

# Análise de Desempenho em Redes NTN-NOMA para Canais de Desvanecimento Generalizados

Francisco Raimundo Albuquerque Parente<sup>1</sup>, Bruna do Nascimento Benevides<sup>1</sup>,  
Raphael Parreira de Souza<sup>1</sup> e Maykon Renan Pereira da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD)  
Caixa Postal 13086-902 – Campinas – SP – Brasil

{parente, brunab, raphaelp, mpsilva}@cpqd.com.br

**Abstract.** *Given the growing demand for ubiquitous connectivity in the future Sixth Generation of Cellular Technology Networks, the combination of Non-Terrestrial Networks (NTN) and Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) emerges as a promising approach to improve spectral efficiency and connectivity in resource-constrained environments with high link heterogeneity. This paper investigates the performance of an NTN-NOMA system under a generalized Gaussian fading model, which is suitable for representing a broader range of propagation conditions in non-terrestrial scenarios. In this context, the user outage probability is evaluated under different channel conditions and practical impairments, including power allocation and imperfect Successive Interference Cancellation. Numerical results obtained through Monte Carlo simulations highlight the sensitivity of system performance to channel characteristics and reinforce the importance of adopting more general channel models for a more realistic assessment of satellite-terrestrial NOMA systems.*

**Resumo.** *Considerando a crescente demanda por conectividade ubíqua nas futuras Redes de Tecnologia Celular de Sexta Geração, a combinação entre Non-Terrestrial Networks (NTN) e Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) desponta como uma alternativa promissora para ampliar a eficiência espectral e a conectividade em ambientes com recursos limitados e elevada heterogeneidade de enlace. Este artigo investiga o desempenho de um sistema NTN-NOMA sob um modelo de desvanecimento gaussiano generalizado, adequado para representar uma gama mais ampla de condições de propagação em cenários não terrestres. Nesse contexto, avalia-se a Probabilidade de Indisponibilidade dos usuários sob diferentes condições de canal e efeitos práticos, incluindo alocação de potência e imperfeições no Successive Interference Cancellation. Os resultados numéricos, obtidos por meio de simulações de Monte Carlo, evidenciam a sensibilidade do desempenho às características do canal e reforçam a importância da adoção de modelos mais gerais para uma avaliação mais realista de sistemas satélite-terrestres com NOMA.*

## 1. Introdução

As redes *Non-terrestrial Networks* (NTN) despontam como um dos pilares dos futuros sistemas de Sexta Geração (6G) ao expandirem a conectividade para além da infraestrutura terrestre, viabilizando cobertura em áreas remotas, cenários de desastre e ambientes com

baixa densidade de estações rádio-base [Neelam and Sundru 2025, Ahmed et al. 2026]. Ao integrarem satélites, em especial constelações *Low Earth Orbit* (LEO), plataformas de alta altitude e *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), as redes NTN passam a operar sob condições de enlace significativamente distintas daquelas observadas em redes convencionais, incluindo maiores variações de distância, elevada mobilidade relativa, efeitos de múltiplos feixes e regimes de propagação caracterizados por componentes *Line Of Sight* (LOS) dominantes combinadas com multipercorso e sombreamento [Dao et al. 2021, Fan et al. 2023, Hoang et al. 2024]. Essa heterogeneidade torna a análise de confiabilidade e eficiência espectral particularmente desafiadora, uma vez que a experiência do usuário passa a ser fortemente influenciada por flutuações rápidas do canal e por assimetrias entre enlaces, características típicas de cenários NTN [Nguyen and Nguyen 2023].

Nesse contexto, as redes *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) têm sido amplamente investigadas como uma tecnologia habilitadora para NTN, por viabilizarem a multiplexação simultânea de múltiplos usuários em um mesmo recurso de rádio no domínio tempo-frequência, explorando o domínio da potência e a decodificação por meio de *Successive Interference Cancellation* (SIC) [Belmekki and Alouini 2024, Cardoso et al. 2025]. Em cenários NTN, o NOMA se destaca principalmente por dois potenciais benefícios: (i) elevar a eficiência espectral em ambientes com recursos limitados e (ii) ampliar a conectividade para usuários com condições de enlace heterogêneas, explorando diferenças de ganho de canal [M. Elhalawany et al. 2022]. Infelizmente, o desempenho do NOMA é altamente sensível ao comportamento estatístico do canal, incluindo correlação, componentes especulares, número de *clusters* e não-linearidades, bem como às imperfeições do SIC, associadas à interferência residual. Por essa razão, tornam-se necessários modelos de canal capazes de representar, de forma realista, a diversidade de condições encontradas em ambientes NTN. Assim, análises fundamentadas em modelos excessivamente restritos podem conduzir a conclusões demasiadamente otimistas ou com limitada capacidade de generalização, o que reforça a necessidade do uso de distribuições mais abrangentes para a caracterização da Probabilidade de Indisponibilidade (*Outage Probability*), da capacidade e da robustez do sistema [Parente et al. 2020a, Ayanampudi et al. 2026].

**Trabalhos Relacionados.** Na literatura, observa-se a consolidação do NOMA como um potencial candidato a *Next Generation Multiple Access* (NGMA) em NTN, com discussões envolvendo arquiteturas, desafios de implementação e direções de pesquisa para cenários satelitais e aéreos. Em particular, estudos sobre NTN-NOMA destacam a sensibilidade ao *Channel State Information* (CSI), a mobilidade e as limitações associadas ao SIC [Belmekki and Alouini 2024]. No âmbito da análise de desempenho, uma linha de pesquisa já consolidada investiga métricas como a Probabilidade de Indisponibilidade em redes satelitais NOMA sob modelos de canal representativos de ambientes NTN, incluindo desvanecimento e a presença de SIC imperfeito, com derivações em forma fechada e análises assintóticas [Yue et al. 2020]. Outros trabalhos estendem essa análise para *Integrated Satellite-Terrestrial Networks* (ISTN), incorporando mecanismos como *relays* e estratégias de seleção e otimização, evidenciando que a interação entre alocação de potência e condições estatísticas do canal afeta diretamente a confiabilidade do enlace [Xie et al. 2019]. Além disso, aspectos de segurança também vêm sendo investigados em redes NTN e ISTN com NOMA, frequentemente com base na probabilidade de de Indisponibilidade, mostrando que escolhas relacionadas a *beamforming*, CSI e variabilidade

do canal impactam simultaneamente a robustez e a confidencialidade da rede [Teng et al. 2025]. Por fim, resultados obtidos em cenários aéreos, como aqueles assistidos por UAV, reforçam que imperfeições práticas do SIC podem degradar substancialmente os ganhos do NOMA, o que motiva modelagens mais realistas tanto do canal quanto da interferência residual [Han et al. 2019].

**Contribuições.** Motivado por essa lacuna, este trabalho investiga o desempenho de um sistema NTN-NOMA utilizando um modelo de desvanecimento generalizado capaz de capturar um número arbitrário de *clusters* de multipercurso, componentes especulares, correlação entre *clusters* e não linearidade do canal. A principal contribuição reside na análise do impacto desses parâmetros sobre a Probabilidade de Indisponibilidade dos usuários, sob condições práticas que incluem interferência residual do SIC e alocação de potência no NOMA. Os resultados numéricos, obtidos por simulações de Monte Carlo, permitem caracterizar a sensibilidade do sistema a diferentes regimes de canal e mostram a relevância do uso de modelos de propagação mais abrangentes para a avaliação de desempenho em cenários NTN.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, apresentamos o modelo de canal adotado e suas principais propriedades, de modo a capturar, de forma abrangente, as condições de propagação em cenários NTN. Na Seção 3, descrevemos a arquitetura e o modelo de sistema NTN-NOMA considerados, incluindo a formulação da *Signal to Interference-plus-Noise Ratio* (SINR) sob superposição de sinais, bem como os efeitos de imperfeições práticas, tais como SIC residual e limitações de *hardware*. Além disso, derivamos as expressões analíticas das métricas de desempenho de interesse, com ênfase na Probabilidade de Indisponibilidade, e detalhamos a metodologia de validação por simulação de Monte Carlo. Na Seção 4, discutimos os resultados numéricos, evidenciando o impacto dos parâmetros do canal e da alocação de potência sobre o desempenho do sistema. Por fim, na Seção 5, apresentamos as conclusões e apontamos direções para trabalhos futuros.

## 2. Modelo de Canal de Desvanecimento

Em ambientes com múltiplos percursos, o sinal recebido pode ser modelado como a superposição de diversas ondas com amplitudes e fases aleatórias. Em razão do *Central Limit Theorem* (CLT), a combinação de múltiplas componentes independentes tende a resultar em uma distribuição gaussiana. Esse fenômeno fundamenta os modelos de desvanecimento da classe gaussiana, nos quais os *clusters* de ondas são representados como somas de variáveis aleatórias gaussianas [Parente et al. 2020b].

Neste trabalho, considera-se um modelo geral de desvanecimento capaz de representar múltiplos *clusters*, componentes especulares e potências arbitrárias em ambientes não lineares NTN-NOMA. Inicialmente, define-se a potência do canal  $B$  como a soma de  $M$  variáveis aleatórias gaussianas quadráticas:

$$B^\alpha = \sum_{i=1}^M X_i^2, \quad (1)$$

em que o parâmetro  $\alpha > 0$  representa a não linearidade do canal,  $M$  denota o número de componentes gaussianas, e  $X \triangleq [X_1, X_2, \dots, X_M]^T$  segue uma *Probability*

*Density Function* (PDF) gaussiana multivariada com vetor de média  $m \triangleq \mathbb{E}[X] = [\mathbb{E}[X_1], \mathbb{E}[X_2], \dots, \mathbb{E}[X_M]]^T$  e matriz de covariância  $\Sigma \triangleq \mathbb{E}[(X - m)(X - m)^T]$  [Parente et al. 2023]. Note que  $\mathbb{E}[X_i] = m_i$  e  $\mathbb{V}[X_i] = \sigma_i^2, \forall i \in \mathcal{M}$ , em que  $\mathcal{M} \triangleq \{1, \dots, M\}$ . A correspondente matriz de covariância, positiva definida, pode ser escrita como

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1,M}\sigma_1\sigma_M \\ \rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2,M}\sigma_2\sigma_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1,M}\sigma_1\sigma_M & \rho_{2,M}\sigma_2\sigma_M & \cdots & \sigma_M^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

em que  $\rho_{i,j} \equiv \rho(X_i, X_j), \forall (i, j) \in \mathcal{M}^2$ . Assim, a PDF gaussiana conjunta de  $X$  é dada por

$$f_X(x) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}(x - m)^T \Sigma^{-1}(x - m)\right]}{[(2\pi)^M \det(\Sigma)]^{\frac{1}{2}}}, \quad (3)$$

em que  $x \triangleq [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$ .

A análise exata do desempenho do sistema, em termos de Probabilidade de Indisponibilidade, para esse modelo geral de desvanecimento depende da avaliação de uma integral multidimensional sobre a PDF gaussiana multivariada em (3). A PDF da potência do canal associada ao modelo de desvanecimento em (1) pode ser expressa como

$$f_B(\beta) = \alpha \beta^{\frac{\alpha}{2}-1} [(2^{\frac{2}{M}+3}\pi)^M \det(\Sigma)]^{-\frac{1}{2}} \int_0^{\beta^{\frac{\alpha}{2}}} \int_0^{\beta^{\frac{\alpha}{2}}-s_M} \cdots \int_0^{\beta^{\frac{\alpha}{2}}-\sum_{i=3}^M s_i} \psi(s) \, ds_2 \cdots ds_{M-1} ds_M, \quad (4)$$

em que

$$\psi(s) \triangleq \left( \prod_{i=1}^M \sqrt{s_i} \right)^{-1} \sum_{j=1}^{2^M} \exp\left[-\frac{1}{2}(r_j - m)^T \Sigma^{-1}(r_j - m)\right], \quad (5)$$

com  $s_i \triangleq x_i^2, s \triangleq [s_1, s_2, \dots, s_M]^T, s_1 = \beta^{\alpha/2} - \sum_{i=2}^M s_i$ , e o  $j$ -ésimo vetor  $r_j$  é definido para cada  $j \in \{1, \dots, 2^M\}$ , contemplando todas as  $2^M$  combinações possíveis de sinais positivos e negativos das componentes  $\{\sqrt{s_i}\}_{i=1}^M$  [Parente et al. 2023].

A métrica de desempenho analisada neste trabalho é a Probabilidade de Indisponibilidade ( $P_{\text{out}}$ ), definida como a probabilidade de que a *Signal to Noise Ratio* (SNR) instantânea  $\gamma$  de um usuário seja inferior a um limiar requerido  $\gamma_{\text{th}}$ , isto é,

$$P_{\text{out}} \triangleq P[\gamma < \gamma_{\text{th}}] = \int_0^{\frac{\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}}} f_B(\beta) d\beta, \quad (6)$$

em que  $\bar{\gamma}$  é a SNR média quando  $\mathbb{E}[B] = 1$ . Essa métrica também pode ser analisada em termos dos ganhos de diversidade e de codificação. Como será discutido ao longo do artigo, tais ganhos são diretamente influenciados pelos diferentes parâmetros do modelo de desvanecimento considerado.

### 3. Modelo do Sistema

O modelo do sistema e a formulação da SINR adotados neste trabalho, incluindo os princípios do NOMA, a estratégia de alocação de potência e a consideração de imperfeições de *hardware* e de cancelamento de interferência, são baseados em [Lima et al. 2022].

Diferentemente das técnicas de acesso múltiplo ortogonal, nas quais os recursos de rádio em tempo e/ou frequência são alocados de forma exclusiva para cada usuário, o NOMA permite que múltiplos usuários compartilhem simultaneamente os mesmos recursos. A separação entre os sinais é realizada no domínio da potência, o que possibilita aumentar a eficiência espectral e favorecer a conectividade massiva em redes de comunicação sem fio. No enlace *downlink*, o princípio básico de operação do NOMA baseia-se no emprego de *Superposition Coding* (SC) no transmissor e de SIC no receptor.

#### 3.1. Superposition Coding

No transmissor de um sistema NOMA, as mensagens destinadas a diferentes usuários são sobrepostas em um único sinal a ser transmitido pela interface aérea. Para que a separação dessas mensagens seja viável no receptor, a unidade de processamento em banda base atribui diferentes níveis de potência a cada uma delas. Considerando que o transmissor dispõe de um orçamento total de potência  $P$  e que os fatores de alocação de potência para os Usuários 1 e 2 são  $p_1$  e  $p_2$ , respectivamente, o sinal sobreposto para um sistema com dois usuários é dado por

$$x = \sqrt{p_1 P} s_1 + \sqrt{p_2 P} s_2. \quad (7)$$

Essa alocação de potência não é arbitrária, sendo fundamental para o funcionamento adequado da técnica. Em geral, usuários com piores condições de canal, comumente denominados usuários mais distantes, recebem uma parcela maior da potência disponível. Em contrapartida, usuários com melhores condições de canal, ou usuários mais próximos, recebem uma fração menor de potência.

#### 3.2. Successive Interference Cancellation

No receptor, o sinal transmitido  $x$  é observado de maneira distinta por cada usuário, uma vez que ele é afetado pelas condições individuais de canal  $h_k$  e pela adição de ruído gaussiano branco aditivo (*Additive White Gaussian Noise* (AWGN))  $n_k$ . Para um Usuário  $k$ , o sinal recebido  $y_k$  pode ser expresso como

$$y_k = h_k^H x + n_k = h_k^H (\sqrt{p_1 P} s_1 + \sqrt{p_2 P} s_2) + n_k. \quad (8)$$

De acordo com a estratégia de alocação de potência descrita na subseção anterior, o usuário mais distante recebe o sinal superposto e trata o sinal indesejado como interferência adicional em sua medida de SINR. Por outro lado, o usuário com melhor condição de canal recebe o sinal destinado ao usuário mais distante com qualidade suficiente para decodificá-lo primeiro e, em seguida, realizar o cancelamento sucessivo da interferência, de modo que reste apenas a sua própria mensagem.

#### 3.3. Imperfeições do SIC e degradação de *hardware*

Em sistemas práticos, as limitações do *hardware* afetam a qualidade das observações do canal e, conseqüentemente, influenciam o cálculo da SINR dos usuários. Considera-se, neste trabalho, um sistema NOMA *downlink* com apenas dois usuários. A SNR de

transmissão é definida como  $\xi = P/N_0$ , em que  $P$  é a potência total de transmissão do UAV e  $N_0$  é a densidade espectral de potência do ruído. Nessas condições, a SINR do usuário mais distante pode ser escrita como

$$\gamma_1 = \frac{\xi|h_1|^2 p_1}{\xi|h_1|^2(p_2 + \kappa^2) + 1}, \quad (9)$$

em que  $0 \leq \kappa \leq 1$  representa o nível de degradação de *hardware*. Quando  $\kappa = 0$ , assume-se a ausência de falhas de *hardware*; por outro lado, quando  $\kappa = 1$ , considera-se um cenário de degradação máxima.

Além disso, a hipótese de cancelamento perfeito é, em geral, irrealista em sistemas reais. Considerando o mesmo cenário, a SINR do usuário mais próximo pode ser expressa como

$$\gamma_2 = \frac{\xi|h_2|^2 p_2}{\xi|h_2|^2(p_1\epsilon + \kappa^2) + 1}, \quad (10)$$

em que  $0 \leq \epsilon \leq 1$  denota o grau de imperfeição do SIC. Quando  $\epsilon = 0$ , assume-se cancelamento perfeito; quando  $\epsilon = 1$ , considera-se que não há cancelamento do sinal do Usuário 1.

### 3.4. Geometria do modelo e caracterização do canal

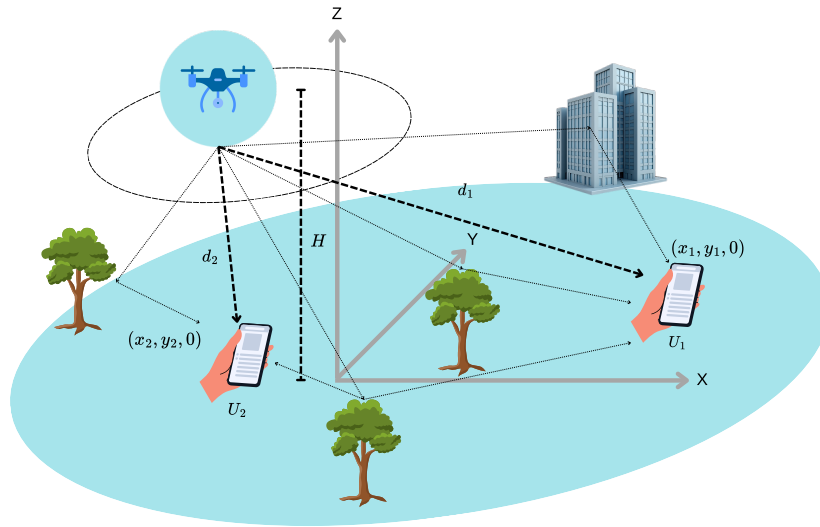


Figura 1. Modelo do sistema NTN.

No modelo proposto em [Lima et al. 2022], o UAV segue uma trajetória circular a uma altitude fixa  $H$  e com raio  $r_1$ , fornecendo cobertura a usuários distribuídos aleatoriamente em uma região de raio  $r_2$ . A relação espacial entre o nó aéreo localizado em  $(x, y, z)$  e um usuário posicionado em  $(x_m, y_m, 0)$  é descrita pela distância euclidiana

$$d_m = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + H^2}. \quad (11)$$

**Tabela 1. Parâmetros de simulação.**

Parâmetro de simulação	Valor	Parâmetro de simulação	Valor
Amostras de Monte Carlo	10000	Taxa-alvo do usuário secundário	0,5
Raio do UAV	2,0	Degradações residuais de <i>hardware</i>	0,05
Raio da região dos usuários	600	SIC imperfeita residual	0,05
Altura do UAV	600	Coefficiente de potência do usuário primário	0,8
Taxa-alvo do usuário primário	0,5	Coefficiente de potência do usuário secundário	0,2
SNR inicial (dB)	-20	SNR final (dB)	30
Semente para o PRNG	123	Frequência (MHz)	2000

Para modelar a atenuação de larga escala, adota-se o modelo de *Free Space Path Loss* (FSPL), adequado a cenários com predominância de LOS, típicos de comunicações entre UAV e usuários terrestres em baixas altitudes, como ilustrado na Figura 1. A perda de percurso, em dB, é dada por

$$PL_{FSPL}(dB) = 32.4 + 20 \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \log_{10}(d_{km}), \quad (12)$$

em que  $f_{MHz}$  representa a frequência de operação em MHz e  $d_{km}$  corresponde à distância  $d$  expressa em quilômetros. Para a simulação do ganho de canal, a perda de percurso é convertida para escala linear como  $L(d) = 10^{-\frac{PL_{FSPL}(dB)}{10}}$ . Define-se ainda um termo de normalização correspondente à perda em uma distância de referência de 1 km, dado por  $L_0 = 10^{-\frac{PL_0(dB)}{10}}$ , em que  $PL_0(dB) = 32.4 + 20 \log_{10}(f_{MHz})$ . O ganho de potência do canal para cada usuário é então modelado como

$$|h|^2 = \frac{L(d)}{L_0} B, \quad (13)$$

em que  $B$  representa o termo de desvanecimento de pequena escala, definido de acordo com o modelo de canal apresentado na Seção 2.

Por fim, dentre os usuários considerados, define-se como canal primário aquele associado ao menor ganho de canal e como canal secundário aquele associado ao maior ganho de canal, permitindo a avaliação do desempenho do sistema sob distintas condições de propagação.

#### 4. Resultados Numéricos e Discussão

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de simulação adotados nos experimentos numéricos. Esses parâmetros foram definidos de modo a representar, de forma realista, o ambiente de comunicação entre um UAV e usuários terrestres, considerando aspectos físicos do enlace e elementos práticos do sistema. O número de amostras de Monte Carlo foi fixado em

10.000, a fim de garantir a convergência estatística dos resultados e reduzir a variabilidade amostral associada à geração aleatória das posições dos usuários e das realizações do canal.

Os parâmetros geométricos do sistema, tais como o raio da trajetória do UAV (2,0 km), o raio da região de usuários (600 m) e a altura de voo (600 m), definem a topologia espacial da simulação e influenciam diretamente a distribuição das distâncias entre o UAV e os usuários. As taxas-alvo dos usuários primários e secundários, ambas fixadas em 0,5, representam os requisitos mínimos de desempenho considerados para cada enlace no cenário avaliado. A faixa de SNR ( $\xi$ ), variando de  $-20$  dB a  $30$  dB, foi escolhida de modo a abranger desde regimes severamente limitados por ruído até condições favoráveis de recepção. Além disso, a semente do gerador de números pseudoaleatórios foi fixada em 123, assegurando a reprodutibilidade dos experimentos.

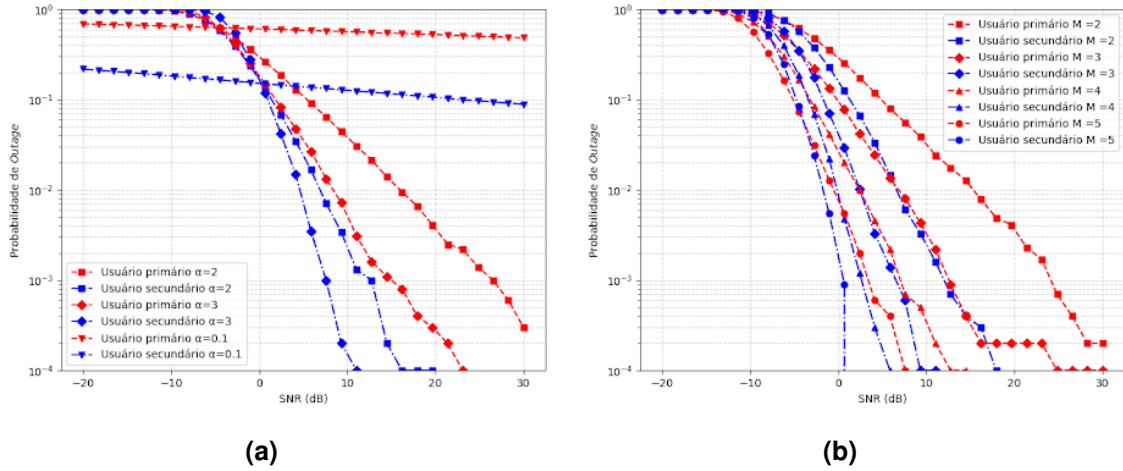
A simulação também incorpora efeitos práticos típicos de sistemas sem fio, como degradações residuais de *hardware* e cancelamento imperfeito de interferência, ambos fixados em 0,05. Os coeficientes de potência atribuídos aos usuários primário e secundário foram definidos como 0,8 e 0,2, respectivamente, em conformidade com o princípio do NOMA, no qual maior potência é alocada ao usuário com condição de canal menos favorável. Por fim, a frequência de operação foi fixada em 2000 MHz, valor compatível com faixas de operação usualmente consideradas em comunicações aéreas e terrestres, afetando diretamente a perda de percurso calculada pelo modelo FSPL.

Nesta seção, analisa-se o desempenho da Probabilidade de Indisponibilidade em função da SNR média, distinguindo-se o comportamento do usuário primário e do usuário secundário no sistema NTN-NOMA. As Figuras 2, 3 e 4 apresentam a variação dessa métrica para diferentes parâmetros do modelo de canal generalizado, evidenciando a sensibilidade do sistema tanto aos parâmetros estatísticos do canal quanto às não-idealidades consideradas. Em todas as configurações avaliadas, observa-se a redução da Probabilidade de Indisponibilidade com o aumento da SNR média, comportamento coerente com a teoria de comunicações sem fio, uma vez que níveis mais elevados de SNR reduzem a probabilidade de a SNR instantânea permanecer abaixo do limiar exigido.

Ao se comparar o comportamento dos usuários, observa-se que o usuário secundário, usualmente associado à melhor condição de canal no contexto NOMA, tende a apresentar uma redução mais acentuada da Probabilidade de Indisponibilidade em determinadas faixas de SNR. Esse comportamento decorre diretamente do mecanismo de SIC: quando o usuário secundário consegue decodificar corretamente o sinal do usuário primário, ele é capaz de remover essa interferência antes da detecção do seu próprio sinal, o que resulta em melhora significativa de desempenho.

Outro aspecto relevante diz respeito à influência dos parâmetros do canal sobre as curvas de  $P_{\text{out}}$ . Em particular, o ganho de diversidade é diretamente proporcional à não linearidade do meio e à quantidade de componentes gaussianas do modelo. Assim, à medida que  $\alpha$  e/ou  $M$  aumentam, observa-se um aumento na inclinação assintótica das curvas, resultando em menores valores de Probabilidade de Indisponibilidade para uma dada SNR. Esse comportamento pode ser observado nas Figuras 2a e 2b, nas quais as curvas decrescem de forma mais acentuada com o aumento da não linearidade do canal e do número de componentes gaussianas. Ainda com base na Figura 2a, nota-se a mudança

de comportamento quando o canal deixa a condição linear, correspondente a  $\alpha = 2$ , e passa a operar em regime não linear, isto é, para  $\alpha \neq 2$ .



**Figura 2. a) Probabilidade de Indisponibilidade ( $P_{out}$ ) versus a SNR para diferentes valores de  $\alpha$ . b) Probabilidade de Indisponibilidade ( $P_{out}$ ) versus a SNR para diferentes valores de  $M$ .**

Além disso, observa-se que o incremento no ganho de diversidade não cresce indefinidamente com  $M$ . A partir dos resultados, verifica-se que o aumento da inclinação da curva é mais expressivo quando  $M$  varia de 2 para 3 do que quando varia de 3 para 4, em consonância com o comportamento esperado e discutido em [Parente et al. 2023]. Isso indica que os ganhos marginais de diversidade tendem a diminuir à medida que  $M$  assume valores mais elevados, como mostra a Figura 2b.

Outras análises podem ser obtidas a partir das Figuras 3a e 3b. Na Figura 3a, observa-se que a correlação entre as componentes gaussianas do canal afeta predominantemente a posição horizontal das curvas de  $P_{out}$ , caracterizando uma alteração no ganho de codificação. À medida que a correlação aumenta, as componentes do canal tornam-se menos independentes entre si, reduzindo a variabilidade efetivamente explorável pelo sistema e, conseqüentemente, deteriorando o desempenho para uma mesma SNR média. Em outras palavras, valores mais elevados de correlação tendem a deslocar as curvas para a direita, indicando a necessidade de maior SNR para atingir o mesmo nível de Probabilidade de Indisponibilidade. Já na Figura 3b, o parâmetro  $\sigma$ , relacionado à potência das componentes de ondas espalhadas do modelo, influencia bastante o ganho de codificação. Observa-se que valores crescentes de  $\sigma$  promovem deslocamentos horizontais expressivos nas curvas, refletindo alterações na condição do canal. Assim, embora correlação e  $\sigma$  não modifiquem a inclinação assintótica das curvas, ambos exercem papel decisivo no posicionamento do desempenho em termos de SNR, conforme esperado [Parente et al. 2023].

Por fim, a Figura 4 evidencia o impacto do parâmetro  $k$  sobre a Probabilidade de Indisponibilidade. No contexto do modelo generalizado, esse parâmetro está associado à razão entre a potência das componentes especulares (LOS, por exemplo) e a potência das componentes espalhadas do canal. Observa-se que, à medida que  $k$  aumenta, as curvas de

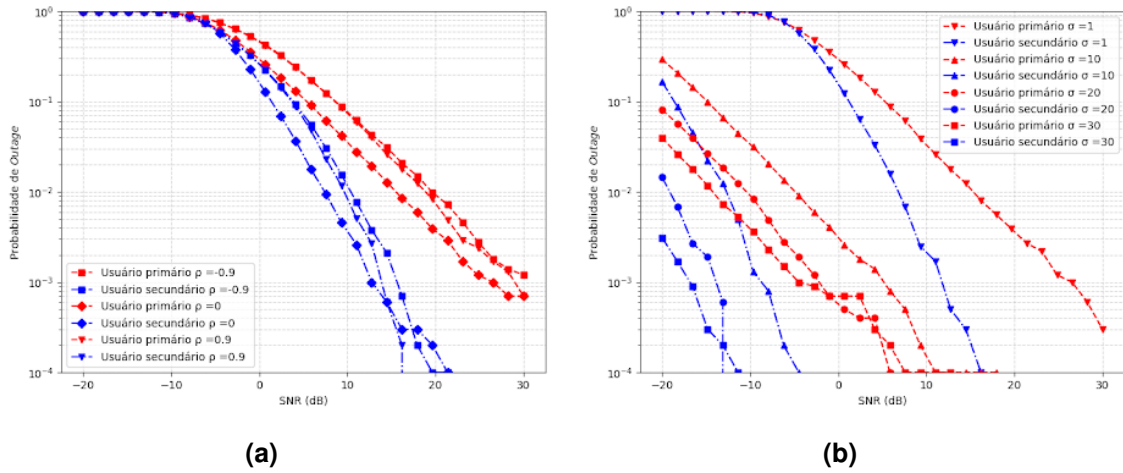


Figura 3. a) Probabilidade de Indisponibilidade ( $P_{out}$ ) versus a SNR para diferentes valores de correlação. b) Probabilidade de Indisponibilidade ( $P_{out}$ ) versus a SNR para diferentes valores de  $\sigma$ .

$P_{out}$  tendem a se deslocar para a esquerda, indicando melhora no desempenho do sistema para uma mesma SNR média. Esse comportamento ocorre porque valores mais elevados de  $k$  indicam uma componente especular de alta potência (se comparada às componentes espalhadas) no canal, reduzindo a Probabilidade de Indisponibilidade.

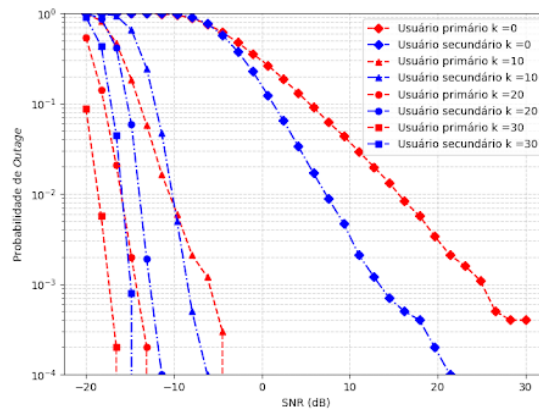


Figura 4. Probabilidade de Indisponibilidade ( $P_{out}$ ) versus a SNR para diferentes valores de  $k$ .

## 5. Conclusão

A crescente demanda por sistemas de comunicação mais robustos e eficientes impõe que as tecnologias de próxima geração operem com elevada eficiência espectral, mesmo em cenários de propagação severos e heterogêneos, como aqueles característicos das redes não terrestres. Neste trabalho, investigou-se o desempenho de uma rede NTN-NOMA assistida por UAV, empregando-se um modelo de desvanecimento generalizado capaz de representar fenômenos complexos, tais como a não linearidade do meio, a presença

de múltiplos *clusters* de propagação e a correlação entre componentes do canal. As expressões analíticas consideradas para a Probabilidade de Indisponibilidade apresentaram elevada aderência aos resultados obtidos por simulações de Monte Carlo, corroborando a consistência da modelagem adotada para a análise de enlaces aéreos em cenários NTN.

Os resultados numéricos evidenciaram que o desempenho do sistema é fortemente sensível às características intrínsecas do canal, sendo o ganho de diversidade diretamente influenciado pela não linearidade e pelo número de componentes gaussianas. Verificou-se que o aumento desses parâmetros acentua a inclinação da curva de Probabilidade de Indisponibilidade, indicando maior robustez frente às flutuações do sinal em ambientes com múltiplos *clusters*. Adicionalmente, a análise destacou a relevância da alocação de potência no contexto NOMA, mostrando que o balanceamento entre os usuários primário e secundário é decisivo para que ambos satisfaçam os requisitos mínimos de taxa, especialmente na presença de interferência residual e limitações de *hardware*.

Além de abranger distribuições clássicas, como Rayleigh e Rice, o modelo de canal adotado mostrou-se particularmente relevante por permitir uma caracterização mais ampla e realista das condições de propagação esperadas em cenários NTN-NOMA. Nesse sentido, a principal contribuição desta análise está em evidenciar que o emprego de modelos de desvanecimento mais gerais não apenas amplia a fidelidade da avaliação de desempenho, mas também fornece uma compreensão mais profunda de como os parâmetros de não linearidade, correlação, número de componentes e potência de componente especular/espalhada do canal afetam a confiabilidade do sistema. Essa investigação é especialmente valiosa em ambientes NTN, nos quais a heterogeneidade dos enlaces e a presença de condições de propagação altamente variáveis tornam inadequadas interpretações baseadas apenas em modelos clássicos mais restritos.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto Brasil 6G – Fase III, com apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), sob o número de processo 01245.020548/2021-07, e em colaboração com o CPQD.

## Referências

- Ahmed, M., Khan, W. U., Al-Wesabi, F. N., Ebad, S. A., Mesfer Alshahrani, H., Kumar Dutta, A., ElHalawany, B. M., and Li, X. (2026). Efficient resource management for noma-enabled uav communications in 6g irs-assisted vehicular networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 27(2):2706–2715.
- Ayanampudi, H., Shaik, T., and Syed, N. P. (2026). Performance analysis of noma enabled uav assisted cloud radio access network over composite faded channels. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 209:156267.
- Belmekki, B. E. Y. and Alouini, M.-S. (2024). Noma as the next-generation multiple access in nonterrestrial networks. *Proceedings of the IEEE*, 112(9):1303–1345.
- Cardoso, F. A. C. M., Parente, F. R. A., and da Silva, M. R. P. (2025). Characterization of Power-Domain NOMA Versus MIMO in 6G OFDM Networks. In *2025 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pages 660–664.

- Dao, T.-T. T., Nguyen, S. Q., Nhung-Nguyen, H., Nguyen, P. X., and Kim, Y.-H. (2021). Performance evaluation of downlink multiple users noma-enable uav-aided communication systems over nakagami-m fading environments. *IEEE Access*, 9:151641–151653.
- Fan, X., Zhou, H., Sun, K., Chen, X., and Wang, N. (2023). Channel assignment and power allocation utilizing noma in long-distance uav wireless communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(10):12970–12982.
- Han, A., Lv, T., and Zhang, X. (2019). Outage performance of noma-based uav-assisted communication with imperfect sic. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6.
- Hoang, T. M., Nguyen, B. C., Thanh, H. L. T., Tran, X. N., and Hiep, P. T. (2024). Finite block length noma mu pairing uav-enable system: Performance analysis and optimization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 23(10):9804–9820.
- Lima, B., Fachada, N., Dinis, R., Costa, D. B., and Beko, M. (2022). Uavnoma: A uav-noma network model under non-ideal conditions. *Journal of Open Research Software*, 10(9).
- M. Elhalawany, B., Gamal, C., Elsayed, A., Elsherbini, M. M., Fouda, M. M., and Ali, N. (2022). Outage analysis of coordinated noma transmission for leo satellite constellations. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3:2195–2202.
- Neelam, M. and Sundru, A. (2025). An innovative method for improving the performance of uav-sm-noma for 6g networks over generalized fading channels. *International Journal of Communication Systems*, 38(5):e6032. e6032 IJCS-24-3457.R1.
- Nguyen, T.-T. and Nguyen, A.-V. (2023). Outage analysis of cognitive inspired noma networks in the presence of imperfect sic, cci, and non-id fading channels. *Computer Networks*, 234:109909.
- Parente, F. R. A., Calmon, F. P., and Filho, J. C. S. S. (2020a). Asymptotic system performance over generalized fading channels with application to maximal-ratio combining. *Journal of Communication and Information Systems*, 35(1):171–180.
- Parente, F. R. A., Calmon, F. P., and Filho, J. C. S. S. (2020b). High-SNR performance in Gaussian-class fading. In *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–7.
- Parente, F. R. A., Calmon, F. P., and Filho, J. C. S. S. (2023). Unified framework for diversity and coding gains over a broad Gaussian class of fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(12):15916–15929.
- Teng, T., Xie, Y., and Kang, J. (2025). Security analysis of NOMA integrated satellite-terrestrial relay networks with analog beamforming. *Computer Networks*, 264:111263.
- Xie, S., Zhang, B., Guo, D., and Yang, K. (2019). Outage analysis and optimization of NOMA-based integrated satellite-terrestrial system with an AF relay. In *2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*.
- Yue, X., Liu, Y., Yao, Y., Li, T., Li, X., Liu, R., and Nallanathan, A. (2020). Outage behaviors of NOMA-based satellite network over shadowed-rician fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(6):6818–6821.