

# Sistemas UAV-NOMA com Alocação Adaptativa de Potência

Brena Kelly S. Lima, Daniel Benevides da Costa e Ugo Silva Dias

**Resumo**— Este artigo emprega acesso múltiplo não-ortogonal (NOMA, do inglês *Non-Orthogonal Multiple Access*) em comunicações via veículo aéreo não-tripulado (UAV, do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*) em um cenário com múltiplos usuários terrestres. Para maximizar a taxa mínima entre usuários e garantir justiça de taxa, um problema de otimização para a alocação dos coeficientes de potência no UAV é formulado. Em particular, uma expressão em forma fechada para os coeficientes de alocação de potência é derivada e um algoritmo que produz a solução ótima é desenvolvido. Para fins comparativos, o esquema de alocação fixa de potência também é investigado no qual uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* é derivada. O desempenho do esquema proposto é validado por meio de simulações numéricas, que comprovam a sua superioridade em termos de equidade de taxa e probabilidade de *outage*.

**Palavras-Chave**— Alocação de potência, múltiplos usuários, NOMA, UAV.

**Abstract**— This paper employs NOMA in UAV communications with multiple ground users. In order to maximize the minimum rate among users and guarantee their rate fairness, an optimization problem for the power coefficient allocation in the UAV is formulated. In particular, a closed-form expression for the power allocation coefficients is derived and an algorithm that yields the optimal solution is developed. For comparative analysis, a fixed power allocation scheme is also derived in which a closed-form expression is derived. The performance of the proposed scheme is validated by numerical simulations, which prove its superiority in terms of rate fairness and outage probability.

**Keywords**— Power allocation, multiple users, NOMA, UAV.

## I. INTRODUÇÃO

A demanda por veículos aéreos não-tripulados (UAVs, do inglês *Unmanned Aerial Vehicles*) em redes de comunicação tem aumentado nos últimos anos devido à sua relação custo-benefício, capacidade de executar tarefas complexas em diversos cenários, baixa latência e reconfiguração flexível em comparação com as estações base (BS, do inglês *Base Station*) fixas no solo [1], [2]. Particularmente, redes habilitadas para UAV se beneficiam da componente de linha de visada (LoS, do inglês *Line-of-Sight*) dominante do *link* ar-terra (AtG, do inglês *Air-to-Ground*), que proporcionam menor perda de propagação e conseqüentemente alcançam melhor desempenho na qualidade de serviço, permitindo redes de comunicação robustas e confiáveis [3].

Em paralelo, a técnica de múltiplo acesso não-ortogonal (NOMA, do inglês *Non-Orthogonal Multiple Access*) tem sido

amplamente reconhecida como uma tecnologia candidata a fazer parte das próximas gerações dos sistemas de comunicações sem fio [4], [5]. Ao contrário da técnica de acesso múltiplo ortogonal (OMA, do inglês *Orthogonal Multiple Access*), NOMA permite que um transmissor atenda a vários receptores simultaneamente via multiplexação no domínio da potência ou no domínio do código, oferecendo maior justiça entre os usuários, baixa latência na transmissão, alta conectividade e melhoria significativa na eficiência espectral [6].

A junção da técnica NOMA com comunicações do tipo UAV permite segmentos para suportar diversas aplicações requisitadas pela próxima geração de redes sem fio, atraindo consideráveis interesses de pesquisas acadêmicas e industriais. Em [7], os autores aplicam o modelo de desvanecimento de Rician em uma estação UAV que se comunica com dois usuários terrestres usando NOMA e investigam sua probabilidade de *outage*. Em [8], os autores investigam um sistema NOMA habilitado para UAV com dois usuários terrestres e desenvolvem soluções para maximizar a taxa dos usuários por meio de otimização de potência e da altitude do UAV. No trabalho [9], os autores investigam o desempenho de redes UAV-NOMA com propagação de erro e cancelamento sucessivo de interferências (SIC, do inglês *Successive Interference Cancellation*) imperfeito. Expressões para a probabilidade de *outage* são derivadas, bem como o intervalo de taxa ideal para minimizar o efeito da propagação de erro. Um estudo sobre redes UAV-NOMA com múltiplos usuários foi realizado em [10]. Os autores formularam um problema de otimização para maximizar a mínima taxa entre os usuários sob restrições da potência total, largura de banda total, altitude do UAV e largura de feixe da antena, e um algoritmo para solução do problema foi desenvolvido. Um aprimoramento de eficiência energética para uma rede UAV-NOMA foi abordado em [11]. Os autores utilizaram uma estação base aérea (e.g., UAV) para fornecer uma solução para as altas demandas de tráfego de dados requeridas redes futuras de comunicação sem fio.

Embora os trabalhos acima mencionados tenham fornecido contribuições interessantes para a área, alguns pontos relacionados a alocação de potência em sistemas UAV-NOMA ainda permanecem para ser investigados. Dessa forma, diferente dos trabalhos supracitados, este trabalho investiga o problema de alocação de potência baseado em equidade de taxa. Especificamente, um problema de otimização é formulado e expressões em forma fechada para os coeficientes de alocação de potência são obtidas. Além disso, um algoritmo que fornece a solução ótima para a alocação de potência no UAV é desenvolvido. Para fins comparativos, o esquema de alocação fixa de potência também é investigado no qual uma expressão em forma

B. K. S. Lima e D. B. da Costa, Departamento de Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, e-mails: {brenalima@alu.ufc.br, danielbcosta@ieee.org}.

U. S. Dias, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, email: ugodias@ieee.org.

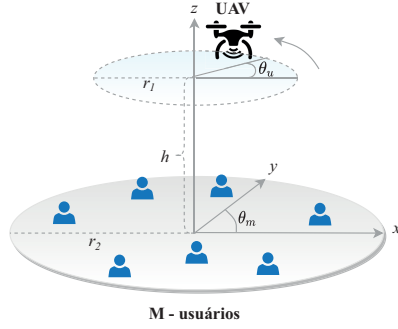


Fig. 1. Modelo do sistema.

fechada para a probabilidade de *outage* é derivada. Resultados de simulação mostram a superioridade do esquema proposto.

## II. MODELO DO SISTEMA

O modelo do sistema considerado neste trabalho consiste em uma rede *downlink* NOMA com múltiplos usuários e uma estação base aérea do tipo UAV, como ilustrado na Fig. 1. O sistema contém uma estação aérea que se comunica com  $M$  usuários. Considera-se que cada nó da rede é equipado com uma antena e que os usuários exigem a mesma taxa de dados a ser fornecida de forma aceitável.

Considera-se também que o UAV voa continuamente com uma velocidade constante em uma trajetória circular de raio  $r_1$  e altitude fixa  $h$ , e que os usuários estão dispostos aleatoriamente em uma região de raio  $r_2$ . Considerando as coordenadas cartesianas tridimensionais, a localização do UAV  $(x, y, z)$  e do  $m$ -ésimo usuário  $(x_m, y_m, 0)$ , com  $m \in \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ , pode ser representada, respectivamente, por  $(r_1 \cos \theta_u, r_1 \sin \theta_u, h)$  e  $(r_2 \cos \theta_m, r_2 \sin \theta_m, 0)$ , onde  $\theta_u \in (0 \leq \theta_u \leq 2\pi)$  e  $\theta_m \in (0 \leq \theta_m \leq 2\pi)$  são definidos como os ângulos de azimute do UAV e do  $m$ -ésimo usuário ao longo dos seus respectivos círculos. Com base nesse modelo, a distância Euclidiana entre o UAV e o  $m$ -ésimo usuário pode ser expressa como:

$$d_m = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + h^2}. \quad (1)$$

Como os *links* AtG geralmente contém a presença de uma forte componente de LoS e de outros componentes dos multipercursos, os canais são modelados utilizando a distribuição de Rician. Um canal com desvanecimento Rician é descrito usando dois parâmetros: 1) o fator riciano ( $K$ ) e 2) a potência total ( $P_{LoS}$ ) do caminho de LoS e componentes de multipercursos ( $P_{LoS} = \mu^2 + 2\sigma^2$ ), em que  $\mu$  denota a média e  $\sigma$  denota a variância. Para um dado  $K$  e  $P_{LoS}$ , os valores de  $\mu$  e  $\sigma$  são calculados da seguinte forma:  $\mu = \sqrt{\frac{K}{K+1} P_{LoS}}$  e  $\sigma = \frac{P_{LoS}}{\sqrt{2(K+1)}}$ .

O canal entre o UAV e o  $m$ -ésimo usuário, modelado como variáveis Gaussianas complexas, é dado por  $h_m = \frac{g_m}{\sqrt{d_m^\psi}}$ , em que  $g_m \sim \mathcal{CN}(\mu, 2\sigma^2)$  e  $\psi$  representa o expoente de perda de percurso. Além disso, assume-se que todos os canais são distorcidos por uma componente de ruído gaussiano branco aditivo (AWGN, do inglês *additive white Gaussian noise*) com média zero e variância unitária. Sem perda de generalidade,

assume-se que  $|h_1|^2 < |h_2|^2 < \dots < |h_M|^2$ . A função de densidade de probabilidade (FDP) do ganho de canal não ordenado  $|g_m|^2$  é dada por uma distribuição chi-quadrada não central, podendo ser expressa como [12]:

$$f_{|g_m|^2}(x) = \frac{(K+1)e^{-K}}{\Omega_m} e^{-\frac{K+1}{\Omega_m}} \mathcal{I}_0 \left( 2\sqrt{\frac{K(K+1)x}{\Omega_m}} \right), \quad (2)$$

em que  $\Omega_m = \mathbb{E}[|g_m|^2] = 1$ , e  $\mathcal{I}_0(\cdot)$  denota a função de Bessel modificada de primeira espécie e ordem zero. A função de distribuição acumulada (FDA) é dada por [12]:

$$F_{|g_m|^2}(x) = 1 - \mathcal{Q} \left( \sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(K+1)x}{\Omega_m}} \right), \quad (3)$$

em que  $\mathcal{Q}(\cdot, \cdot)$  denota a função de Marcum-Q de primeira ordem.

Baseado nos princípios de NOMA, o processo de transmissão inicia-se com o UAV sobrepondo as mensagens de todos usuários por meio da codificação por sobreposição (SC, do inglês *Superposition Coding*) e transmitindo a mensagem sobreposta para todos os usuários. No receptor, todos os usuários empregam a técnica SIC para decodificarem suas respectivas mensagens. Dessa forma, o  $m$ -ésimo usuário fraco tenta decodificar sua mensagem tratando a mensagem do  $k$ -ésimo usuário forte como interferente,  $m < k$ , e depois remove a mensagem de sua observação de maneira sucessiva. Em outras palavras, a mensagem do  $k$ -ésimo usuário será tratada como ruído quando o  $m$ -ésimo usuário estiver decodificando sua respectiva mensagem. Portanto, a razão sinal-interferência-ruído (SINR, do inglês *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) para o  $m$ -ésimo usuário pode ser expressa como:

$$\gamma_m = \frac{\rho |h_m|^2 \alpha_m}{\rho |h_m|^2 \sum_{k=m+1}^M \alpha_k + 1}, \quad (4)$$

em que  $\rho = P/\sigma^2$  denota a razão sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) de transmissão no UAV,  $P$  representa a potência de transmissão no UAV e  $\alpha_m$  denota os coeficientes de potência para as mensagens dos usuários, com  $\sum_{m=1}^M \alpha_m \leq 1$  e  $\alpha_m > 0$ .

Dessa forma, a taxa de transmissão instantânea para a mensagem do  $m$ -ésimo usuário pode ser descrita como:

$$R_m = \log_2(1 + \gamma_m). \quad (5)$$

## III. ALOCAÇÃO DOS COEFICIENTES DE POTÊNCIA PARA REDES UAV-NOMA COM MÚLTIPLOS USUÁRIOS

Nesta seção, investigar-se-á a alocação dos coeficientes de potência  $\alpha_m$  no UAV para maximizar a taxa mínima entre os usuários bem como garantir a sua equidade. Dessa forma, um problema de otimização para a alocação dos fatores de potência será formulado.

Como mencionado, o problema objetiva maximizar a taxa mínima entre os usuários, baseando-se em equidade de taxa. Com isso, o UAV precisa alocar os coeficientes potência adaptativamente nas mensagens dos usuários que serão sobrepostas e encaminhadas para os destinatários finais. A justiça de taxa pode ser alcançada por meio da alocação apropriada dos coeficientes de potência na mensagem sobreposta transmitida.

Baseado na informação do estado do canal obtida, o problema no UAV é formulado como:

$$\max_{\alpha_m} \min_{m \in \mathcal{M}} \left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_m) \right\}, \quad (6)$$

restrito a

$$\sum_{m=1}^M \alpha_m \leq 1, \quad (7)$$

$$0 \leq \alpha_m, \text{ para } m \in \mathcal{M}. \quad (8)$$

Ao analisar o problema (6), verifica-se que ele não é convexo pois a sua função objetivo não é convexa. Dessa forma, não é possível a obtenção da solução ótima por meio de solucionadores de otimização padrão.

*Lema I:* O problema de otimização (6) é quase-côncavo.

*Prova:* De acordo com [13], demonstrar a quase-concavidade de um problema é equivalente demonstrar que suas restrições são convexas e a sua função objetivo é quase-côncava. Inicialmente, pode-se ver que as restrições (7) e (8) são convexas devido as suas linearidades. Em seguida, para demonstrar que a função objetivo é quase-côncava, todos os seus conjuntos de nível superior  $S = \{\alpha_m | \min(\log_2(1 + \gamma_m)) \geq r\}$  devem ser convexas para  $r \in \mathbb{R}$ . Depois de algumas manipulações algébricas, as restrições do conjunto  $S$  podem ser reescritas como a seguinte desigualdade:

$$\rho|h_m|^2 \alpha_m \geq \beta \left( \rho|h_m|^2 \sum_{k=m+1}^M \alpha_k + 1 \right), \quad (9)$$

em que  $\beta = 2^r - 1$ . Com base em (9), verifica-se que os conjuntos de nível superior são convexas porque eles podem ser expressos como um conjunto convexo. Portanto, a função objetivo é quase-côncava. ■

Devido ao resultado obtido no Lema I, o problema (6) pode ser transformado em um problema de viabilidade convexo. Seja  $\epsilon^*$  o valor ótimo do problema de otimização (6) para um dado  $r > 0$ . Segue que:

$$\text{Encontrar } \alpha, \text{ restrito a (7), (8), e (9),} \quad (10)$$

se problema de viabilidade (10) for possível, o que implica  $\epsilon^* \leq r$ . Caso  $\epsilon^* > r$ , logo o problema é inviável. Em outras palavras, otimizar o problema inicial equivale resolver o seguinte problema:

$$\min_{\alpha} \left\{ \sum_{m=1}^M \alpha_m \right\} \text{ restrito a (8) e (9),} \quad (11)$$

e conferir se a solução obtida para o problema (11) satisfaz a restrição (7). Isso implica que, limitando adequadamente o valores de  $r$ , a solução ótima para o problema (9) pode ser obtida a partir de um algoritmo. Com base nisso, formulase o seguinte teorema para obter a expressão fechada dos coeficientes de potência do problema (11).

*Teorema I:* A solução ótima para o problema (11) é dada por:

$$\alpha_m^* = \frac{\beta}{\rho|h_m|^2} \left( \rho|h_m|^2 \sum_{k=m+1}^M \alpha_k + 1 \right), \quad (12)$$

para  $m = M, \dots, 1$ .

**Algoritmo 1:** Alocação dos coeficientes de potência no UAV para múltiplos usuários.

---

```

1 Defina  $r_{LB} = 0, r_{UB} = \log_2(1 + \rho|h_M|^2)$ ;
2 enquanto  $(r_{UB} - r_{LB}) \geq \tau$  faça
3   Defina  $r = (r_{UB} + r_{LB})/2$ ; Obtenha  $\alpha_m^*$  em (12);
4   se  $\sum_{m=1}^M \alpha_m^* \leq 1$  então
5      $r_{LB} = r; \epsilon^* = r; \alpha_m = \alpha_m^*$ ;
6   senão
7      $r_{UB} = r$ ;
8   fim
9 fim
10 Substitua  $\alpha_m$  em (4);
    
```

---

*Prova:* Para verificar a existência de uma solução ótima, as condições de Karush–Kuhn–Tucker (KKT) são necessárias. Dessa forma, usando as condições de KKT obtêm-se as seguintes equações:

$$\nabla \mathcal{L}(\alpha_m, \lambda_m, \delta_m) = 0. \quad (13a)$$

$$\alpha_m \rho|h_m|^2 \geq \beta(\rho|h_m|^2 \sum_{k=m+1}^M \alpha_k + 1), \quad (13b)$$

$$\alpha_m \geq 0. \quad (13c)$$

$$\lambda_m \geq 0, \delta_m \geq 0. \quad (13d)$$

$$\lambda_m(\beta(\rho|h_m|^2 \sum_{k=m+1}^M \alpha_k + 1) - \alpha_m \rho|h_m|^2) = 0, \quad (13e)$$

$$\delta_m \alpha_m = 0. \quad (13f)$$

em que  $\lambda_m$  e  $\delta_m$  são os multiplicadores de Lagrange, e o símbolo  $\nabla$  denota o operador gradiente. A função Lagrangiana  $\mathcal{L}(\cdot)$  correspondente ao problema de otimização (11) é dada por:

$$\mathcal{L}(\alpha_m, \lambda_m, \delta_m) = -\alpha_m + \lambda_m(\beta(\rho|h_m|^2 \sum_{k=m+1}^M \alpha_k + 1) - \rho|h_m|^2 \alpha_m) + \delta_m(\alpha_m). \quad (14)$$

Analisando a condição de estacionariedade, verifica-se que (13a) é estritamente positiva para todo  $m \in \mathcal{M}$ , que implica em  $\lambda_m > 0$  e  $\delta_m = 0$  devido a condição (13f). Similarmente, (13b) é estritamente positiva, implicando em  $\alpha_m > 0$  e  $\delta_m = 0$ . De acordo com (13e), (13f) e  $\lambda_m > 0$ , todas as restrições de (13b) devem ser iguais.

Baseado nas condições supracitadas, a solução para o problema de alocação dos coeficientes de potência  $\alpha_m$  depende somente da potência alocada para o usuário com melhores condições de canal ( $m+1, \dots, M$ ). Dessa forma, demonstrose que a solução ótima para o problema (11) pode ser obtida por (12). ■

Através do método da bisseção e usando a expressão fechada (12), a solução ótima para o problema (6) no UAV pode ser formulada através do Algoritmo 1. O algoritmo é calculado com uma precisão  $\tau$  e sua complexidade é linear ao número de usuários. Dessa forma, os coeficientes de potência capazes de maximizar a mínima taxa e garantir equidade de taxa entre os usuários são encontrados.

### A. Probabilidade de Outage

O evento de *outage* ocorre quando a taxa fornecida para qualquer usuário não é suficiente para decodificar seu próprio fluxo de dados ou os fluxos de dados dos usuários mais fracos. Dessa forma, a probabilidade de *outage* para o  $m$ -ésimo usuário pode ser expressa como:

$$P_m^{out} = \Pr[R_m < \tilde{R}], \quad (15)$$

em que  $\tilde{R}$  é a taxa requerida. Como (15) depende da taxa alcançável de cada decodificação, a solução ótima alcançada no Algoritmo 1 impactará diretamente a probabilidade de *outage* do sistema. Entretanto, devido à natureza do problema de otimização e à existência da função de Marcum-Q, torna-se muito difícil, se não impossível, a obtenção das expressões analíticas da probabilidade de *outage* do esquema de alocação adaptativa de potência. Para fins comparativos, um método de alocação fixa será utilizado. Nesse caso, expressões em forma fechada da probabilidade de *outage* do esquema de alocação fixa serão derivadas.

### B. Análise de Outage para Alocação Fixa

Utilizando (4) e (5), e a partir de manipulações algébricas, (15) pode ser reescrita como:

$$P_m^{out} = \Pr[|h_m|^2 < \xi_m], \quad (16)$$

em que  $\xi_m = \frac{\hat{r}}{\rho(\alpha_m - \hat{r} \sum_{k=m+1}^M \alpha_k)}$ , sendo  $\hat{r} = 2^{\tilde{R}} - 1$ . Perceba que (16) é obtida sob a condição de  $\alpha_m > \hat{r} \sum_{k=m+1}^M \alpha_k$ . Com o auxílio do teorema binomial, a FDP e FDA do ganho de canal  $|h_m|^2$  do  $m$ -ésimo usuário são dadas, respectivamente, por:

$$f_{|h_m|^2}(\xi_m d_m^\psi) = \frac{M!}{(M-m)!(m-1)!} f_{|g_m|^2}(\xi_m d_m^\psi) \times \left( F_{|g_m|^2}(\xi_m d_m^\psi) \right)^{m-1} \left( 1 - F_{|g_m|^2}(\xi_m d_m^\psi) \right)^{M-m}, \quad (17)$$

e

$$F_{|h_m|^2}(\xi_m d_m^\psi) = \frac{M!}{(M-m)!(m-1)!} \sum_{k=0}^{M-m} \binom{M-m}{k} \times \frac{(-1)^k}{m+k} \left( F_{|g_m|^2}(\xi_m d_m^\psi) \right)^{m+k}. \quad (18)$$

Substituindo (3) em (18), a expressão aproximada da probabilidade de *outage* do  $m$ -ésimo usuário sobre canais com desvanecimento Rician é dada por:

$$P_m^{out} = \frac{M!}{(M-m)!(m-1)!} \sum_{k=0}^{M-m} \binom{M-m}{k} \frac{(-1)^k}{m+k} \times \left( 1 - \mathcal{Q} \left( \sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(K+1)\xi_m d_m^\psi}{\Omega_m}} \right) \right)^{m+k}. \quad (19)$$

Considera-se que o evento de *outage* do sistema ocorre sempre que qualquer usuário não consegue decodificar corretamente sua mensagem. Dessa forma, a probabilidade de *outage* comum (COP, do inglês *Common Outage Probability*) do sistema pode ser derivada, sendo expressa como:

$$P^{COP} = 1 - \prod_{m=1}^M \left( 1 - P_m^{out} \right). \quad (20)$$

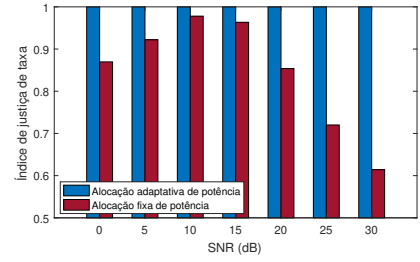


Fig. 2. Índice de justiça de taxa do sistema ( $M = 4$ ).

## IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados de simulações serão apresentados para avaliar o desempenho do esquema proposto. Foram consideradas  $2 \times 10^5$  amostras de Monte Carlo. Assume-se que  $P = 1$  W,  $P_{LoS} = 1$  W,  $K = 10$  e  $\psi = 2$ . Considera-se que a altura do UAV em relação aos usuários é de  $h = 1$  m, e que o raio do círculo onde o UAV e os usuários estão dispostos são, respectivamente,  $r_1 = 0,5$  m e  $r_2 = 1$  m. Para o algoritmo, utiliza-se uma precisão de  $\tau = 10^{-4}$ . O índice de Jain é utilizado para analisar a justiça de taxa entre os usuários, sendo descrito como  $I = [(\sum_{m=1}^M R_m)^2] / [M(\sum_{m=1}^M (R_m)^2)]$ , cujo alcance tem intervalo  $[1/2, 1]$ . Nesse intervalo, quando  $I = 1/2$ , ocorre uma alocação menos justa, enquanto  $I = 1$  corresponde à alocação mais justa, em que as taxas de dados recebidas por todos os usuários são iguais. Quando o esquema de alocação fixa for utilizado, considera-se que os coeficientes de potência para  $M = 3$  são  $\alpha_1 = 0,5$ ,  $\alpha_2 = 0,35$ ,  $\alpha_3 = 0,15$ . Para  $M = 4$  são  $\alpha_1 = 0,45$ ,  $\alpha_2 = 0,26$ ,  $\alpha_3 = 0,17$ ,  $\alpha_4 = 0,12$ .

A Figura 2 analisa o impacto do esquema de alocação adaptativa proposto em termos de justiça de taxa entre os usuários. Para a avaliação comparativa, o esquema de alocação fixa de potência é utilizado. Do ponto de vista de justiça, quando o esquema proposto é aplicado, o UAV fornece adaptativamente os fatores de potência para cada usuário. Com isso, todos os usuários alcançam igualmente uma taxa de transmissão instantânea e os seus serviços de tráfego requeridos são satisfeitos. Dessa forma, o sistema alcança um índice de justiça  $I = 1$  para todos os valores de SNR. Enquanto isso, o esquema fixo apresenta desempenho mediano, tornando-se pior para valores altos de SNR. Isso ocorre pois, o usuário forte recebe um coeficiente de potência maior que o necessário, logo os usuários mais fracos experimentam maior interferência e, conseqüentemente, alcançam taxas menores.

A Figura 3 apresenta as curvas da probabilidade de *outage* do sistema em função da SNR de transmissão. Os resultados da alocação adaptativa foram obtidos a partir do Algoritmo 1 e (15), enquanto os resultados da alocação fixa foram obtidos com (20). É importante notar que além dos benefícios de equidade de taxa, o esquema proposto alcança melhor desempenho em termos de *outage* do sistema. Na alocação fixa, quando os usuários com piores condições de canal forem decodificar suas mensagens, a parcela de sinal interferente relativa aos usuários mais fortes possui grande influência no sinal recebido. Como consequência, o evento de *outage* do sistema ocorre com maior frequência. Por exemplo, para SNR de 15 dB e  $M = 4$ , pode-se notar que o evento de *outage* ocorre com uma

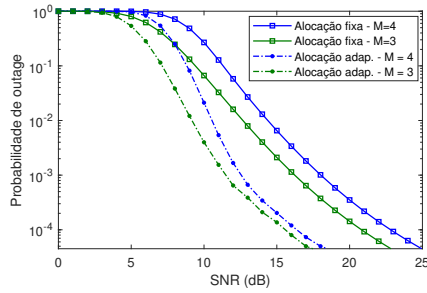


Fig. 3. Probabilidade de *outage* SNR de transmissão [ $\tilde{R} = 0,5$  BPCU (bits per channel use)].

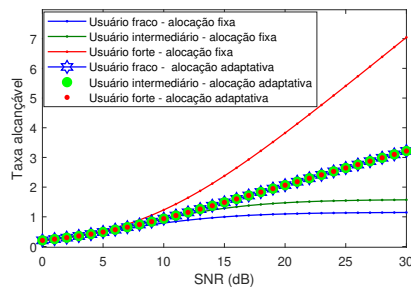


Fig. 4. Taxa alcançável versus SNR de transmissão. Comparação entre os esquemas de alocação adaptativa e alocação fixa de potência ( $M = 3$ ).

probabilidade de  $6,5 \times 10^{-3}$  para alocação fixa, enquanto que com alocação adaptativa, o evento de *outage* do sistema ocorre com uma probabilidade de  $2,1 \times 10^{-4}$ . Portanto, os ganhos de desempenho obtidos pelo sistema com alocação adaptativa são bem mais notáveis. Dessa forma, um sistema com alocação adaptativa permite conectividade com mais usuários e, com isso, satisfazer alguns dos requisitos das futuras gerações de comunicações móveis.

A Figura 4 mostra a taxa alcançável de cada usuário em função da SNR. Como pode-se verificar, o esquema de alocação fixa de potência favorece somente o usuário mais forte. Enquanto isso, o desempenho do usuário mais fraco e intermediário é prejudicado ao ponto de atingir uma taxa limite para valores altos de SNR. Entretanto, o esquema de alocação adaptativa de potência beneficia os usuários mais fracos e intermediários, garantindo alocação justa dos recursos de potência entre todos os usuários do sistema. Com isso, a estratégia proposta realiza um balanceamento entre as taxas dos usuários, melhorando significativamente o desempenho do sistema já que a potência é distribuída de acordo com a necessidade de cada usuário.

A Figura 5 apresenta as curvas da probabilidade de *outage* do sistema em função da altura  $h$  do UAV. O valor da SNR foi fixado em  $\rho = 18$  dB e o fator riciano ( $K$ ) setado em 8 e 10, que representam uma zona urbana e uma zona sub-urbana, respectivamente. Através dessa figura, é possível se obter uma ideia da robustez do esquema proposto em um cenário com UAV. Diferente do esquema de alocação fixa, o esquema de alocação adaptativa calcula os coeficientes de potência conforme a necessidade de cada usuário. Como consequência, o sistema consegue melhor adaptar-se às diferentes condições

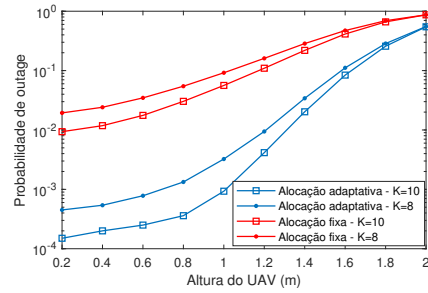


Fig. 5. Probabilidade de *outage* versus a altura do UAV ( $M = 4$  e  $\tilde{R} = 1$  BPCU).

do ambiente que os usuários estão associados.

## V. CONCLUSÕES

Neste artigo, analisou-se um sistema UAV-NOMA com múltiplos usuários. Um problema de otimização dos coeficientes de potência foi formulado e mostrou-se que o problema considerado é quase-côncavo. A expressão fechada dos coeficientes de potência foi derivada e, utilizando o método da bisseção, um algoritmo que retorna a solução ótima para a alocação de potência foi desenvolvido. Para fins comparativos, derivou-se expressões da probabilidade de *outage* do esquema de alocação fixa. Os resultados demonstraram que o esquema proposto de alocação adaptativa de potência pode fornecer melhorias notáveis de equidade de taxa e, ao mesmo tempo, melhor desempenho em termos de probabilidade de *outage*.

## REFERÊNCIAS

- [1] Y. Zeng, R. Zhang, and T. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 54, 02 2016.
- [2] S. Hayat, E. Yanmaz, and R. Muzaffar, "Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint," *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, vol. 18, pp. 1–1, 2016.
- [3] F. Qi, X. Zhu, G. Mang, M. Kadoch, and W. Li, "Uav network and iot in the sky for future smart cities," *IEEE Network*, vol. 33, pp. 96–101, 2019.
- [4] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (noma) for cellular future radio access," *IEEE 77th Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–5, 2013.
- [5] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5g networks: Research challenges and future trends," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, 2017.
- [6] Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Non-orthogonal multiple access for 5g and beyond," 2018.
- [7] P. Sharma and D. Kim, "Uav-enabled downlink wireless system with non-orthogonal multiple access," in *IEEE Globecom Workshops*, 2017.
- [8] M. Sohail, C. Y. Leow, and S. Won, "Non-orthogonal multiple access for unmanned aerial vehicle assisted communication," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 2018.
- [9] A. Han, T. Lv, and X. Zhang, "Outage performance of noma-based uav-assisted communication with imperfect sic," in *IEEE Wireless Commun. Networking Conf. (WCNC)*, 2019, pp. 1–6.
- [10] A. Nasir, T. Hoang, T. Duong, and H. V. Poor, "Uav-enabled communication using noma," *IEEE Trans. Commun.*, vol. PP, pp. 1–1, 2019.
- [11] M. F. Sohail, C. Y. Leow, and S. Won, "Energy-efficient non-orthogonal multiple access for uav communication system," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 11, pp. 10 834–10 845, 2019.
- [12] M. K. S. M. Alouini, *Digital Communication Over Fading Channel*, 3rd ed. Wiley, 2005.
- [13] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, March 2004. [Online]. Available: <http://www.amazon.com/exec/obidos/redirect?tag=citeulike-20&path=ASIN/0521833787>