i>Cancelamento de SI</i>	26
2.2	CAPTAÇÃO DE ENERGIA (EH)	28
2.3	TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE ENERGIA E INFORMAÇÃO SEM FIO (SWIPT)	29
3	MODELO DO SISTEMA E DE SINAIS	31
3.1	MODELO DO SISTEMA	31
3.1.1	Modelo de Desvanecimento <i>Fluctuating Two-Ray</i>	31
3.1.2	Parâmetros de Altitude do VANT e Probabilidade de Propagação LOS	34
3.1.3	Esquema de Transmissão de Informação e Transferência de Energia	35
3.2	ANÁLISE DE SINAIS	37
4	ANÁLISE DE <i>OUTAGE</i>	40
4.1	ANÁLISE APROXIMADA	41
4.2	ANÁLISE ASSINTÓTICA	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

6	CONCLUSÕES	52
6.1	TRABALHOS FUTUROS	52
	Apêndice A – Cálculo da probabilidade de <i>outage</i> aproximada	53
	Apêndice B – Cálculo da probabilidade de <i>outage</i> assintótica	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados o contexto das redes móveis celulares atuais e as perspectivas para as redes futuras, em que a Seção 1.1 introduz a motivação deste trabalho; a Seção 1.2 apresenta trabalhos relacionados com o tema estudado; a Seção 1.3 apresenta as contribuições deste trabalho; e a Seção 1.4 elenca a organização deste trabalho.

1.1 MOTIVAÇÃO

Recentemente, as comunicações sem fio baseadas em veículos aéreos não tripulados (VANTs), popularmente denominados drones, têm recebido especial atenção da comunidade científica. Isso se deve ao fato dos VANTs apresentarem características específicas, tais como: facilidade em realizar manobras; capacidade de permanecerem estáveis em altitudes precisas; além de baixos custos de aquisição e manutenção (LI; FEI; ZHANG, 2018; TARIQ *et al.*, 2020).

No âmbito das redes móveis de quinta geração e de gerações futuras (5G, 5G & Beyond), em que se espera prover um suporte robusto a um número massivo de dispositivos em uma área limitada (mMTC, *massive machine-type communications*); a maiores taxas de transmissão de dados (eMBB, *enhanced mobile broadband*); a comunicações ultra confiáveis e de baixíssima latência (URLLC, *ultra-reliable and low-latency communications*); e a maior eficiência energética (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016; HENRY; ALSOHAILY; SOUSA, 2020; POKHREL *et al.*, 2020), prevê-se que os VANTs sejam introduzidos como nós retransmissores, no contexto de comunicações cooperativas) que, ao transmitir além de sua própria informação e aquela proveniente de outros nós da rede, possibilitarão uma comunicação confiável e de longa distância entre um nó transmissor e outro receptor em ambientes com sombreamento severo, populosos ou até mesmo em cenários de catástrofe (MOZAFFARI *et al.*, 2019; ATIF *et al.*, 2021).

Quanto às técnicas cooperativas, dois protocolos de retransmissão são amplamente conhecidos, a saber: decodifica-e-encaminha (DF, *decode-and-forward*) (OLIVO *et al.*, 2015), em que o retransmissor decodifica as informações da fonte e então as recodifica antes de enviá-las ao destino; e amplifica-e-encaminha (AF, *amplify-and-forward*) (OSORIO *et al.*, 2017), em que o retransmissor apenas amplifica o sinal recebido de uma fonte, com ganho fixo ou variável, e depois o envia ao destino, exigindo menor complexidade de implementação quando comparado ao protocolo DF, enquanto mantém um desempenho comparável na região de média para alta relação sinal-ruído (SNR, *signal-to-noise ratio*). Além disso, os nós retransmissores podem operar em dois modos de retransmissão: *half duplex* (HD) e *full duplex* (FD). O modo FD

proporciona eficiência espectral aprimorada, uma vez que o retransmissor é capaz de receber e retransmitir simultaneamente as informações da fonte no mesmo canal de tempo-frequência, recuperando assim a perda em eficiência espectral inerente ao modo HD, que requer canais de tempo-frequência não sobrepostos para a transmissão e recepção de informações (OLIVO *et al.*, 2016). Porém, a penalidade neste caso advém da autointerferência (SI, *self-interference*) sofrida na antena receptora do retransmissor a partir de sua própria antena transmissora, em decorrência da retransmissão simultânea. Nesse sentido, as técnicas de mitigação de SI têm sido objeto de vários esforços de pesquisa baseados em propagação nos domínios analógico e digital (DUARTE; DICK; SABHARWAL, 2012; KORPI *et al.*, 2017).

Por outro lado, em busca de melhorar a eficiência energética em redes 5GB, a transferência de energia sem fio (WET, *wireless energy transfer*) pode ser usada para permitir que os dispositivos colem energia de sinais de rádio frequência (RF) (HUANG; XING; WANG, 2017). Além disso, técnicas de transferência simultânea de energia e informação sem fio (SWIPT, *simultaneous wireless information and power transfer*) têm sido propostas para fornecer um ganho de eficiência espectral além do obtido em eficiência energética, pois neste caso os dispositivos são capazes de dividir a energia do sinal de RF recebido em duas partes: uma para captação de energia (EH, *energy harvesting*) e um para decodificação de informações (EGASHIRA *et al.*, 2019). Neste contexto, duas técnicas são comumente utilizadas: comutação no tempo (TS, *time switching*), em que diferentes intervalos de tempo são alocados para EH e outro para decodificação de informação; e divisão no domínio da potência (PS, *power splitting*), em que o sinal de RF recebido é dividido em dois fluxos com diferentes níveis de potência, um dos quais é enviado a um circuito retificador para EH e outro é convertido em um sinal de banda base para decodificação de informação (KRIKIDIS *et al.*, 2014).

Em vista disso, as redes sem fio assistidas por VANT usando SWIPT têm recebido especial atenção da comunidade científica, pois o uso combinado de comunicações cooperativas e técnicas de SWIPT pode melhorar simultaneamente a confiabilidade, a eficiência espectral e a eficiência energética do sistema (vide, por exemplo, (ERNEST *et al.*, 2019; ZHENG *et al.*, 2019; Jayakody *et al.*, 2020)).

Além disso, a fim de atingir taxas de dados mais elevadas e atender aos requisitos de grandes volumes de tráfego de dados, a comunicação na faixa das ondas milimétricas é um viabilizador chave para este fim, devido à grande largura de banda disponível nesta parte do espectro de rádio frequência. No entanto, como desvantagem, os sinais na faixa das ondas milimétricas são mais sensíveis à atenuação da propagação do sinal e ao bloqueio deste por obstáculos. Neste sentido, as comunicações por ondas milimétricas podem ser auxiliadas por VANTs operando em uma certa altura, a fim de estender o alcance da transmissão e até mesmo fornecer um enlace de linha de visada (LOS, *line-of-sight*) entre o transmissor e o receptor (XIAO; XIA; XIA, 2016). Neste contexto, o modelo de desvanecimento *fluctuating two-ray* (FTR), recentemente

proposto em (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017), demonstrou fornecer um ajuste muito melhor em medições de campo para comunicações por ondas milimétricas, quando comparado com os modelos de desvanecimento Rayleigh e *Rician* (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017; SAMIMI *et al.*, 2016). De fato, o modelo de desvanecimento FTR é um modelo de canal estatístico generalizado que inclui as distribuições Rayleigh, *Rician*, Nakagami-*m*, Hoyt e *Rician Shadowed* como casos particulares, entre outros. Dessa forma, o modelo de desvanecimento FTR permite caracterizar uma ampla heterogeneidade de cenários de desvanecimento com e sem linha de visada (NLOS, *non-line-of-sight*), sendo um modelo adequado e versátil para comunicações assistidas por VANT operando na faixa de frequência das ondas milimétricas (ZHENG *et al.*, 2019).

1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Quanto às redes sem fio assistidas por VANT, em (ERNEST *et al.*, 2019), uma análise de desempenho em termos da probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa assistida por um VANT HD com uma estação terrestre FD foi realizada para canais com desvanecimento *Rician shadowed*, que é um dos casos particulares do modelo de desvanecimento FTR ¹. No entanto, nesse trabalho, o uso de técnicas SWIPT não foi considerado.

Em (YANG *et al.*, 2018), a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa assistida por um VANT HD-AF com EH em um ambiente urbano foi avaliada. Nesse trabalho, os cenários de propagação LOS e NLOS foram caracterizados pelos desvanecimentos *Rician shadowed* e Rayleigh, respectivamente. Os autores observaram que nos cenários com alta SNR, a probabilidade de *outage* correspondente ao caso LOS é muito menor do que a correspondente ao caso NLOS e que ao elevar a altura de voo do VANT, a probabilidade de transmissão LOS é dominante e o desempenho do sistema também é aprimorado, enquanto que ao continuar com a elevação da altura de voo, o desempenho começa a se degradar devido ao maior efeito da perda de percurso no sistema. Contudo, esse trabalho considerou apenas o modo de retransmissão HD do VANT e, conseqüentemente, a eficiência espectral do sistema cai pela metade quando comparada com cenários em que se considera modo de retransmissão FD.

Por outro lado, em (ZHENG *et al.*, 2019), a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa assistida por um VANT operando sob os protocolos de retransmissão AF e DF com SWIPT foi analisada em canais de desvanecimento FTR. Nesse trabalho, os autores observaram que ao selecionar valores ótimos dos parâmetros do modelo de desvanecimento FTR, o desempenho do sistema avaliado pode ser aprimorado significativamente. Além disso, constataram que há um valor ótimo para o fator de alocação de tempo da técnica SWIPT, de modo que o desempe-

¹ Ambos os modelos de desvanecimento são responsáveis por qualquer flutuação de amplitude nas componentes especulares (uma única componente especular no caso do modelo de desvanecimento *Rician shadowed*), como resultado de, por exemplo, dispersores em movimento rápido ou distúrbios eletromagnéticos na condição de propagação (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017).

nho do sistema também apresente ganhos significativos. No entanto, consideraram-se apenas o modo de retransmissão HD e, conseqüentemente, a eficiência espectral do sistema foi reduzida à metade quando comparada ao modo de retransmissão FD.

Em (Jayakody *et al.*, 2020), o desempenho de uma rede cooperativa assistida por um VANT FD operando sob o protocolo DF com SWIPT foi avaliado em termos da probabilidade de *outage* em canais de desvanecimento do tipo Rayleigh. Nesse sentido, foi proposta uma estratégia de retransmissão baseada em WET, na qual inicialmente é alocado um intervalo de tempo para alimentação sem fio do VANT desde a fonte, a fim de melhorar a vida útil da bateria e, conseqüentemente, seu tempo de voo, e, em um segundo intervalo de tempo, o VANT executa SWIPT com EH do enlace de autointerferência residual. Foi demonstrado pelos autores que a estratégia de retransmissão proposta apresentou ganhos de desempenho quando comparada com as estratégias de retransmissão tradicionais. No entanto, nesse trabalho considerou-se que os enlaces entre fonte e VANT e entre VANT e destino estão sujeitos a desvanecimento do tipo Rayleigh, assumindo portanto que não há linha de visada entre o VANT e os demais nós da rede, o que é esperado ocorrer com menor probabilidade em cenários práticos, já que a presença de linha de visada é uma das principais motivações para o uso de comunicações assistidas por VANTs.

Também, em (PERERA *et al.*, 2020), analisou-se a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa assistida por um VANT FD sob o protocolo DF e que utiliza da técnica SWIPT. Nesse trabalho, considerou-se a mesma estratégia de retransmissão de (Jayakody *et al.*, 2020), no entanto, foi considerado que os enlaces entre fonte e VANT e entre VANT e destino estão sujeitos a desvanecimento do tipo Nakagami- m . Os autores demonstraram que para determinados valores do parâmetro m do modelo de desvanecimento Nakagami- m , o desempenho em termos da probabilidade de *outage* do sistema avaliado pode ser aprimorado significativamente. Contudo, nesse trabalho não foram avaliados os impactos do protocolo AF no desempenho da rede. Além disso, o modelo de desvanecimento FTR, que apresenta um melhor ajuste a medições de campo para comunicações baseadas em ondas milimétricas, não foi considerado.

Em (JI *et al.*, 2020), foi avaliado o desempenho em termos da probabilidade de *outage* do sigilo de uma rede cooperativa cognitiva² assistida por múltiplos VANTs HD operando sob o protocolo DF com EH e um destino com múltiplas antenas. Nesse trabalho, considerou-se que todos os nós da rede experienciam desvanecimento Nakagami- m . Os autores demonstraram que o desempenho do sistema pode ser amplamente aprimorado com o aumento no número de VANTs cooperativos. Demonstrou-se que o desempenho também melhora ao aumentar o número de antenas do destino, contudo, nesse caso o desempenho tende a estabilizar, a partir de um determinado número de antenas para os diferentes cenários explorados. No entanto, esse

²As 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 (HAYKIN, 2005).

trabalho considerou apenas o modo de retransmissão HD e o uso de SWIPT não foi considerado; consequentemente, diminuindo a eficiência espectral geral da rede quando comparado com o caso em que se considera cenários com retransmissão FD com o uso de SWIPT.

Recentemente, em (LI; ZHAO, 2021), solucionou-se um problema de maximização da taxa de transmissão de dados, a fim de otimizar, por meio de um algoritmo, as potências de transmissão dos usuários secundários e de um VANT cooperativo HD em uma rede cooperativa cognitiva operando sob o protocolo DF com EH, considerando quatro trajetórias fixas. Nesse trabalho, foi considerado que os enlaces terrestres-aéreos são LOS, nos quais considera-se que os canais são modelados pela perda de percurso para caracterizar os efeitos de grande escala e pelo desvanecimento *Rician* para caracterizar os efeitos de pequena escala. Os autores concluíram que as simulações para as quatro trajetórias fixas demonstram que o algoritmo de controle de potência proposto pode efetivamente otimizar a taxa de transmissão da rede secundária, protegendo a comunicação da rede primária. Porém, nesse trabalho não foi considerado o modo de retransmissão FD para o VANT e o uso de SWIPT, como em (JI *et al.*, 2020), o que diminui a eficiência espectral da rede quando comparada com o caso em que se considera FD e SWIPT.

Mais recentemente, em (LE *et al.*, 2021), as expressões fechadas e exatas da probabilidade de *outage* e da taxa de transmissão foram derivadas para um sistema de localização sem fio baseado em um VANT HD-DF com EH. Considerou-se o canal de desvanecimento Nakagami-*m* para caracterizar os efeitos de pequena escala e o canal de sombreamento Lognormal para caracterizar os efeitos de grande escala. No entanto, nesse trabalho não foi utilizada a técnica SWIPT e o modo de retransmissão FD e, consequentemente, a eficiência espectral da rede não foi totalmente explorada, uma vez que o VANT FD usando SWIPT permite maiores ganhos em eficiência espectral.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Apesar das importantes contribuições dos trabalhos apresentados até o momento, o entendimento de limites fundamentais de desempenho para redes cooperativas assistidas por VANT com alimentação sem fio sob canais em ondas milimétricas ainda está aberto para investigação. Este trabalho procura contribuir nesse contexto. Em particular, considera-se uma configuração de rede que consiste em uma fonte que se comunica com um destino, auxiliada por um VANT com alimentação sem fio. Nesta configuração, assume-se que o VANT opera no modo de retransmissão FD e sob o protocolo AF. O modelo de canal FTR é considerado para caracterizar os efeitos de desvanecimento na faixa de frequência das ondas milimétricas. Motivados por (Jayakody *et al.*, 2020), a fim de melhorar a eficiência espectral e energética do sistema, considera-se que cada bloco de transmissão é composto por duas fases consecutivas: (i) uma fase WET para alimentar o VANT por meio de sinais de RF vindos da fonte e (ii) uma fase SWIPT baseada em PS para permitir que o VANT simultaneamente colete energia e decodi-

fique informações do sinal da fonte, bem como realize auto-reciclagem de energia a partir de seu enlace de autointerferência, inerente ao modo de operação FD. Além disso, não há literatura abordando o estudo de redes sem fio assistidas por VANT FD operando sob o protocolo AF com SWIPT sobre canais FTR ³. A seguir estão listadas as principais contribuições deste trabalho:

- É obtida uma expressão analítica para a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR, *signal-to-interference-plus-noise ratio*) fim-a-fim instantânea recebida.
- Uma expressão em forma integral para a probabilidade de *outage* aproximada do sistema considerado é derivada e sua acurácia verificada por simulações numéricas para diferentes casos ilustrativos. Vale ressaltar que o problema sob estudo mostra-se bastante complexo, tendo em vista a complexidade do modelo do sistema, como será detalhado posteriormente.
- Para reduzir a complexidade computacional do resultado analítico aproximado mencionado anteriormente, uma expressão compacta e de forma fechada para a probabilidade de *outage* é derivada de uma análise assintótica em regime de alta SNR.
- O impacto dos principais parâmetros do sistema no desempenho *outage* é investigado, incluindo o fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT, o ganho médio do canal de autointerferência e os parâmetros do modelo de desvanecimento FTR.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os demais capítulos deste trabalho são apresentados abaixo, em que:

- O Capítulo 2 apresenta a fundamentação de alguns conceitos-chave para a compreensão do trabalho.
- O Capítulo 3 apresenta o modelo do sistema e a caracterização do modelo de sinais, a partir do qual a SINR fim-a-fim instantânea recebida para a rede considerada é obtida.
- Em seguida, a probabilidade de *outage* é investigada no Capítulo 4 por meio das análises aproximada e assintótica.
- O Capítulo 5 ilustra os resultados numéricos para os cenários considerados, que validam as análises anteriores.
- Finalmente, o Capítulo 6 conclui este trabalho.

³Como mencionado anteriormente, tem-se que em (Jayakody *et al.*, 2020) os autores abordaram uma rede cooperativa assistida por VANT FD baseada no protocolo DF sobre desvanecimento de Rayleigh

Notação: Ao longo deste trabalho, utiliza-se $f_X(\cdot)$ e $F_X(\cdot)$ para denotar a função densidade de probabilidade (PDF, *probability density function*) e a função de distribuição acumulada (CDF, *cumulative distribution function*) de uma variável aleatória X , respectivamente, $E[\cdot]$ para denotar a esperança matemática, $\Pr[\cdot]$ para denotar probabilidade, e “ $\simeq$ ” para denotar a equivalência assintótica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos e cenários relacionados ao problema abordado neste trabalho. Em particular, as Seções 2.1, 2.2 e 2.3 fornecem uma breve revisão dos conceitos relativos às técnicas de comunicações cooperativas, de EH e de SWIPT, respectivamente, sendo estes, conceitos-chave para a compreensão deste trabalho.

2.1 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 (TSE; VISWANATH, 2005).

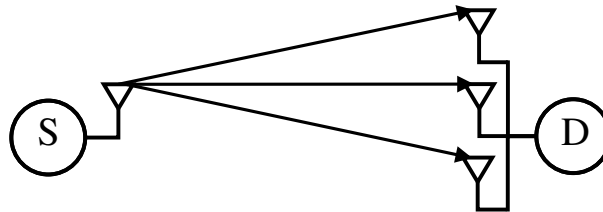
Devido às variações do sinal recebido, decorrentes do desvanecimento, é possível que um sistema de comunicações sem fio não suporte determinada taxa de transmissão sem erros com 100% de confiabilidade. Dessa maneira, a fim de comparar diferentes esquemas de comunicação em termos de sua confiabilidade, métricas como a probabilidade de *outage* são utilizadas. Define-se a probabilidade de *outage* como a probabilidade da SNR fim-a-fim instantânea recebida, γ_{e2e} , estar abaixo de um dado limiar γ_{th} , ou seja (GOLDSMITH, 2005)

$$P_{out} = \Pr(\gamma_{e2e} < \gamma_{th}). \quad (1)$$

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 descorrelacionadas e possam ser combinadas de uma maneira conveniente, melhorando portanto, o desempenho da

rede. Na Figura 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.

Figura 1 - Esquema de diversidade espacial, com múltiplas antenas espacialmente distribuídas no receptor D.



Fonte: Próprio autor.

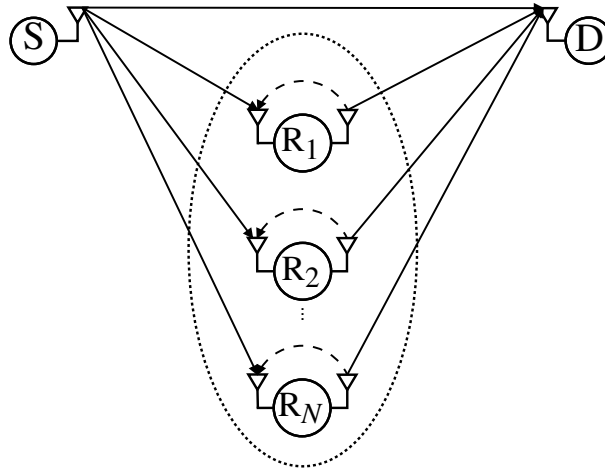
No entanto, este esquema de diversidade espacial apresenta como desvantagem o espaço físico limitado, principalmente em dispositivos como sensores em redes do tipo mMTC, o que restringe a quantidade de antenas que podem ser espacialmente distribuídas nos mesmos. Sendo assim, as redes cooperativas são utilizadas para combater a limitação de espaço imposta por esses dispositivos, 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 antenas é emulado e diferentes réplicas do sinal de interesse são obtidas por meio dos diversos nós retransmissores espacialmente distribuídos, criando assim um novo tipo de diversidade espacial. A Figura 2 apresenta uma arquitetura de rede cooperativa, em que N nós retransmissores espacialmente distribuídos, R_n , para $n = 1, \dots, N$, 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 (OLIVO *et al.*, 2016), já que a informação pode ser transmitida para o destino D por diferentes caminhos independentes, tanto diretamente desde a fonte S, quanto pelos N nós retransmissores espacialmente distribuídos.

2.1.1 Protocolos de Retransmissão

Dois protocolos de retransmissão são amplamente conhecidos no contexto das redes cooperativas, a saber (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004):

- **Amplifica-e-Encaminha (AF):** Neste protocolo o retransmissor 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 retransmissor utiliza um fator de amplificação, em que, a depender de suas características, o protocolo

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



Fonte: Próprio autor.

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 o retransmissor; (ii) de ganho fixo semi cego, em que o fator de amplificação assume um valor fixo, função dos valores médios do enlace fonte-retransmissor; 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 (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004).

- **Decodifica-e-Encaminha (DF):** 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, porém ao custo de uma maior complexidade de implementação quando comparado com o protocolo AF, pois no DF o retransmissor detecta, decodifica a informação vinda do nó fonte e a codifica novamente para retransmiti-la ao nó destino (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004).

Vale reforçar que, apesar do protocolo AF ser mais simples em termos de implementação prática, ele apresenta um desempenho comparável ao do protocolo DF na região de média para alta SNR.

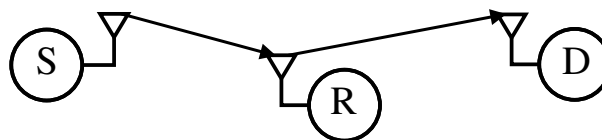
2.1.2 Modos de Retransmissão

Os nós retransmissores podem operar basicamente em dois modos de retransmissão, a saber:

- **Modo de retransmissão *half duplex* (HD):** No modo de retransmissão HD, o retransmissor 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 Figura 3 apresenta uma topologia de rede cooperativa com dois saltos (*dual hop*) em que se faz uso de um retransmissor 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 retransmissor do tipo HD.



Fonte: Próprio autor.

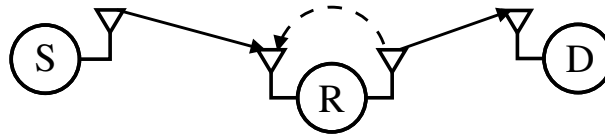
- **Modo de retransmissão *full duplex* (FD):** No modo de retransmissão FD, o retransmissor recebe e retransmite a informação de maneira simultânea e na mesma banda de frequência, permitindo recuperar a perda de eficiência espectral inerente ao modo HD (KIM; LEE; HONG, 2015). No entanto, o ganho em eficiência espectral do modo FD é obtido à custa da SI sofrida na antena receptora do retransmissor, a partir de sua própria antena transmissora, como consequência da retransmissão simultânea.

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

2.1.2.1 Cancelamento de SI

Várias técnicas de cancelamento de SI inerente ao modo de retransmissão FD têm sido propostas e discutidas na literatura, envolvendo métodos passivos seguidos de esquemas ativos de cancelamento analógicos e digitais, por exemplo. De maneira geral, os esquemas analógicos ativos mitigam a SI por inversão de sinais, usando *hardware* extra na geração dos sinais

Figura 4 - Cenário cooperativo de dois saltos com um retransmissor do tipo FD.



Fonte: Próprio autor.

de cancelamento. No entanto, apesar de fornecer uma mitigação de SI suficiente para sistemas com retransmissores AF, o mesmo não ocorre para outros cenários, como no caso de redes com retransmissores DF. Dessa forma, os esquemas digitais ativos são promissores pelo fato de que podem suprimir ativamente a SI residual que eventualmente escape dos circuitos de cancelamento passivo e analógico, por meio de técnicas complexas e avançadas de processamento digital de sinais, o que pode tornar o cancelamento digital mais custoso (NWANKWO *et al.*, 2018). Vale ressaltar que nenhuma das técnicas que serão apresentadas cancelam a SI por completo, sendo que devido a imperfeições no processo de cancelamento, uma SI residual ainda permanece.

Comumente, três técnicas de cancelamento passivo de SI são utilizadas:

- **Separação de antenas:** Trata-se da técnica mais comum para alcançar a mitigação de SI a nível de antena. Requer distâncias maiores entre as antenas para que haja uma supressão suficiente de SI, por meio do aumento da perda de percurso entre as antenas transmissora e receptora e da exploração de obstáculos próximos no bloqueio de enlaces diretos (MA *et al.*, 2009; LIU *et al.*, 2015).
- **Posicionamento de antenas:** Esta técnica envolve duas antenas transmissoras espaçadas entre si com a antena de recepção colocada entre elas nas distâncias d e $d + \lambda/2$, respectivamente, em que d é a distância entre as antenas transmissoras e a antena de recepção e λ é o comprimento de onda da frequência de operação, de tal forma que as antenas transmissoras são capazes de sobrepor um nulo na antena de recepção e, portanto, se cancelam. A técnica de posicionamento de antenas utiliza o fato de que a distância entre antenas transmissoras e receptoras reduz naturalmente a SI devido à atenuação do sinal. A mitigação de SI é feita por meio de deslocamento de fase (KIM; LEE; HONG, 2015).
- **Polarização cruzada:** É uma técnica de cancelamento de SI que aumenta o isolamento entre as antenas transmissora e receptora eletromagneticamente (LIU *et al.*, 2015). A polarização de uma antena determina a direção e o sentido do vetor de campo elétrico radiado pela antena. Idealmente, a energia radiada entre duas polarizações ortogonais é nula, o que indica que a máxima energia ocorrerá entre duas antenas se suas polarizações forem iguais e reduzirá quando houver um descasamento de polarização. A fim de mitigar

a SI inerente ao modo de retransmissão FD, utilizam-se polarizações ortogonais entre as antenas transmissora e receptora, a fim de aumentar o isolamento de energia das antenas.

Quanto às técnicas de cancelamento ativo de SI, tem-se as seguintes:

- **Cancelamento analógico:** Esquemas de cancelamento de SI analógicos geralmente mitigam a SI no circuito de recepção analógico ao subtrair uma cópia da SI estimada do sinal recebido antes de entrar no circuito digital, isto é, antes do conversor analógico-digital (ADC, *analog-to-digital converter*). O esquema envolve o espelhamento do sinal de transmissão primário e a obtenção do sinal de transmissão auxiliar (cópia do sinal transmitido com atraso, fase e ajustes de ganho) que é ajustado antes de ser adicionado ao sinal de recepção imediatamente antes do ADC. Esses esquemas podem ser classificados como adaptativos (capazes de ajustar seus parâmetros de acordo com o sinal de transmissão auxiliar e de mitigar os sinais de SI (EVERETT; SAHAI; SABHARWAL, 2014)) ou não adaptativos (requerem ajuste manual e utilizam parâmetros fixos), dependendo de suas habilidades para responder às mudanças nos efeitos do ambiente.
- **Cancelamento digital:** Esquema de cancelamento de SI utilizado em cenários em que é necessária a decodificação da informação dos sinais recebidos. Nesse sentido, esquemas com cancelador digital de SI (DSC, *digital self interference canceller*) e transmissão por *beamforming* (formatação de feixe) são utilizados no domínio digital para mitigar a SI residual que possa ter sido negligenciada nas fases de cancelamento passiva e analógica. O esquema com DSC estima a SI residual após as mitigações passiva e analógica e subtrai esse sinal estimado das amostras de banda base recebidas no domínio digital (LIOLIOU *et al.*, 2010). Na técnica de *beamforming* de recepção, um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, *multiple input multiple output*) é considerado, caso em que a SI é suprimida ao ajustar de forma adaptativa o peso por antena de acordo com a condição do canal de SI (LE *et al.*, 2020).

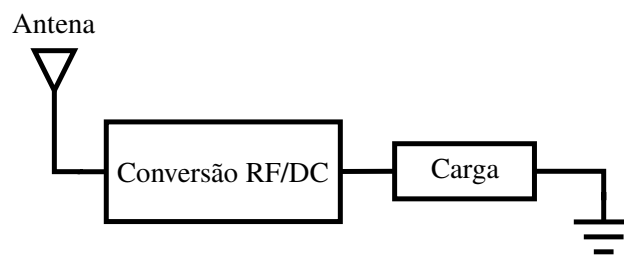
2.2 CAPTAÇÃO DE ENERGIA (EH)

A técnica de EH consiste na obtenção de energia elétrica a partir de fontes de energia externa, tais como energia térmica, eólica e de rádio frequência (RF) (HUANG; XING; WANG, 2017). Dentre estas, a captação de energia a partir de sinais de RF por meio da técnica WET pode auxiliar quanto aos requisitos de eficiência energética das redes 5GB, uma vez que as ondas de RF estão universalmente presentes em uma faixa cada vez maior de frequências e níveis de potência, especialmente em áreas urbanas altamente povoadas e portanto, representam uma fonte amplamente disponível de energia, se puder ser captada de maneira eficiente (OSTAFFE *et al.*, 2017).

Duas arquiteturas de EH são usualmente consideradas: (i) arquitetura de captação-uso de energia e (ii) arquitetura de captação-armazenamento-uso de energia, mais detalhadas a seguir:

- **Arquitetura de captação-uso:** Neste tipo de arquitetura, a energia captada é utilizada diretamente para fornecer potência aos nós sem fio sem nenhum armazenamento da energia, conforme mostrado na Figura 5. O sistema captura a energia das fontes disponíveis com o auxílio de uma antena, que pode ser projetada para operar em uma única frequência ou em múltiplas frequências, para que o sistema de EH possa captar energia de uma única fonte de energia RF ou de múltiplas fontes de energia RF, respectivamente. Após capturar a energia, o sistema de EH a converte em energia elétrica (converte em sinais de corrente contínua por meio de circuitos retificadores (ALEVIZOS; BLETSAS, 2018)) e fornece a energia elétrica convertida para o nó sem fio, que a utiliza para realizar suas operações (MIKEKA; ARAI, 2011).

Figura 5 - Representação em diagrama de blocos de um dispositivo de captação de energia sem a unidade de gerenciamento de energia.



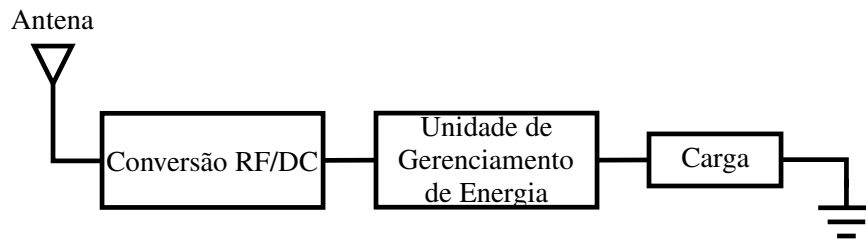
Fonte: Próprio autor.

- **Arquitetura de captação-armazenamento-uso:** Nesta arquitetura, há uma unidade de gerenciamento de energia que armazena a energia elétrica convertida (por meio de circuitos com bancos de capacitores (ALEVIZOS; BLETSAS, 2018)) nos casos em que ela é superior ao consumo do nó sem fio, conforme apresentado na Figura 6. Essa energia armazenada pode ser utilizada posteriormente, quando a energia captada é menor que a quantidade mínima de operação do nó, ou quando um aumento no uso de energia é requerido para elevar o desempenho do nó sem fio (SUDEVALAYAM; KULKARNI, 2011).

2.3 TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE ENERGIA E INFORMAÇÃO SEM FIO (SWIPT)

A técnica SWIPT possibilita a transferência simultânea de energia e informação sem fio ao dividir a energia do sinal recebido em duas partes: uma para EH e outra para decodificação da informação. Para tanto, duas técnicas são comumente utilizadas, a saber

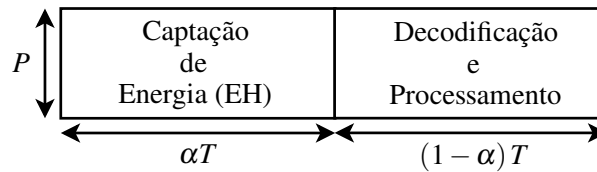
Figura 6 - Representação em diagrama de blocos de um dispositivo de captação de energia com unidade de gerenciamento de energia.



Fonte: Próprio autor.

- **Comutação no tempo (TS, *time switching*):** A Figura 7 apresenta um diagrama para exemplificação da técnica TS, que consiste na alocação de um intervalo de tempo, αT , para EH e outro para a transmissão de informação, $(1 - \alpha)T$, sendo que em ambos os intervalos a potência utilizada é P .

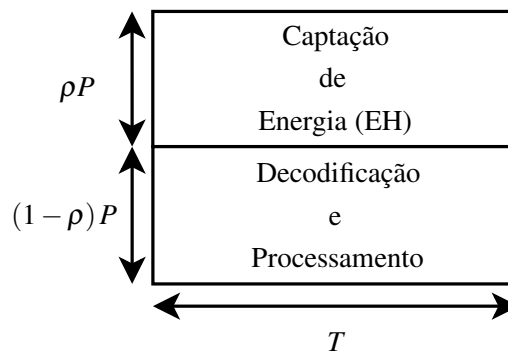
Figura 7 - Diagrama para exemplificação da técnica TS.



Fonte: Próprio autor.

- **Divisão no domínio da potência, (PS, *power splitting*):** A Figura 8 apresenta um diagrama para exemplificação da técnica PS, que consiste em separar o sinal recebido em dois fluxos com níveis diferentes de potência, sendo que um, ρP , é enviado para um circuito retificador para EH e o outro, $(1 - \rho)P$, é convertido em um sinal de banda base para decodificação e processamento da informação (KRIKIDIS *et al.*, 2014), sendo que ambos os fluxos de potência ocorrem no mesmo período, T .

Figura 8 - Diagrama para exemplificação da técnica PS.



Fonte: Próprio autor.

3 MODELO DO SISTEMA E DE SINAIS

3.1 MODELO DO SISTEMA

Considere uma rede cooperativa como mostrado na Figura 9, consistindo de uma fonte (S), um destino (D) e um VANT FD-AF atuando como um retransmissor (R) para auxiliar na comunicação entre S e D. Assume-se que o enlace direto $S \rightarrow D$ se encontra severamente atenuado devido à presença de obstáculos e, portanto, a comunicação entre S e D é possível unicamente através do enlace de cooperação por meio de R. Considera-se que todos os nós da rede possuem uma antena, com exceção do VANT, que é equipado com duas antenas (uma para transmissão e outra para recepção), a fim de viabilizar o modo de retransmissão FD. Denota-se por h_1 e h_2 os coeficientes de canal dos enlaces $S \rightarrow R$ (estação terrestre-VANT ou primeiro salto) e $R \rightarrow D$ (VANT-destino ou segundo salto), respectivamente, que são considerados estarem sujeitos a desvanecimento FTR, sendo variáveis aleatórias independentes e não identicamente distribuídas (i.n.i.d., *independent and non-identically distributed*), e h_{SI} o coeficiente de canal da SI residual no VANT em modo de retransmissão FD. Nesse sentido, destaca-se que, embora a componente LOS entre as antenas de transmissão e recepção no VANT possa ser fortemente atenuada após estágios de cancelamento de SI (passivo/ativo), permanece uma SI residual devido a imperfeições no processo de cancelamento, de modo que assume-se que o enlace de SI residual experimenta desvanecimento Rayleigh (DUARTE; DICK; SABHARWAL, 2012). Além disso, considera-se que todos os nós experimentam ruído Gaussiano branco aditivo (AWGN, *additive white Gaussian noise*) com potência média N_0 em seus receptores. Mais detalhes e conceitos básicos sobre o modelo do sistema são fornecidos nas próximas subseções.

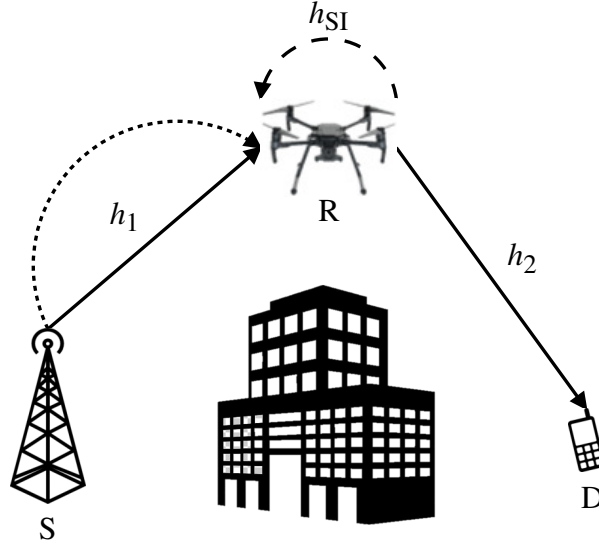
3.1.1 Modelo de Desvanecimento *Fluctuating Two-Ray*

De acordo com esse modelo, o coeficiente complexo de canal h_i , $i \in \{1; 2\}$ é composto por duas componentes especulares com amplitudes $V_{i,1}$ e $V_{i,2}$ e fases aleatórias $\phi_{i,1}$ e $\phi_{i,2}$, respectivamente, somadas a uma componente difusa que caracteriza a propagação por multipercursos, isto é (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017)

$$h_i = \sqrt{\zeta_i} V_{i,1} \exp(j\phi_{i,1}) + \sqrt{\zeta_i} V_{i,2} \exp(j\phi_{i,2}) + X_i + jY_i, \quad (2)$$

em que $\phi_{i,1}$ e $\phi_{i,2}$ são fases aleatórias uniformemente distribuídas, tal que $\phi_{i,1}, \phi_{i,2} \sim \mathcal{U}[0, 2\pi)$; $X_i + jY_i$ é a componente difusa, em que X_i e Y_i são variáveis aleatórias Gaussianas de média zero e variância σ_i^2 , ou seja, $X_i, Y_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$; e ζ_i é uma variável aleatória de distribuição Gamma

Figura 9 - Modelo do sistema (transmissão de informação: linha sólida; transferência de energia sem fio: linha pontilhada; sinal de interferência: linha tracejada.)



Fonte: Próprio autor.

com média unitária, sendo sua PDF dada por (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017)

$$f_{\zeta_i}(x) = \frac{m_i^{m_i} x^{m_i-1}}{\Gamma(m_i)} e^{-m_i x}, \quad (3)$$

em que o parâmetro m_i caracteriza a flutuação das componentes especulares, sendo mais ou menos acentuada conforme o valor de m_i diminui ou aumenta, respectivamente. O modelo FTR depende dos seguintes parâmetros

$$K_i = \frac{(V_{i,1}^2 + V_{i,2}^2)}{2\sigma_i^2}, \quad (4)$$

$$\Delta_i = \frac{2V_{i,1}V_{i,2}}{(V_{i,1}^2 + V_{i,2}^2)}, \quad (5)$$

em que K_i é a razão entre a potência média das componentes especulares e a potência da componente difusa de multipercurso e $0 \leq \Delta_i \leq 1$ representa a similaridade entre as potências médias recebidas das componentes especulares, tal que, para $\Delta_i = 1$, as magnitudes dessas componentes são iguais e, para $\Delta_i = 0$, uma das duas componentes é nula. Além disso, o ganho médio de canal para o modelo FTR é dado por

$$\Omega_i = E\{g_i\} = 2\sigma_i^2(1 + K_i), \quad (6)$$

em que $g_i = |h_i|^2$ denota o ganho de canal correspondente. Como mencionado no Capítulo 1, o modelo de desvanecimento FTR é um modelo de canal estatístico generalizado, que possui

diversas distribuições como casos particulares, de acordo com a combinação dos parâmetros FTR. A Tabela 1 (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017) apresenta esses casos particulares do modelo de desvanecimento FTR e as respectivas combinações dos parâmetros FTR, em que os parâmetros FTR são sublinhados para diferenciá-los dos casos especiais.

Tabela 1 - Relações entre o desvanecimento FTR e outros modelos de desvanecimento da literatura. Os parâmetros FTR são sublinhados para diferenciá-los dos casos especiais.

Canais	Parâmetros do modelo FTR
<i>One-sided Gaussian</i>	a) $\underline{\Delta}=0, \underline{K} \rightarrow \infty, \underline{m}=0,5$ b) $\underline{\Delta}=1, \underline{K} \rightarrow \infty, \underline{m}=1$
Rayleigh	a) $\underline{\Delta}=0, \underline{K} \rightarrow \infty, \underline{m}=1$ b) $\underline{\Delta}=0, \underline{K}=0, \forall \underline{m}$
Nakagami- q (Hoyt)	a) $\underline{\Delta}=0, \underline{K}=\frac{1-q^2}{2q^2}, \underline{m}=0,5$ b) $\forall \{\Delta, K\}$, com $q=\sqrt{\frac{1+K(1-\Delta)}{1+K(1+\Delta)}}$, $\underline{m}=1$
Nakagami- m	$\underline{\Delta}=0, \underline{K} \rightarrow \infty, \underline{m}=m$
<i>Rician</i>	$\underline{\Delta}=0, \underline{K}=K, \underline{m} \rightarrow \infty$
<i>Rician shadowed</i>	$\underline{\Delta}=0, \underline{K}=K, \underline{m}=m$
<i>Two-wave with diffuse power</i>	$\underline{\Delta}=\Delta, \underline{K}=K, \underline{m} \rightarrow \infty$
<i>Two-wave</i>	$\underline{\Delta}=\Delta, \underline{K} \rightarrow \infty, \underline{m} \rightarrow \infty$
<i>Fluctuating two-wave</i>	$\underline{\Delta}=\Delta, \underline{K} \rightarrow \infty, \underline{m}=m$

Fonte: Informações obtidas em (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017).

A PDF e a CDF do ganho de um canal sobre desvanecimento FTR são fornecidas, respectivamente, por (BADARNEH; COSTA, 2019, Eqs. (18) e (19))

$$f_{g_i}(x) = \frac{\left(\frac{m_i}{K_i}\right)^{m_i}}{\Gamma(m_i)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_i, \Delta_i, m_i)}{j!} \frac{x^j \exp\left(-\frac{x}{2\sigma_i^2(\Omega_i, K_i)}\right)}{\Gamma(j+1) (2\sigma_i^2(\Omega_i, K_i))^{j+1}}, \quad (7)$$

$$F_{g_i}(x) = \frac{\left(\frac{m_i}{K_i}\right)^{m_i}}{\Gamma(m_i)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_i, \Delta_i, m_i)}{j! \Gamma(j+1)} \gamma\left(j+1, \frac{x}{2\sigma_i^2(\Omega_i, K_i)}\right), \quad (8)$$

em que $\gamma(\cdot, \cdot)$ é a função gamma incompleta (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2015, Eq. (8.350.1))

e

$$\tau_j(K_i, \Delta_i, m_i) = \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} \sum_{l=0}^k \binom{k}{l} \sum_{n=0}^w (-1)^{2n+2l-k} \left(\frac{\Delta_i}{2}\right)^{2n+2l} \chi(n, w, 2l-k) \Gamma(\lambda) \left(1 + \frac{m_i}{K_i}\right)^{-\lambda}, \quad (9)$$

em que $\chi(n, w, 2l-k) = \frac{\Gamma(w+n)}{\Gamma(n+1)\Gamma(w-n+1)} \frac{w^{1-2n}}{\Gamma(2l-k+n+1)}$ e $\lambda = j + 2l - k + 2n + m$.

Observação 1. Ressalta-se que o modelo de desvanecimento FTR foi introduzido pela primeira vez em (ROMERO-JEREZ et al., 2017), junto com uma caracterização estatística detalhada das expressões da PDF e da CDF correspondentes. Em vista da versatilidade e adequação deste modelo para cenários de comunicações por ondas milimétricas, alguns trabalhos têm direcionado seus esforços em propor expressões simplificadas para a PDF e a CDF (ZHANG et al., 2017; BADARNEH; COSTA, 2019). Em particular, os autores em (ZHANG et al., 2017) forneceram novas expressões analíticas exatas para a PDF e a CDF do modelo de desvanecimento FTR. No entanto, essas expressões foram fornecidas em termos de funções especiais, mais especificamente, as funções de Legendre de primeira espécie (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2015, Eq. (8.702)), que não são funções integradas na maioria dos softwares de computação padrão, como Matlab. Alternativamente, os autores em (BADARNEH; COSTA, 2019) derivaram expressões analíticas exatas para a PDF e a CDF de um produto de N variáveis aleatórias FTR independentes, incluindo o caso $N=1$ (para um único salto). Convenientemente, as expressões nesse trabalho, revisitadas em (7) e (8), foram obtidas em termos de funções elementares. Utiliza-se, portanto, essas expressões nas análises deste trabalho.

Como mencionado acima, os enlaces $S \rightarrow R$ e $R \rightarrow D$ experimentam desvanecimento FTR i.n.i.d., caracterizado pelas funções de distribuição em (7) e (8), enquanto que o enlace de SI residual é considerado experimentar desvanecimento do tipo Rayleigh — sendo um caso particular do modelo de desvanecimento FTR, para $\Delta_i=0$ e $K_i=0$ (vide Tabela 1). Assim, a PDF e a CDF do ganho de canal g_{SI} no enlace de SI residual são dadas por

$$f_{g_{SI}}(x) = \frac{1}{\Omega_{SI}} \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{SI}}\right), \quad (10)$$

$$F_{g_{SI}}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{SI}}\right). \quad (11)$$

3.1.2 Parâmetros de Altitude do VANT e Probabilidade de Propagação LOS

Considera-se que S, R e D estão dispostos em uma topologia tridimensional e que $(S_x; S_y; S_z)$, $(R_x; h; R_z)$, e $(D_x; D_y; D_z)$ são suas coordenadas, respectivamente, com h denotando a altura de voo do VANT a partir do solo. A distância entre o VANT e os nós terrestres é dada pela distância Euclidiana e o ângulo de elevação do VANT com relação a um nó terrestre, θ , é obtido

por

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h}{R_x} \right). \quad (12)$$

A probabilidade de que haja uma propagação LOS entre o VANT e um nó terrestre pode ser aproximada por (HOLIS; PECHAC, 2008)

$$P_{\text{LOS}} \approx a - \frac{a - b}{1 + \left(\frac{\theta - c}{d} \right)^e}, \quad (13)$$

em que a , b , c , d e e são parâmetros empíricos para quatro ambientes típicos: (i) suburbano; (ii) urbano; (iii) urbano denso; e (iv) urbano com arranha-céus, cujos valores são dados na Tabela 2 (HOLIS; PECHAC, 2008). Consequentemente, a probabilidade de propagação NLOS é dada por

$$P_{\text{NLOS}} = 1 - P_{\text{LOS}}. \quad (14)$$

Tabela 2 - Parâmetros empíricos para probabilidade de LOS em diferentes cenários.

	a	b	c	d	e
Suburbano	101,6	0	0	3,25	1,241
Urbano	120,0	0	0	24,30	1,229
Urbano Denso	187,3	0	0	82,10	1,478
Urbano com Arranha-Céus	352,0	-1,37	-53	173,80	4,670

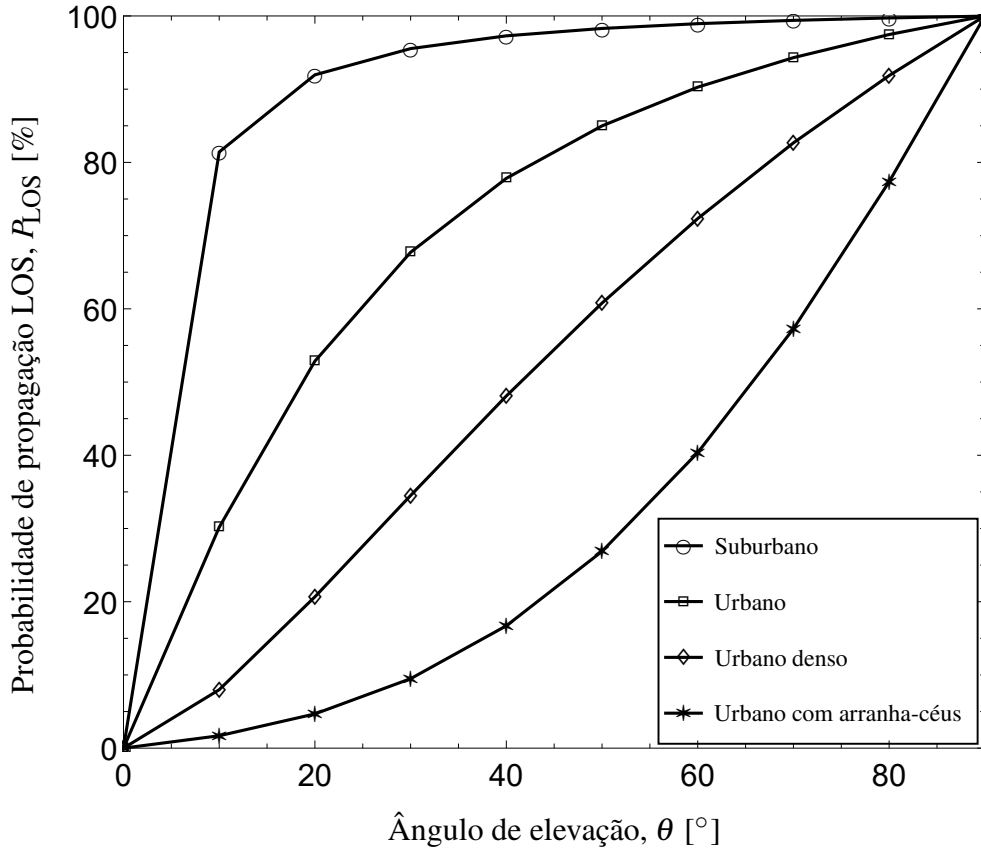
Fonte: Dados obtidos em (HOLIS; PECHAC, 2008).

A Figura 10 apresenta a probabilidade de propagação LOS em função do ângulo de elevação para os cenários apresentados na Tabela 2.

3.1.3 Esquema de Transmissão de Informação e Transferência de Energia

Com o intuito de melhorar a eficiência energética do sistema e assumindo um esquema de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA, *time division multiple access*), considera-se que cada processo de comunicação ocorre em um intervalo de tempo, T , que é composto por duas fases com duração determinada por um fator de alocação de tempo, $\alpha \in (0; 1)$, conforme ilustrado na Figura 11: (i) fase WET, na qual R é energizado por sinais de RF a partir de S durante um subintervalo de tempo αT , com potência de transmissão total disponível em S, P_S ; e (ii) fase SWIPT, em que a técnica PS é usada para transferência simultânea de informação e energia de S para R, enquanto R encaminha as informações para D (uma vez que o VANT opera em modo FD) e autorrecicla a energia do enlace de SI; sendo que todo esse processo ocorre

Figura 10 - Probabilidade de propagação LOS em função do ângulo de elevação para ambientes selecionados.



Fonte: Próprio autor.

durante um subintervalo de tempo $\bar{\alpha}T$, em que $\bar{\alpha} = 1 - \alpha$. Nessa última fase, uma porção ρ da potência recebida em R é usada para decodificação de informação, em que $\rho \in (0; 1)$ é o fator de divisão de potência da fase SWIPT, enquanto uma porção $\bar{\rho} = 1 - \rho$ da potência total recebida em R proveniente dos sinais de S e do enlace de SI é usada para EH e autorreciclagem de energia, respectivamente. Enquanto isso, a potência de transmissão total disponível em R, P_R , é usada para retransmitir informações para D.

Considerando isso, a energia transferida para o VANT durante a fase WET é dada por

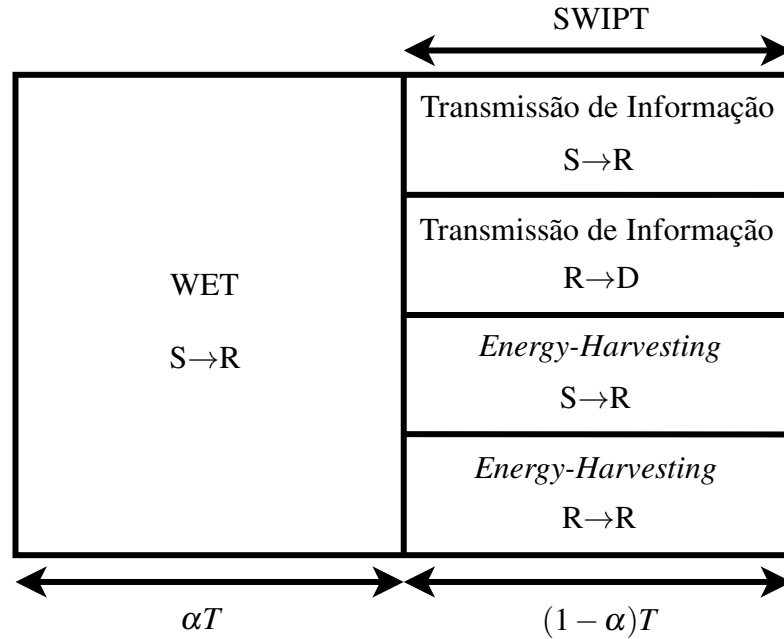
$$E_{\text{WET}} = \eta \alpha T P_{\text{Sg1}}, \quad (15)$$

em que $\eta \in (0; 1]$ é o fator de eficiência de conversão de energia. Já na fase SWIPT, a energia captada pelo VANT a partir de S e do enlace de SI residual é dada por

$$E_{\text{SWIPT}} = \eta \bar{\rho} \bar{\alpha} T (P_{\text{Sg1}} + P_{\text{RgSI}}), \quad (16)$$

em que P_R é dado pela razão entre a energia total captada durante as fases WET e SWIPT e a

Figura 11 - Esquema de transmissão do sistema, em que α denota um fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT.



Fonte: Próprio autor.

duração da transmissão de informação, ou seja

$$\begin{aligned}
 P_R &= \frac{E_{\text{WET}} + E_{\text{SWIPT}}}{(1 - \alpha) T} \\
 &= \frac{\eta P_S g_1}{1 - \eta \bar{\rho} g_{\text{SI}}} \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} + \bar{\rho} \right).
 \end{aligned} \tag{17}$$

3.2 ANÁLISE DE SINAIS

Com base no modelo de sistema introduzido na Seção 3.1, nesta seção uma análise de sinal é desenvolvida a fim de determinar a SINR fim-a-fim instantânea recebida. Tem-se que o sinal de informação recebido no VANT durante a fase SWIPT (no intervalo $\bar{\alpha} T$) é dado por

$$y_R(t) = h_1 \sqrt{\rho P_S} x_S(t) + h_{\text{SI}} \sqrt{\rho P_R} x_R(t) + n_R(t), \tag{18}$$

em que $x_S(t)$ é o sinal de informação transmitido por S; $x_R(t) = \mathcal{G} y_R(t - T_a)$ é o sinal retransmitido por R, com $\mathcal{G}$ sendo o fator de amplificação do protocolo AF e T_a sendo o atraso de processamento inerente ao modo de retransmissão FD, de forma que os sinais recebidos e retransmitidos em R não estejam correlacionados (OSORIO *et al.*, 2015); e $n_R(t)$ é a componente de ruído em R. Usando (18) na definição de $x_R(t)$, por meio de substituições recursivas, este

pode ser reescrito como

$$\begin{aligned}
 x_R(t) &= \mathcal{G} \sum_{j=1}^L (h_{SI} \sqrt{\rho P_R} \mathcal{G})^{j-1} [h_1 \sqrt{\rho P_S} x_S(t - jT_a) + n_R(t - jT_a)] \\
 &= \mathcal{G} h_1 \sqrt{\rho P_S} x_S(t - T_a) + \mathcal{G} \sum_{j=2}^L (h_{SI} \sqrt{\rho P_R} \mathcal{G})^{j-1} [h_1 \sqrt{\rho P_S} x_S(t - jT_a) + n_R(t - jT_a)] \\
 &\quad + \mathcal{G} n_R(t - T_a),
 \end{aligned} \tag{19}$$

em que L é o comprimento do bloco de retransmissão. Assumindo sinais de potência unitária normalizados, isto é, $E\{|x_S(t)|^2\} = E\{|x_R(t)|^2\} = 1$, segue-se de (19) que

$$E\{|x_R(t)|^2\} = \mathcal{G}^2 \sum_{j=1}^L (g_{SI} \rho P_R \mathcal{G}^2)^{j-1} [g_1 \rho P_S + N_0], \tag{20}$$

em que $N_0 = E\{|n_R(t)|^2\}$ é a potência média do ruído. Então, para $\mathcal{G}^2 < [g_{SI} \rho P_R]^{-1}$, a série geométrica em (20) é convergente, de modo que, considerando $E\{|x_R(t)|^2\} = 1$, o fator de amplificação pode ser obtido como

$$\mathcal{G} = \sqrt{\frac{1}{g_1 \rho P_S + g_{SI} \rho P_R + N_0}}. \tag{21}$$

Por outro lado, o sinal de informação recebido em D é dado por

$$y_D(t) = h_2 \sqrt{P_R} x_R(t) + n_D(t), \tag{22}$$

em que $n_D(t)$ é a componente do ruído em D, com potência média $E\{|n_D(t)|^2\} = N_0$.

Substituindo (19) em (22), a potência média recebida em D pode ser obtida como

$$\begin{aligned}
 E\{|y_D(t)|^2\} &= \underbrace{\mathcal{G}^2 \rho P_S g_1 P_R g_2}_{\text{Sinal de interesse}} + \underbrace{\frac{\mathcal{G}^4 \rho P_R^2 g_2 g_{SI} (\rho P_S g_1 + N_0)}{1 - g_{SI} \rho P_R \mathcal{G}^2}}_{\text{Sinal de Autointerferência}} + \underbrace{N_0 (\mathcal{G}^2 P_R g_2 + 1)}_{\text{Sinal de Ruído}}.
 \end{aligned} \tag{23}$$

Então, a SINR fim-a-fim instantânea recebida, γ_{e2e} , pode ser obtida a partir de (23) como

$$\gamma_{e2e} = \frac{\mathcal{G}^2 \rho P_S g_1 P_R g_2}{\frac{\mathcal{G}^4 \rho P_R^2 g_2 g_{SI} (\rho P_S g_1 + N_0)}{1 - g_{SI} \rho P_R \mathcal{G}^2} + (\mathcal{G}^2 P_R g_2 + 1) N_0}. \tag{24}$$

Substituindo (17) e (21) em (24) e dividindo a expressão resultante por N_0^2 , obtém-se

$$\gamma_{e2e} = \frac{\frac{\rho \gamma_S g_1}{\frac{\rho \eta \gamma_S g_1 g_{SI}}{1 - \eta \rho g_{SI}} \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} + \bar{\rho} \right) + 1} \frac{\eta \gamma_S g_1 g_2}{1 - \eta \rho g_{SI}} \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} + \bar{\rho} \right)}{\frac{\rho \gamma_S g_1}{\frac{\rho \eta \gamma_S g_1 g_{SI}}{1 - \eta \rho g_{SI}} \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} + \bar{\rho} \right) + 1} + \frac{\eta \gamma_S g_1 g_2}{1 - \eta \rho g_{SI}} \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} + \bar{\rho} \right) + 1}, \tag{25}$$

em que $\gamma_S = P_S/N_0$ é a SNR transmitida pela fonte. Define-se

$$\beta(g_1, g_{SI}) \triangleq \frac{\eta \gamma_S g_1}{1 - \eta \bar{\rho} g_{SI}} \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} + \bar{\rho} \right), \quad (26)$$

tal que

$$X \triangleq \rho \gamma_S g_1, \quad (27)$$

$$Y \triangleq \beta(g_1, g_{SI}) g_2, \quad (28)$$

$$U \triangleq \rho \beta(g_1, g_{SI}) g_{SI}, \quad (29)$$

denotam a SNR instantânea recebida no primeiro salto, segundo salto, e enlace de SI, respectivamente. Assim, a SINR instantânea fim-a-fim recebida em (25) pode ser reescrita como

$$\gamma_{e2e} = \frac{\frac{XY}{U+1}}{\frac{X}{U+1} + Y + 1}. \quad (30)$$

A partir dessa expressão, a seguir, realiza-se uma análise de *outage* para o sistema em estudo.

4 ANÁLISE DE OUTAGE

Para a rede considerada, assistida por VANT FD alimentado por transferência de energia sem fio, sob desvanecimento FTR, a probabilidade de *outage* do sistema deve considerar os quatro casos possíveis em relação à probabilidade de existência ou não de linha de visada no primeiro salto e/ou segundo salto, podendo, portanto, ser definida como

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} = & P_{1,\text{LOS}}P_{2,\text{LOS}}P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(K_{1,\text{LOS}}, \Delta_{1,\text{LOS}}, m_{1,\text{LOS}}, K_{2,\text{LOS}}, \Delta_{2,\text{LOS}}, m_{2,\text{LOS}}) \\
 & + P_{1,\text{LOS}}P_{2,\text{NLOS}}P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(K_{1,\text{LOS}}, \Delta_{1,\text{LOS}}, m_{1,\text{LOS}}, K_{2,\text{NLOS}}, \Delta_{2,\text{NLOS}}, m_{2,\text{NLOS}}) \\
 & + P_{1,\text{NLOS}}P_{2,\text{LOS}}P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(K_{1,\text{NLOS}}, \Delta_{1,\text{NLOS}}, m_{1,\text{NLOS}}, K_{2,\text{LOS}}, \Delta_{2,\text{LOS}}, m_{2,\text{LOS}}) \\
 & + P_{1,\text{NLOS}}P_{2,\text{NLOS}}P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(K_{1,\text{NLOS}}, \Delta_{1,\text{NLOS}}, m_{1,\text{NLOS}}, K_{2,\text{NLOS}}, \Delta_{2,\text{NLOS}}, m_{2,\text{NLOS}}), \quad (31)
 \end{aligned}$$

em que os subscritos 1 e 2 são usados para se referir ao primeiro salto (enlace S→R) e ao segundo salto (enlace R→D), respectivamente; $P_{i,\text{LOS}}$ e $P_{i,\text{NLOS}}$ são as probabilidades de propagação LOS e NLOS no i -ésimo salto, $i \in \{1; 2\}$, dadas por (13) e (14); $K_{i,\text{LOS}}, \Delta_{i,\text{LOS}}, m_{i,\text{LOS}}$ e $K_{i,\text{NLOS}}, \Delta_{i,\text{NLOS}}, m_{i,\text{NLOS}}$ são os parâmetros de desvanecimento da função de distribuição FTR em (7), que são definidos de acordo com uma condição de propagação LOS e NLOS no i -ésimo salto, respectivamente; e $P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(\cdot, \dots, \cdot) = \Pr(\gamma_{\text{e2e}} < \gamma_{\text{th}})$ é a probabilidade de *outage* para a rede de salto duplo assistida por um retransmissor FD em estudo, com a SINR fim-a-fim instantânea recebida, γ_{e2e} , sendo fornecida em (30) e γ_{th} sendo uma SNR limiar de *outage*.

Observação 2. *Observe que os quatro termos na probabilidade de outage do sistema em (31) consideram cada uma das possibilidades de propagação LOS ou NLOS no primeiro e segundo saltos. Nesse contexto, é importante lembrar que o modelo de desvanecimento FTR leva em consideração uma ampla gama de cenários de desvanecimento, incluindo condições de propagação LOS e NLOS. Consequentemente, os três parâmetros de desvanecimento FTR (K_i, Δ_i, m_i) na probabilidade de outage $P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(\cdot, \dots, \cdot)$, correspondendo ao i -ésimo salto, $i \in \{1; 2\}$, podem ser definidos para uma dada condição de propagação LOS ou NLOS.*

A seguir será realizada a análise da probabilidade de *outage* $P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(\cdot, \dots, \cdot)$. Em vista da complexidade do sistema em estudo, uma análise exata de $P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(\cdot, \dots, \cdot)$ mostrou-se bastante complexa. Assim, na Seção 4.1, deriva-se uma aproximação em forma integral para a probabilidade de *outage*, que, mais importante, mostra-se altamente precisa com relação ao desempenho exato do sistema em toda a faixa de valores de SNR. Adicionalmente, com o objetivo de obter conclusões diretas sobre o desempenho do sistema, na Seção 4.2, realiza-se uma análise assintótica da probabilidade de *outage*, a partir da qual uma expressão em forma fechada é fornecida.

4.1 ANÁLISE APROXIMADA

Uma aproximação para a probabilidade de *outage* é obtida na seguinte proposição. Como será visto no Capítulo 5, esta aproximação caracteriza o desempenho exato do sistema com uma elevada precisão.

Proposição 1. *Uma expressão analítica aproximada para a probabilidade de outage de uma rede de dois saltos assistida por VANT FD alimentado por transferência de energia sem fio sob canais FTR é dada por*

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\text{e2e}}(K_1, \Delta_1, m_1, K_2, \Delta_2, m_2) &\approx \frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j! \Gamma(j+1)} \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{\text{SI}} \eta \bar{\rho}}\right) \right] \Gamma(j+1) + \frac{1}{[2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \left\{ \int_0^B v^j \right. \right. \\
&\quad \times \exp\left[-\left(\frac{C(v)}{\Omega_{\text{SI}}} + \frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right)\right] dv - \int_{\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{SP}}} }^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{C(v)}{\Omega_{\text{SI}}}\right) \right] v^j \\
&\quad \times \exp\left[-\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right] dv \left. \right\} + \frac{\left(\frac{m_2}{K_2}\right)^{m_2}}{\Gamma(m_2)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\tau_i(K_2, \Delta_2, m_2)}{i! \Gamma(i+1) [2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1} [2\sigma_2^2(\Omega_2, K_2)]^{i+1}} \\
&\quad \times \int_0^{\infty} \int_0^{D(v)} \left[1 - \exp\left(-\frac{E(v, x)}{\Omega_{\text{SI}}}\right) \right] v^j x^i \exp\left[-\left(\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)} + \frac{x}{2\sigma_2^2(\Omega_2, K_2)}\right)\right] dx dv \\
&\quad - \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{\text{SI}} \eta \bar{\rho}}\right) \right] \Gamma(j+1) + \frac{1}{[2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \left\{ \int_0^B v^j \exp\left[-\left(\frac{C(v)}{\Omega_{\text{SI}}} \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right)\right] dv - \int_{\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{SP}}} }^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{C(v)}{\Omega_{\text{SI}}}\right) \right] v^j \exp\left[-\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right] dv \left. \right\} \left. \right\} \\
&\quad \times \left\{ \frac{\left(\frac{m_2}{K_2}\right)^{m_2}}{\Gamma(m_2)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\tau_i(K_2, \Delta_2, m_2)}{i! \Gamma(i+1) [2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1} [2\sigma_2^2(\Omega_2, K_2)]^{i+1}} \int_0^{\infty} \int_0^{D(v)} \left[1 \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \exp\left(-\frac{E(v, x)}{\Omega_{\text{SI}}}\right) \right] v^j x^i \exp\left[-\left(\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)} + \frac{x}{2\sigma_2^2(\Omega_2, K_2)}\right)\right] dx dv \right. \\
&\quad \left. \left. + \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{\text{SI}} \eta \bar{\rho}}\right) \right\} \right\} + \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{\text{SI}} \eta \bar{\rho}}\right), \tag{32}
\end{aligned}$$

em que

$$B = \frac{\bar{\alpha} \gamma_{\text{th}} \bar{\rho}}{\gamma_{\text{SP}} (\alpha + \gamma_{\text{th}} - \bar{\alpha} \rho (1 + \gamma_{\text{th}}))}, \tag{33}$$

$$C(g_1) = \frac{-\bar{\alpha} (\gamma_{\text{th}} - g_1 \gamma_{\text{SP}})}{\eta (g_1 \bar{\alpha} \bar{\rho} \rho \gamma_{\text{SP}} + \gamma_{\text{th}} (-\bar{\alpha} + \rho - \alpha \rho + g_1 \gamma_{\text{SP}} \rho + g_1 \gamma_{\text{SP}} \rho^2 \bar{\alpha}))}, \tag{34}$$

$$D(g_1) = \frac{\gamma_{th} \bar{\alpha}}{g_1 \gamma_S \eta (\bar{\rho} + \alpha \rho)}, \quad (35)$$

e

$$E(g_1, g_2) = \frac{\gamma_{th} \bar{\alpha} + g_1 g_2 \eta \gamma_S (-\bar{\rho} - \alpha \rho)}{\bar{\alpha} \bar{\rho} \eta \gamma_{th}}. \quad (36)$$

Demonstração. Vide Apêndice A. □

4.2 ANÁLISE ASSINTÓTICA

A fim de obter melhores conclusões sobre o impacto de cada parâmetro do sistema no desempenho da comunicação, nesta seção é desenvolvida uma análise de *outage* na região de alta SNR, a partir da qual uma expressão em forma fechada é obtida como na proposição a seguir.

Proposição 2. *Uma expressão analítica assintótica em forma fechada para a probabilidade de outage de uma rede de dois saltos assistida por VANT FD alimentado por transferência de energia sem fio sob canais FTR é fornecida por*

$$P_{out}^{\infty} \simeq \exp \left[-\frac{\bar{\alpha}}{\Omega_{SI} \eta (\bar{\alpha} + \gamma_{th} - \bar{\alpha} \rho (1 + \gamma_{th}))} \right] - \exp \left[-\frac{2\bar{\alpha} + \gamma_{th} - \bar{\alpha} \rho (2 + \gamma_{th})}{\Omega_{SI} \eta \bar{\rho} (\bar{\alpha} + \gamma_{th} - \bar{\alpha} \rho (1 + \gamma_{th}))} \right] + \exp \left(-\frac{2}{\Omega_{SI} \eta \bar{\rho}} \right). \quad (37)$$

Demonstração. Vide Apêndice B. □

Observação 3. *Observe a partir de (37) que a probabilidade de outage assintótica depende apenas dos seguintes parâmetros do sistema: (i) fator de alocação de tempo, α , entre as fases WET e SWIPT; (ii) fator de divisão de potência, ρ , relativo à fase SWIPT; (iii) fator de eficiência de conversão de energia, η ; (iv) SNR limiar de outage, γ_{th} ; e (v) ganho médio do canal de SI residual, Ω_{SI} . Interessantemente, observe também que os parâmetros de desvanecimento FTR correspondentes ao primeiro e ao segundo salto não desempenham nenhum papel na probabilidade de outage na região de alta SNR. De fato, pode-se notar que a expressão em (37) caracteriza um patamar de outage, pois não depende da SNR transmitida. Como será mostrado no próximo capítulo, o ganho médio do canal Ω_{SI} no enlace de SI residual é um fator dominante na determinação desse patamar de outage.*

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, seis cenários ilustrativos são avaliados e simulações de Monte Carlo considerando 10^7 iterações são fornecidas para corroborar as derivações analíticas. Para tanto, considera-se uma topologia de rede tridimensional com distâncias normalizadas, em que a fonte, o VANT e o destino estão localizados nas coordenadas $(0;0;0)$, $(0,5;0,24;0)$ e $(1;0;0)$, respectivamente. Todas as distâncias são normalizadas em relação à distância entre S e D, d_{SD} ¹. Assume-se que o ganho médio do canal entre S e R e entre R e D é determinado pelo efeito da perda de percurso, sendo $\Omega_i = d_i^{-\varepsilon}$, $i \in \{1;2\}$, respectivamente, em que d_i é a distância Euclidiana entre os nós e $\varepsilon = 4$ é o expoente de perda de percurso. Além disso, o limiar alvo de SNR instantânea recebida para a probabilidade de *outage* é definido como $\gamma_{th} = 0$ dB.

Observação 4. *Entre os casos de uso potencial para redes sem fio assistidas por VANT, há o caso em que este está previsto para atuar como um retransmissor que se conecta a uma estação terrestre que fornece conectividade à rede central, ou como uma estação voadora que se conecta à rede central por meio de um backhaul sem fio, de modo a fornecer cobertura de forma rápida e econômica. Para obter maior proveito dessas configurações, o enlace $S \rightarrow R$ (estação terrestre-VANT ou primeiro salto) deve experimentar uma condição de LOS, enquanto o enlace $R \rightarrow D$ (VANT-destino ou segundo salto) pode estar sujeito às condições LOS ou NLOS. Assim, para ilustração, considerando a relevância deste cenário prático, a seguir, assume-se que o primeiro salto sempre está em uma condição de propagação LOS, ou seja, $P_{1,LOS} = 1$ e, conseqüentemente, $P_{1,NLOS} = 0$. Como resultado, a probabilidade de outage do sistema em (31) pode ser simplificada para*²

$$P_{out} = P_{2,LOS} P_{out}^{e2e}(K_{1,LOS}, \Delta_{1,LOS}, m_{1,LOS}, K_{2,LOS}, \Delta_{2,LOS}, m_{2,LOS}) + P_{2,NLOS} P_{out}^{e2e}(K_{1,LOS}, \Delta_{1,LOS}, m_{1,LOS}, K_{2,NLOS}, \Delta_{2,NLOS}, m_{2,NLOS}). \quad (38)$$

Como o modelo de desvanecimento FTR é um modelo estatístico generalizado, para a condição de propagação NLOS no segundo salto considera-se o caso particular de desvanecimento Nakagami- m , definindo os parâmetros de desvanecimento FTR para $K_{2,NLOS} \rightarrow \infty$ e $\Delta_{2,NLOS} = 0$, enquanto se considera valores arbitrários de $m_{2,NLOS}$ (vide Tabela 1). Por outro lado, para a condição de propagação LOS no i -ésimo salto, $i \in \{1;2\}$, considera-se dois casos particulares do

¹Considera-se um cenário prático em que a distância entre S e D é de 500 m e a altura de voo máxima do VANT é de 120 m do solo, de acordo com o regulamento da Agência de Segurança da Aviação da União Europeia (AGENCY, 2021).

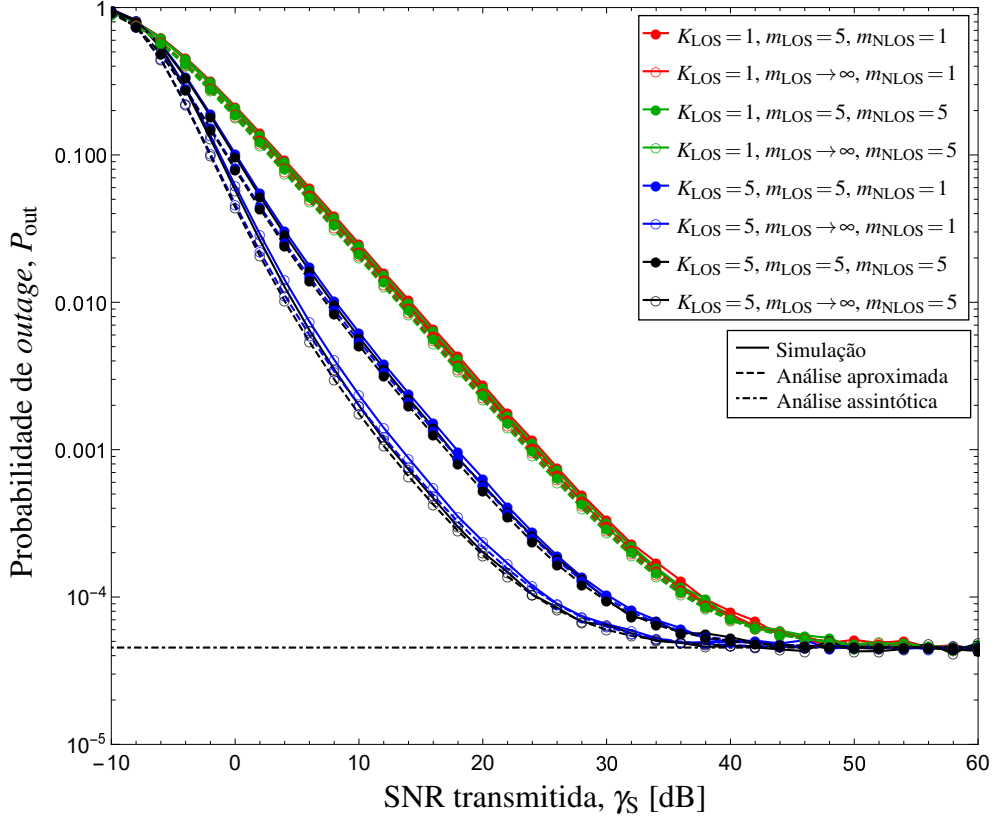
²Para o cálculo da expressão aproximada de $P_{out}^{e2e}(\cdot, \dots, \cdot)$ em (32), considera-se até 40 termos para a soma de i e j e até 5 termos para o somatório de n , em relação à avaliação da PDF do canal de desvanecimento FTR dada em (7).

modelo de desvanecimento FTR: (i) Desvanecimento *Rician shadowed*, definindo $\Delta_{i,LOS}=0$, enquanto considera valores arbitrários de $K_{i,LOS}$ e $m_{i,LOS}$; e (ii) desvanecimento *Rician*, definindo $\Delta_{i,LOS}=0$ e $m_{i,LOS}\rightarrow\infty$, enquanto se considera valores arbitrários de $K_{i,LOS}$. Além disso, para fins ilustrativos, considera-se $K_{i,LOS}=K_{LOS}$, $\Delta_{i,LOS}=\Delta_{LOS}$, $m_{i,LOS}=m_{LOS}$, de modo que a partir deste momento o subscrito i é retirado da notação dos parâmetros de desvanecimento FTR. Nos cenários ilustrativos apresentados neste capítulo, os parâmetros a , b , c , d e e , correspondentes à probabilidade de propagação LOS entre o VANT e o destino (segundo salto), são definidos de acordo com um cenário urbano, conforme apresentado na Tabela 2. Portanto, para a altura de voo máxima normalizada do VANT considerada neste trabalho, $h/d_{SD}=0,24$, tem-se que $P_{2,LOS}=87,88\%$ e $P_{2,NLOS}=12,12\%$.

A Figura 12 apresenta o desempenho de *outage* do sistema *versus* a SNR transmitida, γ_S , para diferentes valores dos parâmetros do canal em (38), em relação às condições de propagação LOS e LOS/NLOS no primeiro e segundo salto, respectivamente. Mais especificamente, considera-se $K_{LOS}\in\{1;5\}$, $\Delta_{LOS}=0$, $m_{LOS}=5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS}\in\{1;5\}$, $\Delta_{LOS}=0$, $m_{LOS}\rightarrow\infty$ (desvanecimento *Rician*) como condições de propagação LOS e $K_{NLOS}\rightarrow\infty$, $\Delta_{NLOS}=0$, $m_{NLOS}\in\{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) como condições de propagação NLOS. Assume-se $\alpha=0,5$ (ou seja, alocação de tempo igual entre as fases WET e SWIPT); $\rho=0,5$ (ou seja, divisão de potência igual entre EH e decodificação de informação no VANT); $\eta=0,5$ (eficiência de conversão de energia); e $\Omega_{SI}=-10$ dB (ganho médio do canal do enlace de SI residual). Observe a partir desta figura como a expressão aproximada obtida em (32) apresenta um bom ajuste para os resultados da simulação ao longo de toda a região de SNR transmitida, e como a expressão assintótica fornecida em (37) está em concordância perfeita com o desempenho exato na região de alta SNR transmitida, como esperado. Notadamente, observe que todas as curvas saturam no mesmo patamar de *outage* no regime de alta SNR, independentemente das condições do canal no primeiro e no segundo salto. Dessa forma, o desempenho do sistema é governado principalmente pelo efeito da SI residual em regime de alta SNR, como apresentado anteriormente na Observação 3.

Ainda na Figura 12, também é possível notar que, antes de atingir o patamar mínimo de *outage*, o impacto do parâmetro K_{LOS} no desempenho do sistema prevalece sobre os outros parâmetros do canal de desvanecimento FTR. De fato, o sistema apresenta uma melhoria significativa no desempenho à medida que K_{LOS} aumenta de 1 para 5. Além disso, para valores elevados de K_{LOS} , nota-se um ganho de desempenho do sistema com a variação do parâmetro m_{LOS} , quando comparado à variação de m_{NLOS} . Por exemplo, pode-se observar que, para os cenários com uma componente LOS mais forte ($K_{LOS}=5$), maiores ganhos de desempenho são obtidos para os cenários com $m_{LOS}\rightarrow\infty$ (ou seja, desvanecimento *Rician*), quando comparado aos casos em que $m_{LOS}=5$ (ou seja, desvanecimento *Rician shadowed*), enquanto que o desempenho do sistema melhora ligeiramente com um aumento de m_{NLOS} de 1 para 5.

Figura 12 - Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, γ_S , com $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS.

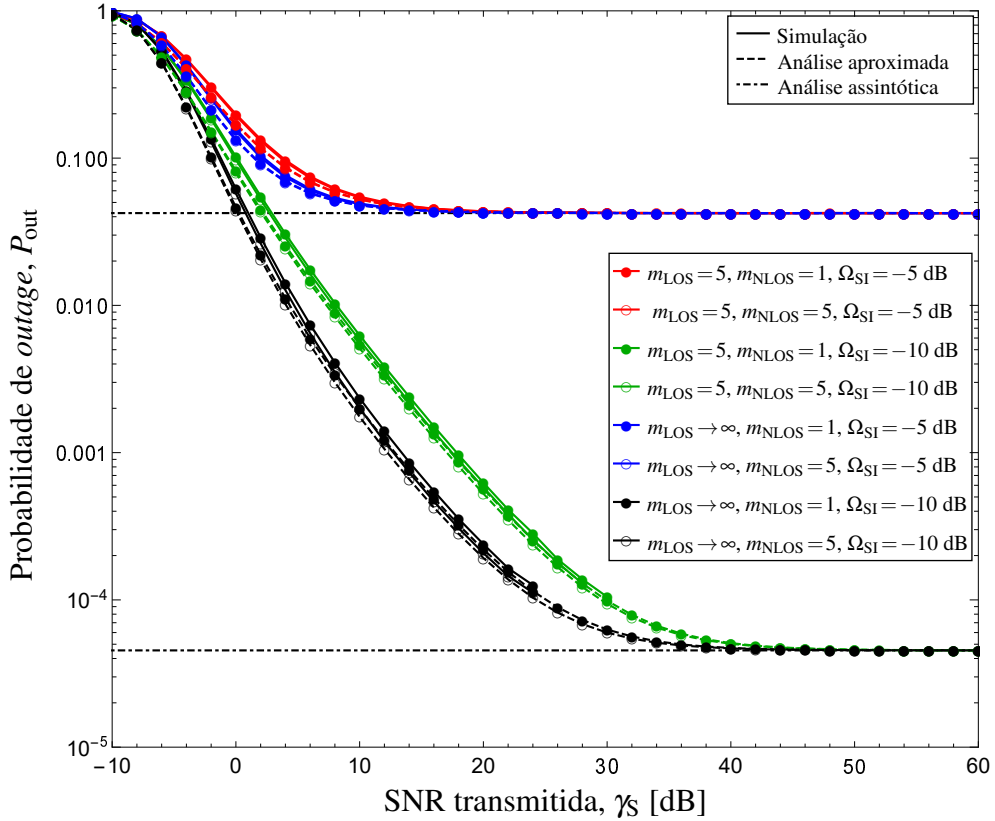


Fonte: Próprio autor.

A Figura 13 ilustra o efeito da SI residual inerente à operação do VANT FD no desempenho de *outage* do sistema, em que dois valores distintos de ganho médio de canal no enlace SI são considerados, $\Omega_{SI} = -5$ e -10 dB, para diferentes cenários de desvanecimento FTR, a saber: $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*); e $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS, e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. Os demais parâmetros do sistema são definidos como $\eta = 0,5$; $\rho = 0,5$ e $\alpha = 0,5$. Pode-se observar que, da mesma forma que na Figura 12, independentemente das condições do canal no primeiro e no segundo salto, o desempenho do sistema converge para níveis de patamares de *outage* governados pelo efeito da SI residual. Observe que uma diminuição no ganho médio de canal do enlace SI de $\Omega_{SI} = -5$ para -10 dB (ou seja, uma maior atenuação da SI residual) acarreta uma melhora significativa no desempenho do sistema. Observe também que o limite mínimo de *outage* é atingido com valores mais elevados de SNR transmitida à medida que Ω_{SI} diminui

(por exemplo, $\gamma_S \approx 40$ dB para $\Omega_{SI} = -10$ dB e $\gamma_S \approx 15$ dB para $\Omega_{SI} = -5$ dB). Além disso, para níveis mais baixos de SI residual (por exemplo, $\Omega_{SI} = -10$ dB), o efeito do parâmetro m_{LOS} do canal de desvanecimento FTR é mais perceptível quando comparado àquele com níveis mais altos de SI residual ($\Omega_{SI} = -5$ dB). Mais especificamente, pode-se observar uma melhora de desempenho superior à medida que m_{LOS} aumenta de 5 para ∞ para $\Omega_{SI} = -10$ dB, em relação à melhora de desempenho para $\Omega_{SI} = -5$ dB.

Figura 13 - Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, γ_S , para dois valores diferentes de $\Omega_{SI} = -5$ e -10 dB, com $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1; 5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS.

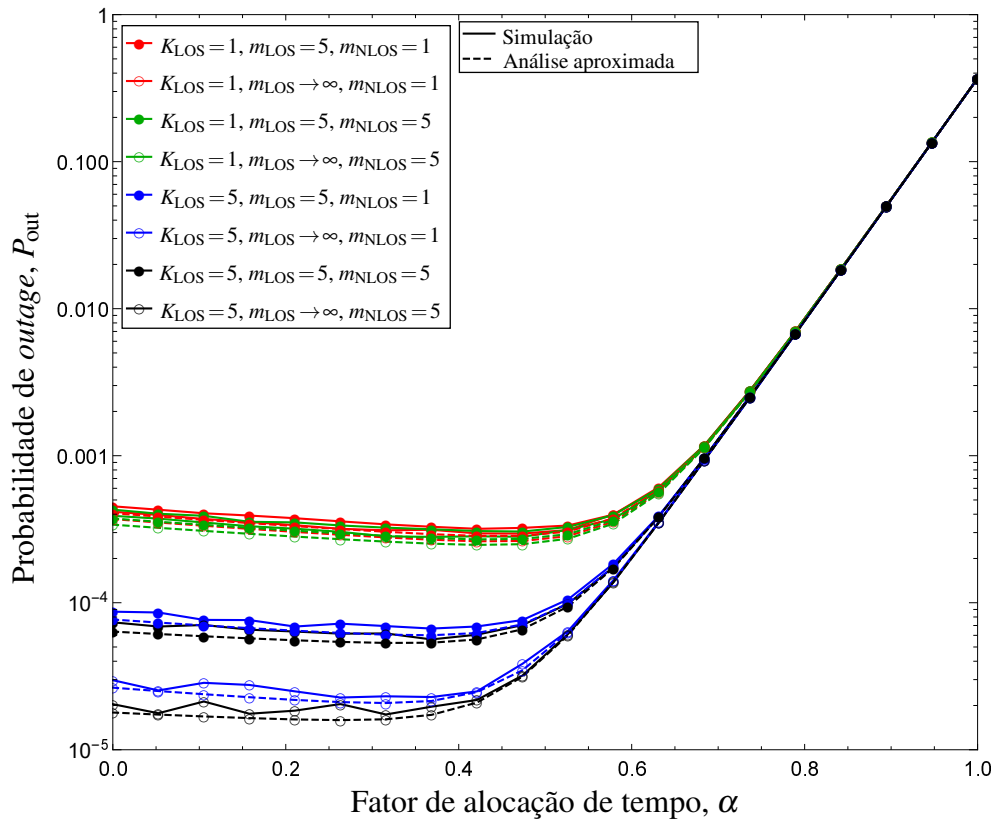


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 14, a probabilidade de *outage* do sistema *versus* o fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT, α , é apresentada considerando as mesmas configurações dos parâmetros de desvanecimento FTR da Figura 12. Define-se $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; e $\rho = 0,5$. Pode-se observar que, para valores de $\alpha > 0,7$, o desempenho do sistema se deteriora consideravelmente, independentemente das condições do canal (parâmetros de desvanecimento FTR) no primeiro e no segundo salto. Isso pode ser explicado pelo fato de que, neste caso, a

maior parte do tempo do processo de comunicação é alocada para a fase WET, de forma que a potência de transmissão disponível no VANT é maior (vide Eq. (17)). Como consequência, o VANT sofre de níveis mais elevados de SI residual na fase SWIPT, degradando assim o desempenho do sistema. Por outro lado, para valores de $\alpha < 0,7$, o efeito da SI residual diminui e o impacto das condições do canal no primeiro e no segundo salto pode ser notado. Nesse caso, o desempenho do sistema é coerente com o observado na Figura 12. Ou seja, uma melhora considerável de desempenho é alcançada com um aumento de K_{LOS} de 1 para 5, e os ganhos de desempenho do sistema são mais perceptíveis com a variação dos parâmetros de desvanecimento m_{LOS} e m_{NLOS} para valores mais elevados de K_{LOS} .

Figura 14 - Probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT, α , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{\text{SI}} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{\text{SD}} = 0,24$ ($P_{2,\text{LOS}} = 87,88\%$, $P_{2,\text{NLOS}} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{\text{LOS}} \in \{1;5\}$; $\Delta_{\text{LOS}} = 0$; $m_{\text{LOS}} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{\text{LOS}} \in \{1;5\}$; $\Delta_{\text{LOS}} = 0$; $m_{\text{LOS}} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{\text{NLOS}} \rightarrow \infty$; $\Delta_{\text{NLOS}} = 0$; $m_{\text{NLOS}} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS.

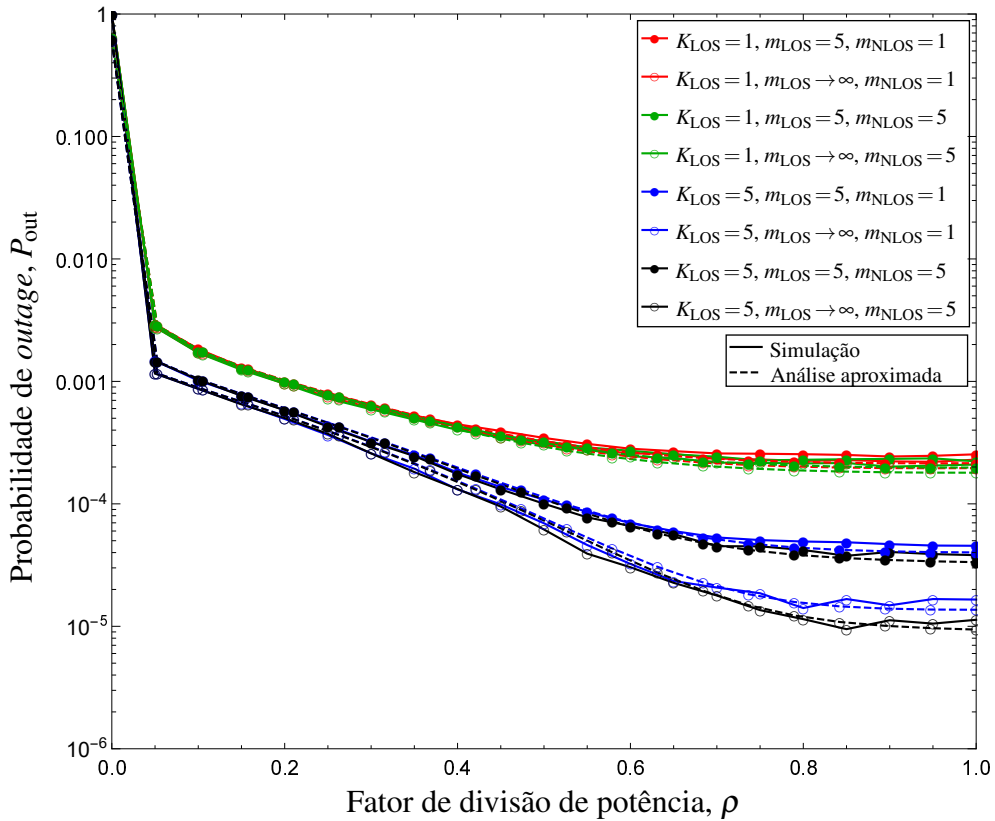


Fonte: Próprio autor.

A Figura 15 apresenta a probabilidade de *outage* do sistema *versus* o fator de divisão de potência na fase SWIPT, ρ , considerando as mesmas configurações dos parâmetros de desvanecimento FTR da Figura 12. Considera-se $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{\text{SI}} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; e $\alpha = 0,5$.

Pode-se observar que, para $\rho \approx 0$, o desempenho do sistema é severamente degradado, independentemente das condições de canal no primeiro e no segundo salto. Nesse caso, assim como para valores menores de ρ , a potência de transmissão disponível no VANT é maior, uma vez que a maior parte da potência recebida no VANT a partir de S e do enlace de SI na fase SWIPT é usada para EH, o que agrava o impacto da SI residual sobre o desempenho do sistema. Para valores mais elevados de ρ , o efeito da SI residual diminui e então pode-se notar um comportamento de desempenho do sistema coerente com o descrito nos cenários das Figuras 12 e 14, em relação ao impacto das condições do canal no primeiro e segundo salto.

Figura 15 - Probabilidade de *outage* vs. fator de divisão de potência na fase SWIPT, ρ , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS.

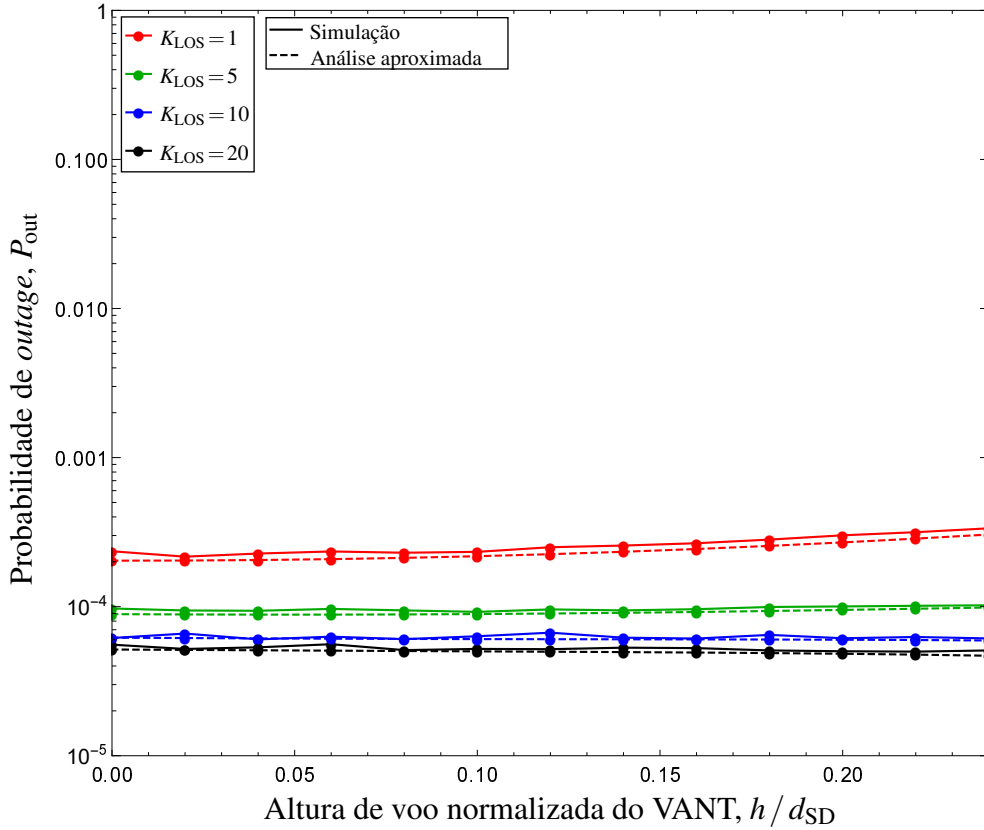


Fonte: Próprio autor.

A Figura 16 ilustra a probabilidade de *outage* do sistema pela altura de voo normalizada do VANT, h/d_{SD} , considerando os seguintes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5;10;20\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) como condição de propagação LOS, e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} = 1$ (desvanecimento Rayleigh, conforme Tabela 1) como con-

dição de propagação NLOS. Assume-se $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $\rho = 0,5$. Observe que o desempenho do sistema melhora à medida que K_{LOS} aumenta, conforme esperado, uma vez que as componentes LOS no primeiro e segundo salto tornam-se mais fortes. Curiosamente, observe que o desempenho do sistema permanece aproximadamente o mesmo à medida que a altura de voo normalizada do VANT aumenta. Isso pode ser explicado pelo fato de que, por um lado, $P_{2,LOS}$ dada como em (13) é maior à medida que a altura de voo normalizada aumenta, mas por outro lado, o efeito da perda de percurso também aumenta com a distância entre o VANT e os nós terrestres.

Figura 16 - Probabilidade de *outage* vs. altura de voo normalizada do VANT, h/d_{SD} , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $\rho = 0,5$, considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1; 5; 10; 20\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} = 1$ (desvanecimento Rayleigh) para condições de propagação NLOS.

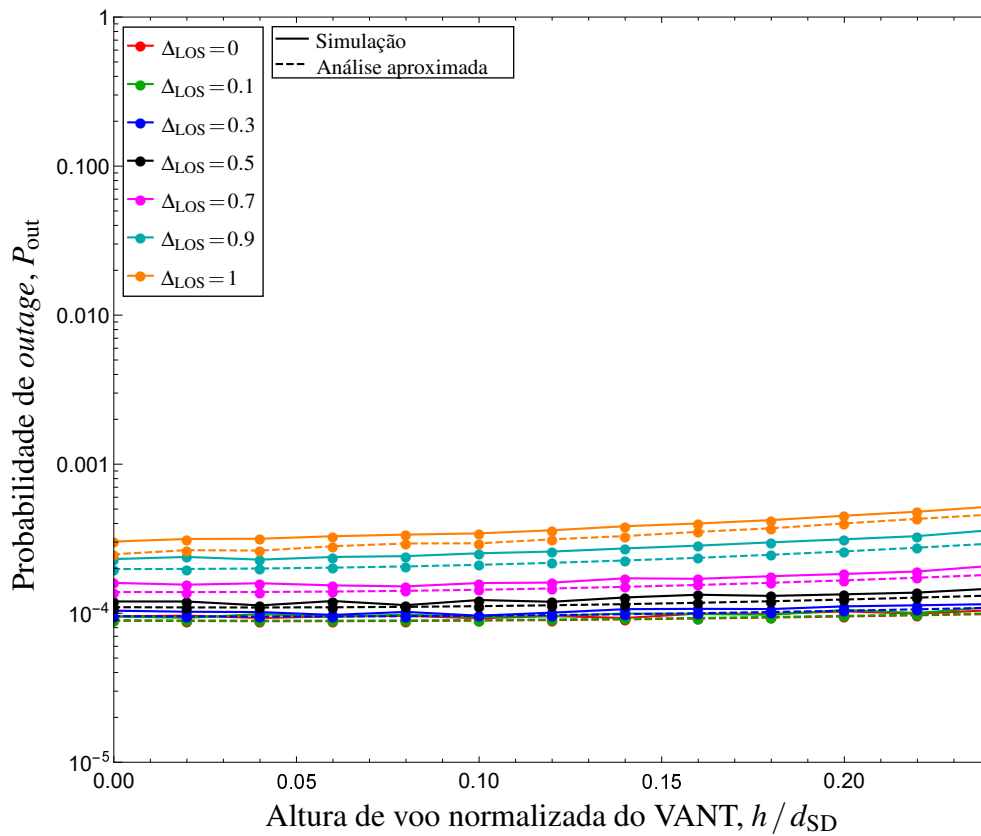


Fonte: Próprio autor.

A Figura 17 ilustra a probabilidade de *outage* do sistema *versus* a altura de voo normalizada do VANT, h/d_{SD} , para diferentes valores de Δ_{LOS} nos seguintes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} \in \{0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1\}$; $m_{LOS} = 5$ como condições de propagação LOS, e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} = 1$ (desvanecimento Rayleigh) como condição de propagação NLOS. Assume-se $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $\rho = 0,5$. Observe que o desempenho do sistema diminui à medida que Δ_{LOS} aumenta. A razão para isso é

que, de acordo com o modelo de desvanecimento FTR, as magnitudes das duas componentes especulares tornam-se semelhantes à medida que Δ_{LOS} aumenta — tais magnitudes são iguais para $\Delta_{LOS} = 1$, enquanto uma das magnitudes é nula para $\Delta_{LOS} = 0$. Além disso, nota-se a partir de (4) que o efeito das componentes especulares prevalece sobre o efeito da componente difusa para valores elevados de K_{LOS} (define-se $K_{LOS} = 5$). Ademais, a flutuação das componentes especulares é mitigada quando m_{LOS} aumenta (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017) (define-se $m_{LOS} = 5$). Dessa forma, o canal sofre um efeito semelhante ao do modelo tradicional de propagação de dois raios (em que são consideradas apenas duas componentes especulares com magnitudes constantes, sem componente difusa) para uma distância suficientemente grande entre o transmissor e o receptor, de modo que as ondas especulares (diretas e refletidas) têm magnitudes semelhantes e se combinam de forma destrutiva (GOLDSMITH, 2005). Por outro lado, para valores mais baixos de Δ_{LOS} , o desempenho de *outage* do sistema melhora à medida que as magnitudes das componentes especulares tornam-se diferentes, de modo que uma componente especular é dominante sobre a outra, atenuando assim o efeito de combinação destrutiva. Além disso, conforme observado na Figura 16, o desempenho do sistema permanece praticamente o mesmo à medida que a altura de voo normalizada do VANT aumenta, uma vez que quanto maior a altura de voo do VANT, maior é a probabilidade de que haja uma condição de propagação LOS no segundo salto e maior é a perda de percurso nos enlaces entre os nós terrestres e o VANT.

Figura 17 - Probabilidade de *outage* vs. altura de voo normalizada do VANT, h/d_{SD} , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $\rho = 0,5$, considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} \in \{0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1\}$; $m_{LOS} = 5$ para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} = 1$ (desvanecimento Rayleigh) para condições de propagação NLOS.



Fonte: Próprio autor.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi analisado o desempenho de *outage* de uma rede cooperativa assistida por VANT FD-AF alimentado por transferência de energia sem fio considerando canais de desvanecimento FTR. Foram obtidas expressões analíticas para a probabilidade de *outage* com base em abordagens aproximadas e assintóticas. Em particular, a expressão assintótica em forma fechada obtida mostrou que os parâmetros de desvanecimento FTR correspondentes ao primeiro e segundo salto não têm um impacto significativo no desempenho de *outage* do sistema na região de alta SNR. Nesse caso, o desempenho mostrou-se governado principalmente pelo efeito da SI residual que leva a patamares de *outage*, conforme corroborado pelos resultados das simulações. Em geral, verificou-se que o impacto do parâmetro K_{LOS} no desempenho do sistema prevalece sobre os demais parâmetros do canal de desvanecimento, resultando em uma melhora significativa no desempenho do sistema conforme K_{LOS} aumenta. Além disso, para valores elevados de K_{LOS} (correspondendo a cenários de forte componente especular), o ganho de desempenho do sistema devido a um aumento no parâmetro m_{LOS} é mais perceptível. Além disso, foi observado que, para valores elevados de K_{LOS} e m_{LOS} , o desempenho de *outage* diminui à medida que Δ_{LOS} aumenta, uma vez que as componentes especulares se combinam de forma destrutiva com mais frequência. Também pôde-se observar que o desempenho de *outage* do sistema permanece aproximadamente o mesmo à medida que a altura de voo normalizada do VANT aumenta, uma vez que tanto a probabilidade de propagação LOS no segundo salto quanto a perda de percurso nos enlaces entre o VANT e os nós terrestres aumentam.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando a análise de desempenho de *outage* da rede apresentada neste trabalho, foi adotado um cenário estático, em que o VANT opera a uma certa altura fixa em relação ao solo. Portanto, um possível trabalho futuro seria considerar cenários em que o VANT possua uma mobilidade e que algoritmos de otimização de trajetórias sejam considerados. Outro possível trabalho futuro seria considerar a utilização de múltiplas antenas nos nós transmissor e receptor, a fim de avaliar ganhos de diversidade espacial no sistema.

APÊNDICE A – CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE *OUTAGE* APROXIMADA

Prova da Proposição 1

Um sistema entra em *outage* quando a SINR instantânea fim-a-fim recebida, γ_{e2e} , está abaixo de um certo limiar, γ_{th} . Assim, a probabilidade de *outage* para uma rede cooperativa de dois saltos assistida por VANT FD alimentado por transferência de energia sem fio pode ser expressa a partir de (1) e (30) como

$$\begin{aligned} P_{out}^{e2e} &= \Pr(\gamma_{e2e} < \gamma_{th}) \\ &= \Pr\left(\frac{\frac{XY}{U+1}}{\frac{X}{U+1} + Y + 1} < \gamma_{th}\right). \end{aligned} \quad (39)$$

Denota-se $A = X/(U+1)$. Então, utiliza-se o limite superior para a média harmônica em (30), do qual tem-se que $\min\{A, Y\} \geq AY/(A+Y+1)$. É digno de nota que esse limite superior também produz uma excelente aproximação, especialmente no regime de alta SNR. Assim, a probabilidade de *outage* pode ser expressa como

$$\begin{aligned} P_{out}^{e2e} &\approx \Pr(\min\{A, Y\} < \gamma_{th}) \\ &\stackrel{(a)}{=} \Pr(A < \gamma_{th}) + \Pr(Y < \gamma_{th}) \\ &\quad - \Pr(A < \gamma_{th}) \Pr(Y < \gamma_{th}) \\ &= F_A(\gamma_{th}) + F_Y(\gamma_{th}) - F_A(\gamma_{th})F_Y(\gamma_{th}), \end{aligned} \quad (40)$$

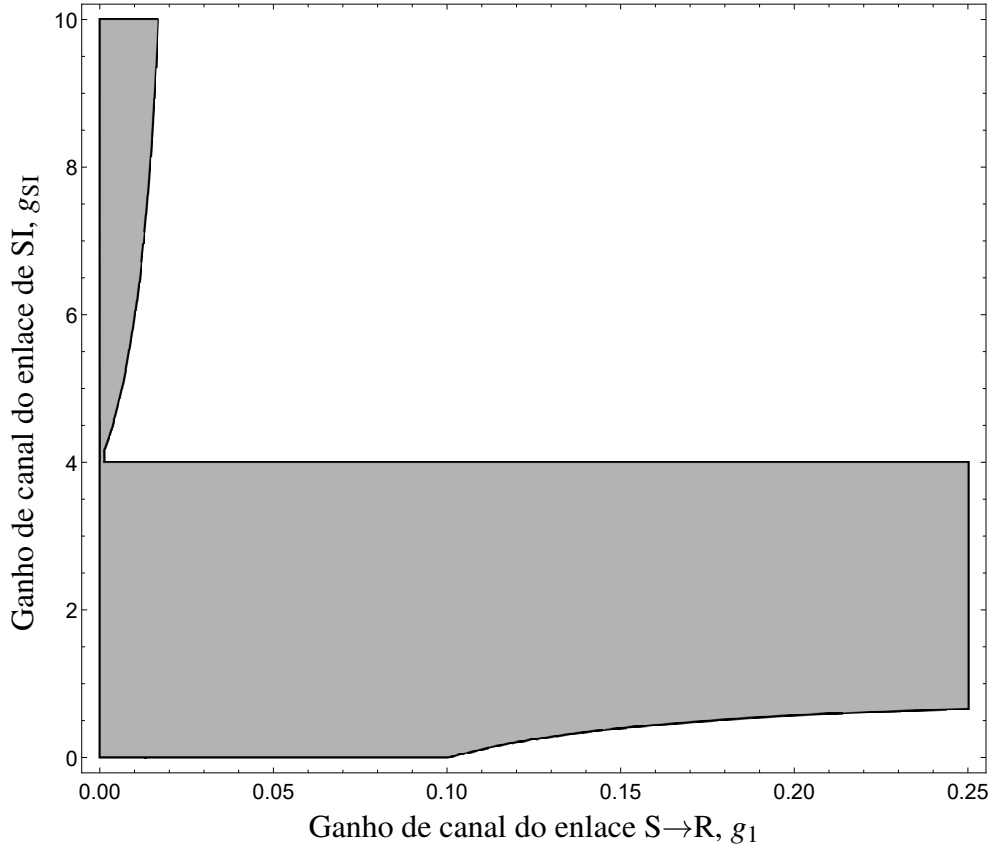
em que no passo (a) desenvolve-se a função $\min\{\cdot, \cdot\}$ em termos das probabilidades marginais (PAPOULIS, 2002, Eq. (6.81)). Em seguida, determina-se as CDFs marginais de A e Y . Para o primeiro caso, $F_A(\cdot)$ pode ser obtida como

$$\begin{aligned} F_A(\gamma_{th}) &= \Pr\left[\frac{X}{U+1} < \gamma_{th}\right] \\ &= \Pr\left[\frac{\rho \gamma_S g_1}{\rho \beta(g_1, g_{SI}) g_{SI} + 1} < \gamma_{th}\right], \end{aligned} \quad (41)$$

em que utiliza-se as definições de X e U dadas em (27) e (29), respectivamente. A região de integração para o evento de *outage* no argumento de $\Pr(\cdot)$ em (41), R_1 , é ilustrada na Figura 18, de modo que pode ser determinada como

$$\begin{aligned} R_1 &= \left[0 < g_1 < B \cap \left(0 < g_{SI} < \frac{1}{\eta \bar{\rho}} \cup g_{SI} > C(g_1)\right)\right] \cup \left[B \leq g_1 \leq \frac{\gamma_{th}}{\gamma_S \rho} \cap 0 < g_{SI} < \frac{1}{\eta \bar{\rho}}\right] \\ &\quad \cup \left[g_1 > \frac{\gamma_{th}}{\gamma_S \rho} \cap C(g_1) < g_{SI} < \frac{1}{\eta \bar{\rho}}\right], \end{aligned} \quad (42)$$

Figura 18 - Região de integração para o evento de *outage* no argumento de $\Pr(\cdot)$ em (41), R_1 , correspondente à CDF de A , $F_A(\cdot)$.



Fonte: Próprio autor.

em que B e $C(\cdot)$ são definidos na proposição 1 como (33) e (34), respectivamente. Assim, integrando as PDFs de g_1 e g_{SI} sobre a região R_1 , a CDF de A é obtida como

$$\begin{aligned}
 F_A(\gamma_{th}) &= \int_0^B f_{g_1}(v) dv \left(\int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} f_{g_{SI}}(w) dw + \int_{C(v)}^{\infty} f_{g_{SI}}(w) dw \right) + \int_B^{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{SP}}} f_{g_1}(v) dv \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} f_{g_{SI}}(w) dw \\
 &\quad + \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{SP}}}^{\infty} f_{g_1}(v) dv \int_{C(v)}^{\frac{1}{\eta\rho}} f_{g_{SI}}(w) dw \\
 &= \int_0^B f_{g_1}(v) dv \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} f_{g_{SI}}(w) dw + \int_0^B \int_{C(v)}^{\infty} f_{g_1}(v) f_{g_{SI}}(w) dw dv \\
 &\quad + \int_B^{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{SP}}} f_{g_1}(v) dv \int_0^{\frac{1}{\eta\rho}} f_{g_{SI}}(w) dw + \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{SP}}}^{\infty} \int_{C(v)}^{\frac{1}{\eta\rho}} f_{g_1}(v) f_{g_{SI}}(w) dw dv \\
 &\stackrel{(b)}{=} \underbrace{F_{g_1}(B) F_{g_{SI}}\left(\frac{1}{\eta\rho}\right)}_{A1} + \underbrace{\int_0^B [1 - F_{g_{SI}}(C(v))] f_{g_1}(v) dv}_{A2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \underbrace{F_{g_{SI}}\left(\frac{1}{\eta\bar{\rho}}\right)\left[F_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_S\rho}\right) - F_{g_1}(B)\right]}_{A3} + \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_S\rho}}^{\infty} F_{g_{SI}}\left(\frac{1}{\eta\bar{\rho}}\right) f_{g_1}(v) dv \\
 & - \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_S\rho}}^{\infty} F_{g_{SI}}(C(v)) f_{g_1}(v) dv,
 \end{aligned} \tag{43}$$

em que no passo (b) utilizou-se propriedades da função de distribuição. Agora, substituindo as expressões da PDF e CDF de g_1 , dadas em (7) e (8), e a CDF de g_{SI} , dada em (11), em (43), após algumas manipulações matemáticas, tem-se que

$$\begin{aligned}
 F_A(\gamma_{th}) &= \underbrace{\frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j! \Gamma(j+1)} \gamma\left(j+1, \frac{B}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right)}_{A4} \underbrace{\left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{SI}\eta\bar{\rho}}\right)\right]}_{A5} \\
 &+ \frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j! \Gamma(j+1) [2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \int_0^B v^j \exp\left[-\left(\frac{C(v)}{\Omega_{SI}} + \frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right)\right] dv \\
 &+ \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{SI}\eta\bar{\rho}}\right)\right] \left\{ \frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j! \Gamma(j+1)} \left[\gamma\left(j+1, \frac{\gamma_{th}}{2\gamma_S\rho\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \gamma\left(j+1, \frac{B}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right) \right] \right\} + \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{SI}\eta\bar{\rho}}\right)\right] \\
 &\times \frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j! \Gamma(j+1) [2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_S\rho}}^{\infty} v^j \exp\left[-\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right] dv \\
 &- \frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j! \Gamma(j+1) [2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_S\rho}}^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{C(v)}{\Omega_{SI}}\right)\right] v^j \\
 &\quad \times \exp\left[-\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right] dv \\
 &\stackrel{(c)}{=} \frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j! \Gamma(j+1)} \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{SI}\eta\bar{\rho}}\right)\right] \left\{ \gamma\left(j+1, \frac{\gamma_{th}}{2\gamma_S\rho\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{1}{[2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_S\rho}}^{\infty} v^j \exp\left[-\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right] dv \right\} + \frac{1}{[2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \right. \\
 &\quad \left. \times \left\{ \int_0^B v^j \exp\left[-\left(\frac{C(v)}{\Omega_{SI}} + \frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right)\right] dv \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_S\rho}}^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{C(v)}{\Omega_{SI}}\right)\right] v^j \exp\left[-\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right] dv \right\} \right\},
 \end{aligned} \tag{44}$$

em que no passo (c) colocou-se os termos A4 e A5 em evidência. De acordo com a definição

da função gamma incompleta (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2015, Eq. (8.350.1)), tem-se que o termo A6 pode ser reduzido a

$$\begin{aligned} A6 &= [2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1} \Gamma\left(j+1, \frac{\gamma_{th}}{2\gamma_S \rho \sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right) \\ &= [2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1} \left[\Gamma(j+1) - \gamma\left(j+1, \frac{\gamma_{th}}{2\gamma_S \rho \sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right) \right]. \end{aligned} \quad (45)$$

Ao substituir (45) em (44), a CDF de A pode finalmente ser expressa por

$$\begin{aligned} F_A(\gamma_{th}) &= \frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j! \Gamma(j+1)} \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{SI} \eta \bar{\rho}}\right) \right] \Gamma(j+1) + \frac{1}{[2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \right. \\ &\quad \times \left\{ \int_0^B v^j \exp\left[-\left(\frac{C(v)}{\Omega_{SI}} + \frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right)\right] dv - \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_S \rho}}^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{C(v)}{\Omega_{SI}}\right) \right] v^j \right. \\ &\quad \times \left. \left. \exp\left[-\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)}\right] dv \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (46)$$

Por outro lado, $F_Y(\gamma_{th})$ pode ser derivado de (28) como

$$\begin{aligned} F_Y(\gamma_{th}) &= \Pr[Y < \gamma_{th}] \\ &= \Pr[\beta(g_1, g_{SI}) g_2 < \gamma_{th}], \end{aligned} \quad (47)$$

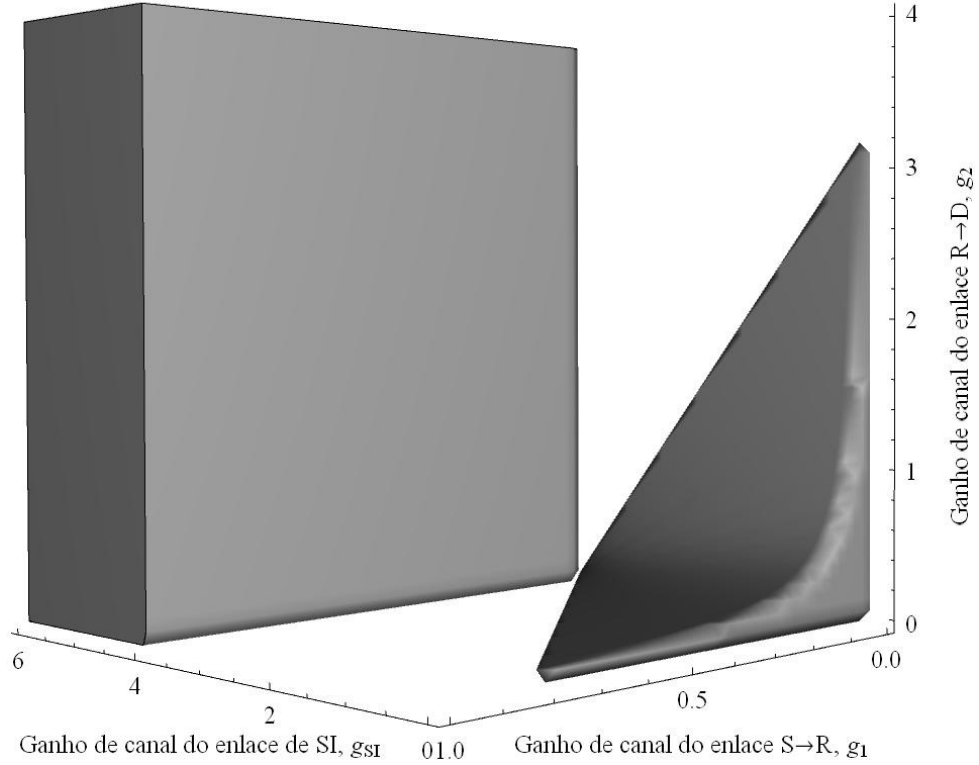
em que a região de integração para o evento de *outage* em (47), R_2 , é representada na Figura 19, de modo que pode ser expressa como

$$\begin{aligned} R_2 &= g_1 > 0 \cap \left\{ \left[0 < g_2 < D(g_1) \cap \left(0 < g_{SI} < E(g_1, g_2) \cup g_{SI} > \frac{1}{\eta \bar{\rho}} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. \cup \left[g_2 \geq D(g_1) \cap g_{SI} > \frac{1}{\eta \bar{\rho}} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (48)$$

em que $D(\cdot)$ e $E(\cdot, \cdot)$ são definidos na proposição 1 como (35) e (36), respectivamente. Ao integrar as PDFs de g_1 , g_2 e g_{SI} sobre a região R_2 , a CDF de Y é calculada como

$$\begin{aligned} F_Y(\gamma_{th}) &= \int_0^{\infty} f_{g_1}(v) dv \left[\int_0^{D(v)} f_{g_2}(x) dx \left(\int_0^{E(v, x)} f_{g_{SI}}(w) dw + \int_{\frac{1}{\eta \bar{\rho}}}^{\infty} f_{g_{SI}}(w) dw \right) \right. \\ &\quad \left. + \int_{D(v)}^{\infty} f_{g_2}(x) dx \int_{\frac{1}{\eta \bar{\rho}}}^{\infty} f_{g_{SI}}(w) dw \right] \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{D(v)} \int_0^{E(v, x)} f_{g_1}(v) f_{g_2}(x) f_{g_{SI}}(w) dw dx dv \\ &\quad + \int_0^{\infty} \int_0^{D(v)} f_{g_1}(v) f_{g_2}(x) dx dv \int_{\frac{1}{\eta \bar{\rho}}}^{\infty} f_{g_{SI}}(w) dw \end{aligned}$$

Figura 19 - Região de integração para o evento de *outage* no argumento de $\Pr(\cdot)$, R_2 , em (47), correspondente à CDF de Y , $F_Y(\cdot)$.



Fonte: Próprio autor.

$$\begin{aligned}
 & + \int_0^\infty \int_{D(v)} f_{g_1}(v) f_{g_2}(x) dx dv \int_{\frac{1}{\eta\bar{\rho}}}^\infty f_{g_{SI}}(w) dw \\
 & = \int_0^\infty \int_0^{D(v)} \int_0^{E(v,x)} f_{g_1}(v) f_{g_2}(x) f_{g_{SI}}(w) dw dx dv \\
 & + \int_{\frac{1}{\eta\bar{\rho}}}^\infty f_{g_{SI}}(w) dw \left(\int_0^\infty \int_0^{D(v)} f_{g_1}(v) f_{g_2}(x) dx dv + \int_0^\infty \int_{D(v)} f_{g_1}(v) f_{g_2}(x) dx dv \right) \\
 & \stackrel{(d)}{=} \underbrace{\int_0^\infty \int_0^{D(v)} F_{g_{SI}}(E(v,x)) f_{g_1}(v) f_{g_2}(x) dx dv}_{Y1} + \left[1 - F_{g_{SI}}\left(\frac{1}{\eta\bar{\rho}}\right) \right] \quad (49)
 \end{aligned}$$

Substituindo as PDFs de g_1 e g_2 , fornecidas em (7), pelos parâmetros de desvanecimento correspondentes e a CDF de g_{SI} , fornecida como em (11), em (49), após algumas manipulações matemáticas, obtém-se

$$F_Y(\gamma_{th}) = \frac{\left(\frac{m_1}{K_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{K_2}\right)^{m_2}}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\tau_j(K_1, \Delta_1, m_1)}{j!\Gamma(j+1) [2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)]^{j+1}} \frac{\tau_i(K_2, \Delta_2, m_2)}{i!\Gamma(i+1) [2\sigma_2^2(\Omega_2, K_2)]^{i+1}}$$

$$\begin{aligned}
& \times \int_0^\infty \int_0^{D(v)} \left[1 - \exp\left(-\frac{E(v,x)}{\Omega_{SI}}\right) \right] v^j x^i \exp\left[-\left(\frac{v}{2\sigma_1^2(\Omega_1, K_1)} + \frac{x}{2\sigma_2^2(\Omega_2, K_2)}\right)\right] \\
& \times dx dv + \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{SI}\eta\bar{\rho}}\right). \tag{50}
\end{aligned}$$

Assim, substituindo (46) e (50) em (40), uma aproximação para a probabilidade de *outage* de um sistema de cooperação de dois saltos assistido por um VANT FD alimentado por transferência de energia sem fio sob canais FTR pode ser obtida como em (32).

APÊNDICE B – CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE *OUTAGE* ASSINTÓTICA

Prova da Proposição 2

Neste caso, assume-se o regime de alta SNR (ou seja, $\gamma_S \rightarrow \infty$), em que termos de ordem superior proporcionais a $1/\gamma_S$ podem ser negligenciados. Primeiro, analisa-se a expressão para $F_A(\cdot)$ obtida em (43). Sob a condição de alta SNR, tem-se que $B \rightarrow 0$, $\gamma_{th}/(\gamma_S \rho) \rightarrow 0$, e que

$$\lim_{\gamma_S \rightarrow \infty} F_{g_{SI}}(C(g_1)) = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{\eta \Omega_{SI}(\bar{\alpha} + \gamma_{th} - \bar{\alpha} \rho(1 + \gamma_{th}))}\right). \quad (51)$$

Portanto, os termos A1 e A3 em (43) tendem a zero, observando que $\gamma(a, 0) = 0$ na definição da CDF de g_1 , fornecida em (8). Além disso, o termo A2 é igual a zero, pois seu intervalo de integração é nulo. Então, na região de alta SNR, $F_A(\cdot)$ reduz de (43) para

$$\begin{aligned} F_A(\gamma_{th}) &\simeq F_{g_{SI}}\left(\frac{1}{\eta \bar{\rho}}\right) \int_0^\infty f_{g_1}(v) dv - \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{\eta \Omega_{SI}(\bar{\alpha} + \gamma_{th} - \bar{\alpha} \rho(1 + \gamma_{th}))}\right)\right] \int_0^\infty f_{g_1}(v) dv \\ &\stackrel{(e)}{=} \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{\eta \Omega_{SI}(\bar{\alpha} + \gamma_{th} - \bar{\alpha} \rho(1 + \gamma_{th}))}\right) - \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{SI} \eta \bar{\rho}}\right), \end{aligned} \quad (52)$$

em que no passo (e) aplicou-se a propriedade da PDF de uma variável aleatória, que ao ser integrada em todo seu domínio, seu valor é unitário; além de aplicar a CDF de uma variável aleatória com distribuição Rayleigh (vide (11)) para os ganhos de canal de autointerferência. Agora, analisa-se a expressão para $F_Y(\cdot)$ obtida em (49). Em regime de alta SNR, tem-se que $D(v) \rightarrow 0$. Assim, o termo Y1 é igual a zero, pois seu intervalo de integração é nulo. Portanto, em alta SNR, $F_Y(\cdot)$ reduz de (49) para

$$\begin{aligned} F_Y(\gamma_{th}) &\simeq 1 - F_{g_{SI}}\left(\frac{1}{\eta \bar{\rho}}\right) \\ &= \exp\left(-\frac{1}{\Omega_{SI} \eta \bar{\rho}}\right). \end{aligned} \quad (53)$$

Substituindo (52) e (53) em (40), uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* assintótica de um sistema cooperativo com dois saltos assistido por um VANT FD alimentado por transferência de energia sem fio sob canais FTR pode ser obtida como em (37).

REFERÊNCIAS

- AGENCY, E. U. A. S. *How high can i fly my drone?* [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/>>. Acesso em: 20 Jan. 2021.
- AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1617–1655, 2016.
- ALEVIZOS, P. N.; BLETSAS, A. Sensitive and nonlinear far-field rf energy harvesting in wireless communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 17, n. 6, p. 3670–3685, 2018.
- ATIF, M. *et al.* Uav-assisted wireless localization for search and rescue. *IEEE Systems Journal*, p. 1–12, 2021.
- BADARNEH, O. S.; COSTA, D. B. da. Cascaded fluctuating two-ray fading channels. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 23, n. 9, p. 1497–1500, 2019.
- DUARTE, M.; DICK, C.; SABHARWAL, A. Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 11, n. 12, p. 4296–4307, 2012.
- EGASHIRA, E. N. *et al.* Secrecy performance of untrustworthy af relay networks using cooperative jamming and swipt. In: *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- ERNEST, T. Z. H. *et al.* A power series approach for hybrid-duplex UAV communication systems under Rician shadowed fading. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 76949–76966, 2019.
- EVERETT, E.; SAHAI, A.; SABHARWAL, A. Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 13, n. 2, p. 680–694, 2014.
- GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.
- GRADSHTEYN, I.; RYZHIK, I. *Table of Integrals, Series, and Products*, 8th edn., ed. by D. Zwillinger. [S.l.]: Elsevier Academic Press, Waltham, MA, 2015.
- HAYKIN, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 23, n. 2, p. 201–220, 2005.
- HENRY, S.; ALSOHAILY, A.; SOUSA, E. S. 5g is real: Evaluating the compliance of the 3gpp 5g new radio system with the itu imt-2020 requirements. *IEEE Access*, v. 8, p. 42828–42840, 2020.

- HOLIS, J.; PECHAC, P. Elevation dependent shadowing model for mobile communications via high altitude platforms in built-up areas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 56, n. 4, p. 1078–1084, 2008.
- HUANG, J.; XING, C.-C.; WANG, C. Simultaneous wireless information and power transfer: Technologies, applications, and research challenges. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 55, n. 11, p. 26–32, 2017.
- 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, 2020.
- Jl, B. *et al.* Secrecy performance analysis of uav assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 69, n. 7, p. 7404–7415, 2020.
- KIM, D.; LEE, H.; HONG, D. A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of PHY and MAC layers. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 2017–2046, 2015.
- KORPI, D. *et al.* Compact inband full-duplex relays with beyond 100 db self-interference suppression: Enabling techniques and field measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 65, n. 2, p. 960–965, 2017.
- KRIKIDIS, I. *et al.* Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 52, n. 11, p. 104–110, 2014.
- LANEMAN, J. N.; TSE, D. N.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information theory*, IEEE, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, 2004.
- LE, A. T. *et al.* Beam-based analog self-interference cancellation in full-duplex mimo systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 19, n. 4, p. 2460–2471, 2020.
- LE, N. P. *et al.* Energy-harvesting aided unmanned aerial vehicles for reliable ground user localization and communications under lognormal-nakagami- m fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 70, n. 2, p. 1632–1647, 2021.
- LI, B.; FEI, Z.; ZHANG, Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 2241–2263, 2018.
- LI, H.; ZHAO, X. Throughput maximization with energy harvesting in uav-assisted cognitive mobile relay networks. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, v. 7, n. 1, p. 197–209, 2021.
- LIOLIOU, P. *et al.* Self-interference suppression in full-duplex mimo relays. In: *2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 658–662.
- LIU, G. *et al.* In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 2, p. 500–524, 2015.

- MA, J. *et al.* A new coupling channel estimator for cross-talk cancellation at wireless relay stations. In: *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.
- MIKEKA, C.; ARAI, H. Design issues in radio frequency energy harvesting system. *Sustainable Energy Harvesting Technologies-Past, Present and Future*, InTech Europe, p. 235–256, 2011.
- MOZAFFARI, M. *et al.* A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 2334–2360, 2019.
- NWANKWO, C. D. *et al.* A survey of self-interference management techniques for single frequency full duplex systems. *IEEE Access*, v. 6, p. 30242–30268, 2018.
- OLIVO, E. B. *et al.* Multiuser incremental decode-and-forward relaying under outdated channel estimates. *Electronics Letters*, IET, v. 51, n. 4, p. 369–371, 2015.
- OLIVO, E. E. B. *et al.* An adaptive transmission scheme for cognitive decode-and-forward relaying networks: Half duplex, full duplex, or no cooperation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 15, n. 8, p. 5586–5602, 2016.
- OSORIO, D. P. M. *et al.* Exploiting the direct link in full-duplex amplify-and-forward relaying networks. *IEEE Signal Processing Letters*, IEEE, v. 22, n. 10, p. 1766–1770, 2015.
- OSORIO, D. P. M. *et al.* An adaptive transmission scheme for amplify-and-forward relaying networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 65, n. 1, p. 66–78, 2017.
- OSTAFFE, H. *et al.* RF-based wireless charging and energy harvesting enables new applications and improves product design. *Powercast Corporation*, 2017.
- PAPOULIS, A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. 4th. ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- PERERA, T. D. P. *et al.* Wireless-powered UAV assisted communication system in Nakagami-m fading channels. In: IEEE. *2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. [S.l.], 2020. p. 1–6.
- POKHREL, S. R. *et al.* Towards enabling critical mmTc: A review of URLLC within mmTc. *IEEE Access*, v. 8, p. 131796–131813, 2020.
- ROMERO-JEREZ, J. M. *et al.* The fluctuating two-ray fading model: Statistical characterization and performance analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 16, n. 7, p. 4420–4432, 2017.
- SAMIMI, M. K. *et al.* 28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels. In: IEEE. *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 13, n. 3, p. 443–461, 2011.

TARIQ, F. *et al.* A speculative study on 6G. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 27, n. 4, p. 118–125, 2020.

TSE, D.; VISWANATH, P. *Fundamentals of wireless communication*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.

XIAO, Z.; XIA, P.; XIA, X.-G. Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: Potentials and approaches. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 54, n. 5, p. 66–73, 2016.

YANG, L. *et al.* Outage performance of uav-assisted relaying systems with rf energy harvesting. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 22, n. 12, p. 2471–2474, 2018.

ZHANG, J. *et al.* New results on the fluctuating two-ray model with arbitrary fading parameters and its applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 67, n. 3, p. 2766–2770, 2017.

ZHENG, J. *et al.* Wireless powered UAV relay communications over fluctuating two-ray fading channels. *Physical Communication*, Elsevier, v. 35, p. 100724, 2019.