

Desempenho de Outage de Redes Assistidas por VANT Operando em Modo Full Duplex sob Desvanecimento Fluctuating Two-Ray e SWIPT

Daniel de Paiva Mucin e Edgar Eduardo Benitez Olivo

Resumo— Neste artigo, o desempenho de uma rede sem fio assistida por um veículo aéreo não tripulado (VANT) em canais do tipo *fluctuating two-ray* (FTR) é avaliado em termos da probabilidade de *outage*. 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. Considera-se ainda as técnicas de transferência de energia sem fio (WET), transferência simultânea de potência e informação (SWIPT) e autorreciclagem de energia. O desempenho do sistema é avaliado por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo em função de vários parâmetros-chave, tais como o fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT, fator de divisão de potência, ganho médio do canal de autointerferência, dentre outros.

Palavras-Chave— Comunicações mmWave, *fluctuating two-ray*, *full duplex*, probabilidade de *outage*, veículo aéreo não tripulado, transferência simultânea de potência e informação.

Abstract— In this paper, the performance of an unmanned aerial vehicle (UAV) assisted wireless 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 retransmission mode under the amplify-and-forward protocol. Wireless energy transfer (WET), simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) and self-recycling energy techniques are also considered. The system performance is evaluated through exhaustive Monte Carlo simulations accounting for several key system parameters, such as the time allocation factor between the WET and SWIPT phases, power splitting factor, average channel gain of the self-interference link, among others.

Keywords— Fluctuating two-ray, full duplex, mmWave communications, outage probability, simultaneous wireless information and power transfer, unmanned aerial vehicle.

I. INTRODUÇÃO

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.

Daniel de Paiva Mucin e Edgar Eduardo Benitez Olivo, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista-SP, Brasil, E-mails: daniel.mucin@unesp.br, edgar.olivo@unesp.br.

No âmbito das redes móveis de quinta geração e de gerações futuras (5GB, 5G & beyond), em que se espera prover um suporte robusto a elevados volumes de tráfego de dados, alta confiabilidade, baixíssima latência e maior eficiência energética [1], prevê-se que os VANTs sejam introduzidos como nós retransmissores (ou *relays*, no contexto de comunicações cooperativas), os quais 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 [2], [3].

No contexto de comunicações cooperativas, dois protocolos de retransmissão amplamente conhecidos são: amplifica-e-encaminha (AF, *amplify-and-forward*), em que o *relay* pondera o sinal recebido por um fator de amplificação que pode ser fixo ou variável e depois o envia para o destino; e decodifica-e-encaminha (DF, *decode-and-forward*), em que o *relay* detecta, decodifica a informação vinda do nó fonte e a codifica novamente antes de retransmiti-la ao nó destino [4], exigindo assim uma abordagem mais complexa em termos de implementação quando comparado ao protocolo AF. Além disso, dois modos de retransmissão são definidos: *half duplex* (HD) e *full duplex* (FD). No modo HD, o *relay* utiliza de dois canais ortogonais para a transmissão e recepção de informação [5], enquanto que no modo FD o *relay* é capaz de receber e retransmitir a informação de maneira simultânea e na mesma banda de frequência, o que permite recuperar a perda de eficiência espectral inerente ao modo HD. Não obstante, o ganho em eficiência espectral do modo FD é obtido à custa da autointerferência sofrida na antena receptora do *relay*, a partir de sua própria antena transmissora, consequência da retransmissão simultânea.

Quanto ao aprimoramento da eficiência energética em redes 5GB, a técnica de captação de energia (EH, *energy harvesting*) apresenta-se como bastante promissora pelos ganhos a serem obtidos. Essa técnica consiste na obtenção de energia elétrica a partir de fontes de energia externa, tais como energia térmica, eólica e de rádio frequência (RF) [6]. Dentre estas, a captação de energia a partir de sinais de RF por meio da técnica de transferência de energia sem fio (WET, *wireless energy transfer*) pode auxiliar quanto aos requisitos de eficiência energética das redes 5G.

Concomitantemente, técnicas que possibilitam a transferência simultânea de potência e informação (SWIPT, *simultaneous wireless information and power transfer*) têm sido desenvolvidas para oferecer ganhos de eficiência espectral, em que a energia do sinal recebido é dividida em duas partes:

uma para EH e outra para decodificação da informação. Para tanto, duas técnicas são comumente usadas: (i) comutação no tempo (TS, *time switching*), que consiste na alocação de um intervalo de tempo para EH e outro para a transmissão de informação; e (ii) divisão no domínio da potência, (PS, *power splitting*), que permite separar o sinal recebido em dois fluxos com níveis diferentes de potência, sendo que um é enviado para um circuito retificador para EH e outro é convertido em um sinal de banda base para decodificação da informação [7].

Adicionalmente, a fim de alcançar taxas de dados mais elevadas e atender os requerimentos de volumes elevados de tráfego de dados, as comunicações por meio de ondas milimétricas (mmWave) têm-se tornado uma solução promissora devido à ampla largura de banda disponível nessas faixas de frequência. Contudo, pelo fato de sinais na faixa de ondas milimétricas serem mais susceptíveis à atenuação e à penetração em obstáculos, os processos de comunicação em cenários com sombreamento severo devido a montanhas e edifícios, por exemplo, podem ser auxiliados por VANTs a uma certa altura de operação, a fim de fornecer um enlace com linha de visada entre os nós transmissores e receptores [8]. Nesse contexto, o modelo de canal de desvanecimento de pequena escala *fluctuating two-ray* (FTR), recentemente proposto em [9], oferece um melhor ajuste a medições de campo para comunicações baseadas em ondas milimétricas, quando comparado com os modelos de desvanecimento Rice e Rayleigh [9], [11]. De fato, trata-se de um modelo estatístico generalizado, que possui como casos particulares os modelos de Nakagami- m , Rice e Rayleigh. Assim, o modelo FTR é capaz de capturar uma ampla heterogeneidade de cenários de desvanecimento com e sem linha de visada, sendo portanto um modelo bastante adequado para comunicações com VANTs cooperativos operando na faixa de ondas milimétricas [12].

Em vista disso, as redes assistidas por VANTs cooperativos que utilizam SWIPT têm recebido especial atenção da comunidade científica, pois o uso combinado das técnicas de comunicações cooperativas e SWIPT possibilita melhorar simultaneamente a confiabilidade e a eficiência energética da rede. Recentemente, em [12] analisou-se a probabilidade de *outage* para uma rede cooperativa assistida por VANT sob os protocolos de retransmissão AF e DF com uso de SWIPT e canal de desvanecimento FTR; no entanto, esse trabalho focou apenas no modo de retransmissão HD e, conseqüentemente, o ganho de eficiência espectral obtido pelo modo FD não foi explorado. Mais recentemente, em [13], uma rede cooperativa auxiliada por um VANT FD sob o protocolo DF e que utiliza da técnica SWIPT foi avaliada em termos da probabilidade de *outage*, além de propor uma estratégia de retransmissão, em que inicialmente é alocado um intervalo de tempo para a energização do VANT a partir da fonte, devido à necessidade de aprimorar a duração de sua bateria e, conseqüentemente, sua autonomia de voo, e, em um segundo intervalo de tempo, o VANT realiza SWIPT com EH a partir do enlace de autointerferência residual; 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.

Nesse contexto, este trabalho pretende contribuir no estudo de redes assistidas por VANTs, avaliando os efeitos da severidade do canal e de diferentes parâmetros do sistema sobre o desempenho em termos da probabilidade de *outage*. Para tanto, considera-se uma rede cooperativa assistida por um VANT que opera em modo FD e sob o protocolo AF. Além disso, considera-se o modelo FTR para caracterizar os efeitos do desvanecimento na faixa das ondas milimétricas. A fim de aprimorar a eficiência espectral e energética da rede, considera-se ainda que cada bloco de transmissão é composto por uma fase inicial de WET para energização do VANT e uma segunda fase de SWIPT para transmissão de informação, EH a partir do sinal da fonte e autorreciclagem de energia a partir da autointerferência no VANT, simultaneamente.

II. MODELO DO SISTEMA

Considere uma rede cooperativa como mostrado na Fig. 1, consistindo de uma fonte (S), um destino (D) e um VANT FD-AF atuando como *relay* (R) para auxiliar na comunicação entre S e D. Assume-se que o enlace direto S→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_{SR} e h_{RD} os coeficientes de canal dos enlaces S→R e R→D, respectivamente, e h_{SI} o coeficiente de canal do enlace de autointerferência residual no VANT, resultante de um processo de cancelamento imperfeito de interferência.

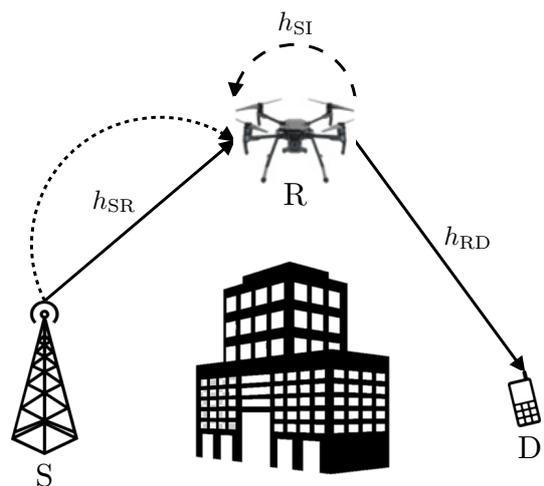


Fig. 1. Modelo do sistema (transmissão de informação: linha sólida; transferência de energia: linha pontilhada; sinal de interferência: linha tracejada.)

A. Modelo de Desvanecimento FTR

De acordo com o modelo de desvanecimento FTR, o coeficiente complexo de canal é composto de duas componentes especulares, V_1 e V_2 , com fases aleatórias, somadas a uma

componente difusa, que caracteriza a propagação multipercurso, ou seja [9]

$$h_i = \sqrt{\zeta}V_1 \exp(j\phi_1) + \sqrt{\zeta}V_2 \exp(j\phi_2) + X + jY, \quad (1)$$

para $i \in \{\text{SR}, \text{RD}, \text{SI}\}$, em que ζ é uma variável aleatória de distribuição Gamma com média unitária e parâmetro m [9, eq. (3)], que caracteriza a flutuação das componentes especulares, sendo mais ou menos acentuada, conforme o valor de m diminui ou aumenta, respectivamente; ϕ_1 e ϕ_2 são fases aleatórias uniformemente distribuídas, tal que $\phi_1, \phi_2 \sim \mathcal{U}[0, 2\pi)$; e X e Y são variáveis aleatórias Gaussianas de média zero e variância σ^2 , ou seja, $X, Y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$, sendo que $X + jY$ representa a componente difusa do desvanecimento FTR. O modelo FTR é expresso em função dos parâmetros K e Δ , em que $K = (V_1^2 + V_2^2)/2\sigma^2$ é a razão entre a potência média das componentes especulares e a potência da componente difusa de multipercurso e $\Delta = 2V_1V_2/(V_1^2 + V_2^2)$ representa a similaridade entre as potências médias recebidas das componentes especulares, sendo um parâmetro que varia entre 0 e 1, tal que, para $\Delta = 1$, as magnitudes dessas componentes são iguais e, para $\Delta = 0$, uma das duas componentes é nula. Tem-se ainda que o ganho médio de canal para o modelo FTR é dado por $\Omega_i = E\{|h_i|^2\} = 2\sigma^2(1 + K)$.

Assim, assume-se que os enlaces S→R e R→D experimentam desvanecimento do tipo FTR, enquanto que o enlace de autointerferência experimenta desvanecimento do tipo Rayleigh, sendo um caso particular do desvanecimento FTR quando $\Delta = 0$ e $K = 0$ [9]. Cabe mencionar que a consideração de desvanecimento Rayleigh para o enlace de autointerferência se dá pelo fato da componente de linha de visada ser completamente mitigada após várias etapas de cancelamento ativo e passivo de autointerferência [10], incluindo o isolamento das antenas transmissora e receptora do VANT.

B. Esquema de Transferência de Energia e Transmissão de Informação e SWIPT

Motivados pela limitação da fonte de energia para o funcionamento do VANT, e assumindo um esquema de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA), considera-se que cada intervalo de tempo com duração igual a T é composto de duas fases: (i) fase WET, em que R é energizado por sinais de RF a partir de S; e (ii) fase SWIPT, em que a técnica PS é usada para transmissão simultânea de informação e potência, conforme apresentado na Fig. 2.

As duas fases são realizadas em subintervalos de tempo dependentes de um fator de alocação de tempo, $\alpha \in (0, 1)$. Na fase WET, S energiza R durante um intervalo de tempo αT . Já na fase SWIPT, com duração $\bar{\alpha}T$, sendo $\bar{\alpha} = 1 - \alpha$, definem-se duas operações concomitantes no domínio da potência (conforme a Fig. 2): (i) transmissão simultânea de informação de S→R e R→D (já que o VANT opera em modo FD), em que é usada uma parcela de potência ρP ; e (ii) EH a partir dos enlaces S→R e de autointerferência residual R→R (autorreciclagem de energia), com parcela de potência $\bar{\rho}P$, em que P denota a potência total disponível no sistema e $\rho \in (0, 1)$ denota o fator de divisão de potência relacionado a técnica PS, sendo $\bar{\rho} = 1 - \rho$.

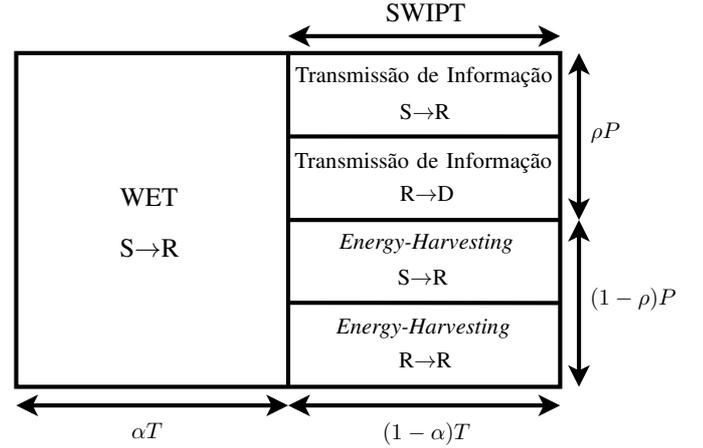


Fig. 2. Esquema de transmissão do sistema, em que α denota um fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT e ρ denota o fator de divisão de potência entre transmissão de informação e EH, inerente à técnica PS.

A quantidade de energia captada pelo VANT na fase WET, no intervalo αT , é dada por

$$E_{\text{WET}} = \eta \alpha T P_S |h_{\text{SR}}|^2, \quad (2)$$

em que $\eta \in (0, 1]$ é o fator de eficiência de conversão de energia. Já na fase SWIPT, durante o intervalo $\bar{\alpha}T$, o VANT realiza SWIPT-PS em que a quantidade de energia captada durante essa fase é expressa por

$$E_{\text{SWIPT}} = \eta \bar{\rho} \bar{\alpha} T (P_S |h_{\text{SR}}|^2 + P_R |h_{\text{SI}}|^2). \quad (3)$$

Portanto, a potência transmitida em R é dada pela razão entre a soma das energias captadas nas fases WET e SWIPT e a duração da fase de transmissão de informação, $\bar{\alpha}T$, isto é

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{E_{\text{WET}} + E_{\text{SWIPT}}}{(1 - \alpha) T} \\ &= \frac{\eta P_S |h_{\text{SR}}|^2}{1 - \eta \bar{\rho} |h_{\text{SI}}|^2} \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} + \bar{\rho} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

III. ANÁLISE DE SINAIS E PROBABILIDADE DE OUTAGE

Com base nas considerações da Seção II, nesta seção é realizada uma análise de sinais, a fim de determinar a relação sinal-ruído (SNR, *signal-to-noise ratio*) fim-a-fim do sistema, para então avaliar o desempenho em termos da probabilidade de *outage*. Assim, o sinal recebido em R no instante t durante a primeira fase de transmissão de informação (no intervalo $\bar{\alpha}T$) é dado por

$$y_R(t) = h_{\text{SR}} \sqrt{\rho P_S} x_S(t) + h_{\text{SI}} \sqrt{\rho P_R} x_R(t) + n_R(t), \quad (5)$$

em que $x_S(t)$ é o sinal da informação transmitido por S; $x_R(t) = \mathcal{G} y_R(t - T_a)$ é o sinal retransmitido por R, sendo \mathcal{G} o fator de amplificação do protocolo AF e T_a o atraso de processamento inerente ao modo de retransmissão FD, de modo que não haja correlação entre os sinais recebido e retransmitido; e $n_R(t)$ é a componente de ruído em R. Usando (5) na definição de $x_R(t)$, por meio de substituições recursivas, $x_R(t)$ pode ser reescrito como

$$\begin{aligned} x_R(t) &= \mathcal{G} \sum_{j=1}^N (h_{\text{SI}} \sqrt{\rho P_R} \mathcal{G})^{j-1} [h_{\text{SR}} \sqrt{\rho P_S} x_S(t - jT_a) \\ &\quad + n_R(t - jT_a)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \mathcal{G} h_{\text{SR}} \sqrt{\rho P_{\text{S}}} x_{\text{S}}(t - T_a) \\
 &+ \mathcal{G} \sum_{j=2}^N (h_{\text{SI}} \sqrt{\rho P_{\text{R}}} \mathcal{G})^{j-1} [h_{\text{SR}} \sqrt{\rho P_{\text{S}}} x_{\text{S}}(t - jT_a) \\
 &+ n_{\text{R}}(t - jT_a)] + \mathcal{G} n_{\text{R}}(t - T_a). \quad (6)
 \end{aligned}$$

Assumindo $E\{|x_{\text{S}}(t)|^2\} = E\{|x_{\text{R}}(t)|^2\} = 1$ e $E\{|n_{\text{R}}(t)|^2\} = N_0$, em que N_0 é a potência do ruído AWGN (*additive white Gaussian noise*) presente nos receptores dos terminais da rede, tem-se que

$$E\{|x_{\text{R}}(t)|^2\} = \mathcal{G}^2 \sum_{j=1}^N (|h_{\text{SI}}|^2 \rho P_{\text{R}} \mathcal{G}^2)^{j-1} [|h_{\text{SR}}|^2 \rho P_{\text{S}} + N_0]. \quad (7)$$

Para $\mathcal{G}^2 < [|h_{\text{SI}}|^2 \rho P_{\text{R}}]^{-1}$, a série geométrica em (7) converge e dado que a relação $E\{|x_{\text{R}}(t)|^2\} = 1$, o ganho de amplificação pode ser obtido como

$$\mathcal{G}^2 = [|h_{\text{SR}}|^2 \rho P_{\text{S}} + |h_{\text{SI}}|^2 \rho P_{\text{R}} + N_0]^{-1}. \quad (8)$$

Adicionalmente, o sinal recebido em D é dado por

$$y_{\text{D}}(t) = h_{\text{RD}} \sqrt{P_{\text{R}}} x_{\text{R}}(t) + n_{\text{D}}(t), \quad (9)$$

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

Substituindo (6) em (9), após calcular o valor quadrático médio, tem-se que a potência média recebida em D é obtida como

$$\begin{aligned}
 E\{|y_{\text{D}}(t)|^2\} &= \underbrace{\mathcal{G}^2 \rho P_{\text{S}} |h_{\text{SR}}|^2 P_{\text{R}} |h_{\text{RD}}|^2}_{\text{Sinal de interesse}} \\
 &+ \underbrace{\frac{\mathcal{G}^4 \rho P_{\text{R}}^2 |h_{\text{RD}}|^2 |h_{\text{SI}}|^2 (\rho P_{\text{S}} |h_{\text{SR}}|^2 + N_0)}{1 - |h_{\text{SI}}|^2 \rho P_{\text{R}} \mathcal{G}^2}}_{\text{Autointerferência}} \\
 &+ \underbrace{N_0 (\mathcal{G}^2 P_{\text{R}} |h_{\text{RD}}|^2 + 1)}_{\text{Ruído}}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

A partir de (10), a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR, *signal-to-interference-plus-noise ratio*) fim-a-fim do sistema, γ_{e2e} , é obtida como

$$\gamma_{e2e} = \frac{\mathcal{G}^2 \rho P_{\text{S}} |h_{\text{SR}}|^2 P_{\text{R}} |h_{\text{RD}}|^2}{\frac{\mathcal{G}^4 \rho P_{\text{R}}^2 |h_{\text{RD}}|^2 |h_{\text{SI}}|^2 (\rho P_{\text{S}} |h_{\text{SR}}|^2 + N_0)}{1 - |h_{\text{SI}}|^2 \rho P_{\text{R}} \mathcal{G}^2} + (\mathcal{G}^2 P_{\text{R}} |h_{\text{RD}}|^2 + 1) N_0}. \quad (11)$$

Substituindo (4) e (8) em (11) e dividindo a expressão resultante por N_0^2 , obtém-se

$$\gamma_{e2e} = \frac{\frac{\rho \gamma_{\text{S}} |h_{\text{SR}}|^2}{1 - \eta \rho |h_{\text{SI}}|^2} \frac{\eta \gamma_{\text{S}} |h_{\text{SR}}|^2 |h_{\text{RD}}|^2}{1 - \eta \rho |h_{\text{SI}}|^2} (\frac{\alpha}{\alpha} + \bar{\rho})}{\frac{\rho \gamma_{\text{S}} |h_{\text{SR}}|^2}{1 - \eta \rho |h_{\text{SI}}|^2} (\frac{\alpha}{\alpha} + \bar{\rho}) + 1} + \frac{\eta \gamma_{\text{S}} |h_{\text{SR}}|^2 |h_{\text{RD}}|^2}{1 - \eta \rho |h_{\text{SI}}|^2} (\frac{\alpha}{\alpha} + \bar{\rho}) + 1}, \quad (12)$$

em que $\gamma_{\text{S}} = P_{\text{S}}/N_0$ é a SNR transmitida pela fonte.

Para o sistema sob estudo, o desempenho é avaliado em termos da probabilidade de *outage*, definida como a probabilidade da SINR fim-a-fim do sistema, γ_{e2e} , obtida em (12), estar abaixo de um dado limiar τ , ou seja [14]

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma_{e2e} < \tau). \quad (13)$$

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, o desempenho de *outage* para a rede proposta é avaliado por meio de simulações de Monte Carlo, considerando dois cenários ilustrativos. 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; 1) e (1; 0; 0), respectivamente. Assume-se que o ganho médio do canal entre um dado par de nós é $\Omega_i = d_i^{-\epsilon}$, para $i \in \{\text{SR}, \text{RD}\}$, em que d_i é a distância entre os nós e ϵ é o expoente de perda de percurso. Considera-se $\epsilon = 4$ e o limiar alvo de SNR recebida $\tau = 0$ dB.

Na Fig. 3, o desempenho de *outage* versus o fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT, α , é apresentado para diferentes valores dos parâmetros K , Δ e m do modelo de desvanecimento FTR. Assume-se que $\Omega_{\text{SI}} = -10$ dB (ganho médio do canal de autointerferência), $\gamma_{\text{S}} = 25$ dB; $\eta = 0,5$ e; $\rho = 0,5$ (ou seja, alocação igual de potência entre as operações de EH e transmissão de informação). Note que, para valores de $\alpha \approx 1$, o sistema estará frequentemente em *outage*, independentemente dos parâmetros do modelo de desvanecimento FTR utilizados. Isso se deve ao fato de que nessa região, o VANT praticamente não transmite informação, pois a maior parte do tempo é alocada à fase WET, destinada apenas a sua energização a partir de S. Já para $\alpha < 1$, observa-se que o desempenho do sistema é significativamente impactado pela variação dos parâmetros Δ , K e m . Note que, para $\Delta \rightarrow 1$ (componentes especulares de potências similares), o desempenho do sistema é degradado em relação aos casos correspondentes em que $\Delta \rightarrow 0$ (componentes especulares dissimilares). Essa degradação de desempenho pode ser justificada devido ao fato de que, para os valores considerados de $K = 5$ e 15 (em que a potência das componentes especulares prevalece em média sobre a potência da componente difusa), o canal apresenta um efeito similar àquele do modelo clássico de propagação de dois raios (*two-ray model*) quando transmissor e receptor estão suficientemente afastados, tal que os raios direto e refletido têm potências similares [14], ocorrendo, portanto, uma combinação destrutiva das componentes especulares. Esse efeito destrutivo é mitigado quando $\Delta \rightarrow 0$, em que uma das componentes especulares é dominante em relação à outra, melhorando assim o desempenho do sistema. Por outro lado, note que, para valores dados de Δ e K , à medida que o valor de m aumenta, pode-se observar uma melhora no desempenho do sistema, já que a flutuação das componentes especulares é menos acentuada.

A Fig. 4 ilustra o efeito da autointerferência do VANT, que opera em modo FD, sobre o desempenho de *outage* do sistema para diferentes valores dos parâmetros K e Δ , considerando dois valores de ganho médio do canal de autointerferência, $\Omega_{\text{SI}} = -5$ e -10 dB, e $m = 15$. Assume-se que $\eta = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $\alpha = 0,5$. Note que, independentemente da severidade do canal (parâmetros K e Δ), o desempenho do sistema converge para patamares que são regidos pelo efeito da autointerferência. Observe que, conforme o ganho médio do canal de autointerferência diminui, o desempenho da rede melhora, além de ser possível notar os efeitos da variação dos parâmetros do canal de desvanecimento FTR. Para os casos

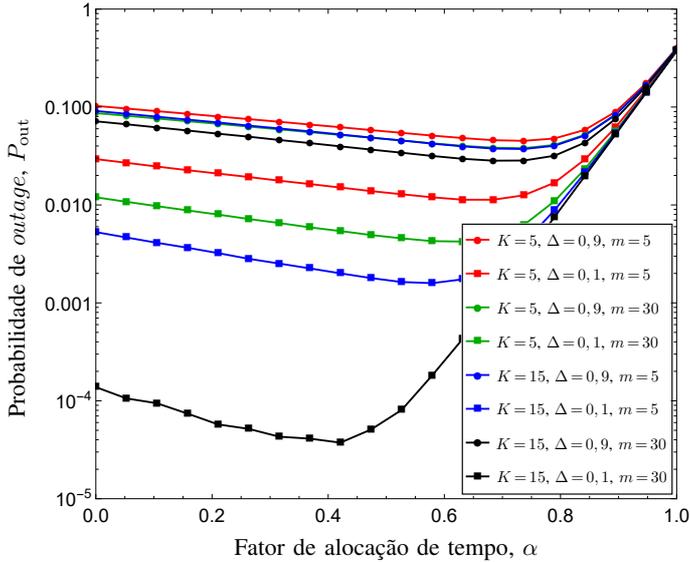


Fig. 3. Probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de tempo, considerando valores diferentes dos parâmetros do modelo FTR: $K = 5$ e 15 ; $\Delta = 0,1$ e $0,9$; $m = 5$ e 30 ; $\Omega_{SI} = -10$ dB; e $\gamma_S = 25$ dB.

em que $\Omega_{SI} = -5$ dB, os efeitos dos parâmetros do canal de desvanecimento FTR são mínimos. Por outro lado, nos cenários em que $\Omega_{SI} = -10$ dB, o sistema apresenta melhor desempenho ao diminuir-se os valores de Δ e elevar-se os valores de K , como observado também na Fig. 3.

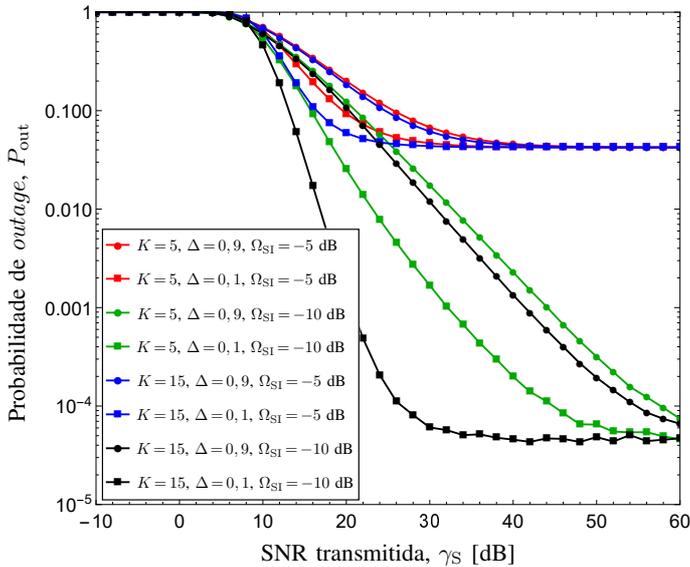


Fig. 4. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, considerando valores diferentes dos parâmetros do modelo FTR e de Ω_{SI} : $K = 5$ e 15 ; $\Delta = 0,1$ e $0,9$; $\Omega_{SI} = -5$ e -10 dB; e $m = 15$.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, a probabilidade de *outage* de uma rede assistida por um VANT do tipo FD-AF foi avaliada para diferentes parâmetros do sistema, considerando canal de desvanecimento FTR, que permite caracterizar o desvanecimento em uma ampla faixa de frequências, incluindo a faixa de ondas milimétricas. Constatou-se que o parâmetro Δ do canal FTR apresenta maior influência em relação aos outros dois parâmetros, ao passo que para valores de $\Delta \rightarrow 1$, os efeitos dos parâmetros K e m não são significativos quando comparados

com o caso em que $\Delta \rightarrow 0$, em que se pode observar que o desempenho do sistema melhora significativamente para determinados valores de K e m . Constatou-se também que a autointerferência inerente ao modo FD, presente no VANT, pode degradar significativamente o desempenho do sistema. Mais especificamente, para valores elevados (ou conservadores) do ganho médio do enlace de autointerferência, concluiu-se que os efeitos dos parâmetros do canal de desvanecimento FTR são mínimos e as curvas saturam em patamares elevados de *outage*. Por outro lado, conforme o ganho médio do enlace de autointerferência diminui (o que é obtido com técnicas mais eficazes de cancelamento de autointerferência), notou-se que, para determinados valores de K e Δ , o desempenho do sistema melhora significativamente na região intermediária de SNR, convergindo com os casos em que a severidade do canal é maior na região de alta SNR.

VI. TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, considerou-se que o VANT opera em uma posição e altitude fixas, o que não necessariamente ocorre na prática. Portanto, extensões desse trabalho pretendem considerar o efeito da variação de posição, altitude e velocidade do VANT, a fim de obter trajetórias e posições que otimizem o desempenho da rede. Ademais, a obtenção de expressões analíticas para a probabilidade de *outage*, além de outras métricas de desempenho, contribuiria nesse propósito.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, Thirdquarter 2016.
- [2] B. Li, Z. Fei and Y. Zhang, "UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 2241–2263, April 2019.
- [3] M. Mozaffari *et al.*, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360, Thirdquarter 2019.
- [4] J. Laneman, D. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [5] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of phy and mac layers," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2017–2046, Fourthquarter 2015.
- [6] J. Huang, C. C. Xing, and C. Wang, "Simultaneous wireless information and power transfer: Technologies, applications, and research challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 11, pp. 26–32, Nov. 2017.
- [7] I. Krikidis *et al.*, "Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 11, pp. 104–110, Nov. 2014.
- [8] Z. Xiao, P. Xia and X. Xia, "Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: Potentials and approaches," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 66–73, May 2016.
- [9] J. M. Romero-Jerez *et al.*, "The fluctuating two-ray fading model: Statistical characterization and performance analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 7, pp. 4420–4432, Jul. 2017.
- [10] D. P. Moya Osorio *et al.*, "Exploiting the direct link in full-duplex amplify-and-forward relaying networks," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1766–1770, Oct. 2015.
- [11] M. K. Samimi *et al.*, "28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels," *IEEE 83rd Veh. Technol. Mag.*, Nanjing, 2016, pp. 1–6.
- [12] J. Zheng *et al.*, "Wireless powered UAV relay communications over fluctuating two-ray fading channels," *Phys. Commun.*, Volume 35, 2019, 100724, ISSN 1874-4907.
- [13] D. N. K. Jayakody *et al.*, "Self-energized UAV-assisted scheme for cooperative wireless relay networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 578–592, Jan. 2020.
- [14] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.