

COOP: Um algoritmo de computação e Offloading para Redes Terrestres Assistidas por VANT

Carlos Rocha¹, Lucas Pacheco¹, Lucas Bastos¹, Denis Rosário¹ e Eduardo Cerqueira¹

¹Universidade Federal do Pará (UFPA) – Belém – Pará – Brazil

{carlos.almeida.rocha, lucas.pacheco, lucas.basto}@itec.ufpa.br,
{denis, cerqueira}@ufpa.br

Abstract. *Current wireless systems, such as 5G networks, have integrated Mobile Edge Computing (MEC) capabilities. Yet, they still face challenges in efficiently delivering such services to mobile users in dense and dynamic scenarios. This paper introduces COOP, an algorithm for optimizing Unmanned Aerial Vehicle (VANT)-assisted ground networks and providing connectivity and MEC services for mobile users. COOP employs a Genetic Algorithm (AG) to optimize VANT placement and service allocation for mobile users on the ground space. Results demonstrate that COOP outperforms existing approaches, showing reductions up to 33.3% and 41.3% in end-to-end delay compared to baseline algorithms in scenarios with 30, 50, and 100 mobile users.*

Resumo. *Os sistemas sem fio atuais, como as redes 5G, tem integrado recursos de Mobile Edge Computing (MEC). No entanto, ainda enfrentam desafios na entrega eficiente desses serviços a utilizadores móveis em cenários densos e dinâmicos. Este artigo apresenta o COOP, um algoritmo para otimizar redes terrestres assistidas por veículos aéreos não tripulados (VANT) e fornecer conectividade e serviços MEC para usuários móveis. O COOP emprega um Algoritmo Genético (AG) para otimizar o posicionamento de VANT e a alocação de serviços para usuários móveis no espaço terrestre. Os resultados demonstram que o COOP supera as abordagens existentes, mostrando reduções de até 33.3% e 41.3% no atraso fim-a-fim em comparação com algoritmos de linha de base em cenários com 30, 50 e 100 usuários móveis.*

1. Introdução

Com a evolução das redes 5G e 6G, surgiu a necessidade de aplicações com alto rendimento, baixa latência e grande demanda computacional serem hospedadas mais próximas dos usuários finais. Nesse contexto, a Computação de Borda Móvel (MEC) se destacou como uma tecnologia essencial, permitindo a implantação de servidores em estações base e pontos de acesso para reduzir atrasos e o consumo de energia. Isso é particularmente crucial para aplicações sensíveis como realidade virtual/aumentada (VR/AR), veículos autônomos e diversas implementações de IoT [Agarwal et al. 2022]. Entretanto, os servidores MEC estáticos enfrentam desafios para se adaptar a flutuações na demanda ou gerenciar falhas e sobrecargas efetivamente [Guo et al. 2024].

Para enfrentar esses desafios, Unmanned Aerial Vehicle (VANT), comumente conhecidos como drones, surgem como uma solução promissora para fornecer conectividade sem fio, offloading de computação e recursos de cache de uma maneira altamente flexível. Os VANTs que servem como estações base móveis podem atender com eficiência regiões com cobertura inadequada ou densas populações de usuários [Pacheco et al. 2021]. Os VANTs também podem fornecer suporte computacional para usuários móveis no solo, incluindo cache de vídeo, transcodificação e serviços de renderização [Agarwal et al. 2022].

Sua mobilidade inerente permite que eles se ajustem dinamicamente às mudanças nos padrões do usuário, garantindo que a comunicação em linha de visão (LoS) seja mantida e alcance usuários em áreas afetadas por sinal fraco.

Embora os VANT apresentem uma solução promissora para melhorar a prestação de serviços dinâmicos com MEC, eles apresentam restrições operacionais e de serviço, incluindo vida útil limitada da bateria. Os esforços de pesquisa baseados em Aprendizado de máquina (ML) ou Algoritmo Genético (AG) visaram melhorar o processo de tomada de decisão para otimização de recursos e/ou trajetórias de VANT [Rahman et al. 2023]. Os modelos de ML requerem tempo para aprender e fazer previsões, onde eles podem encontrar limitações quando confrontados com dinâmicas de rede em rápida mudança, conforme destacado em [Zhao et al. 2021]. Por outro lado, os AGs ganharam atenção em tarefas de otimização de VANT. Devido à natureza dinâmica e móvel do VANT, é necessário um algoritmo de otimização computacional e de redes ciente de energia multiobjetivo para auxiliar usuários e aplicações móveis quando seus serviços têm Qualidade de Serviço (QoS) deficiente.

Este artigo apresenta a proposta do Processo Cooperativo de Otimização e Offloading (COOP), o qual tem objetivo de aprimorar a computação e a transferência de dados em redes assistidas por VANT, otimizando implantações de MEC. O COOP considera uma abordagem de otimização multiobjetivo AG para reforçar a QoS ao mesmo tempo que minimiza o consumo de energia do VANT. Em sua essência, o COOP desenvolve uma função objetiva especializada que toma decisões com base nos recursos do MEC, posições de VANT, mobilidade do usuário, necessidades de aplicação e limites de energia de VANT, empregando AG para encontrar e aplicar as melhores soluções. Simulações mostram que o COOP supera significativamente os algoritmos padrão, mostrando melhorias nas taxas de serviço em até 48,9% e 61,5% em cenários com números variados de usuários, comprovando assim sua eficácia no refinamento das operações de rede de VANT.

O resto do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os principais trabalhos relacionados. A Seção 3 descreve o modelo do sistema, enquanto a Seção 4 apresenta o algoritmo COOP. Os detalhes do desenho do cenário e do ambiente de simulação são descritos na Seção 5, juntamente com as principais conclusões. Finalmente, a Seção 6 conclui as principais ideias discutidas neste artigo.

2. Trabalhos relacionados

Fan *et al.* [Fan et al. 2024] introduziu um modelo de comunicação ar-solo que integra estações base aéreas operadas por VANTs com equipamentos de usuário baseados em terra. Este modelo combinou a técnica de transmissão multiponto coordenada (CoMP) com a teoria da geometria estocástica, considerando múltiplos VANTs estruturados de acordo com os princípios do cátion tetraédrico de Poisson-Delaunay. O modelo incorporou controle avançado de formação de VANT e estratégias de rastreamento de enxame baseadas na teoria de sistemas multiagentes. Estas estratégias são adaptadas para dois cenários críticos: um envolvendo utilizadores fixos e outro envolvendo utilizadores móveis. A abordagem garantiu que os VANTs colaborativos pudessem efetivamente navegar e manter suas posições espaciais alvo, otimizando assim a execução da missão.

Zhang *et al.* [Zhang et al. 2024] desenvolveu uma metodologia para melhorar a eficiência de redes assistidas por VANT. Esta abordagem começa derivando um limite inferior para o ganho do canal composto, fornecendo um conjunto de restrições mais rigoroso. Este trabalho empregou técnicas de Aproximação Convexa Sucessiva (SCA) para otimizar o posicionamento horizontal do VANT. Além disso, a pesquisa obteve com

sucesso soluções ótimas de formato fechado para energia de transmissão, aumentando a eficiência operacional da rede. Este trabalho também abordou o desafio da alocação de tempo, reformulando-o como um problema de programação linear, permitindo uma gestão precisa e eficaz dos recursos da rede.

Pandey *et al.* [Pandey et al. 2021] estudou a dinâmica de definição de preços e alocação de recursos em uma rede assistida por VANT, empregando um jogo Stackelberg de dois estágios para modelar a interação dos participantes. O foco está na determinação do preço ideal para a disponibilidade dos participantes e os recursos computacionais necessários para a execução da tarefa. Com base nesta base teórica, este trabalho introduziu uma estrutura de execução de tarefas flexível e habilitada para multidões, utilizando vários VANTs em uma rede sem fio de banda larga. Este sistema aproveita as vantagens da mobilidade, atinge alto rendimento e garante baixa latência.

Apesar do progresso notável nas redes terrestres assistidas por VANT, permanecem desafios e restrições específicas que requerem atenção. Por exemplo, a topologia de rede dinâmica e a mobilidade dos VANTs podem resultar em transferências e interferências frequentes, impactando a QoS [Cumino et al. 2023]. Além disso, a capacidade limitada da bateria e os recursos de computação dos VANTs exigem o desenvolvimento de redes com eficiência energética e algoritmos de orquestração de computação.

3. Rede Assistida por VANT e Modelo de Sistema

Foi considerado uma rede terrestre assistida por VANT dentro de uma área geográfica de A , compreendendo N_U usuários móveis, N_B estações base terrestres e N_{VANT} VANTs. Este conjunto de elementos é representado como $\mathcal{U} = \{U_1, U_2, \dots, U_{N_U}\}$, $\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_{N_B}\}$ e $\mathcal{V} = \{V_1, V_2, \dots, V_{N_{VANT}}\}$, respectivamente. Cada estação base B_i é equipada com um servidor Mobile Edge Computing (MEC), denotado por M_{B_i} , e cada VANT V_j é integrado com um servidor MEC, denotado por M_{V_j} , além de funcionar também como estação base no ar.

Cada usuário U_i inicia solicitações de serviço especificando suas necessidades em termos de recursos computacionais C_{req} , latência máxima L_{req} e taxa de transferência média da rede T_{req} . Neste contexto, a satisfação do usuário é determinada com base no cumprimento dos requisitos de aplicação solicitados, categorizando os usuários como “satisfeitos” se suas necessidades forem atendidas e “insatisfeitos” caso contrário. Cada solicitação de serviço do usuário U_i é denotada como $SR_{U_i} = (C_{req}, L_{req}, T_{req})$.

Cada servidor MEC associado a uma estação base terrestre, denotada como M_{B_i} , é caracterizado por suas capacidades computacionais e de armazenamento. A capacidade computacional, representada por C_{B_i} , mede a capacidade de processamento do servidor em operações computacionais por segundo (COPS). Além disso, a capacidade de armazenamento de cada servidor, S_{B_i} , é quantificada em terabytes (TB). Portanto, a especificação de um servidor MEC em uma estação base B_i é representada concisamente por $M_{B_i} = (C_{B_i}, S_{B_i})$.

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) habilitados para Computação de Borda Móvel (MEC) possuem capacidades específicas de computação e armazenamento, representadas por $M_{V_j} = (C_{V_j}, S_{V_j})$. No entanto, essas capacidades são restritas pela energia disponível de cada VANT, medida em quilowatts-hora (kWh), que define seus limites operacionais. As capacidades dos servidores MEC tanto terrestres quanto dos VANTs são formalizadas nas equações:

$$M_{B_i} = (C_{B_i}, S_{B_i}), \quad \forall B_i \in \mathcal{B} \quad (1)$$

$$M_{V_j} = (C_{V_j}, S_{V_j}), \quad \forall V_j \in \mathcal{V}, \text{ sujeita a } E_{V_j} \quad (2)$$

Usuários conectam-se ao servidor MEC mais próximo, seja através de uma estação base ou diretamente de um VANT específico, acessando serviços computacionais diretamente. Além disso, o consumo de energia de cada VANT é modelado considerando atividades de comunicação, voo e processamento de tarefas, com a equação do consumo energético representada como:

$$\Delta E_{V_i}(t) = E_{comm,V_i}(t) + E_{fly,V_i}(t) + E_{comp,V_i}(t) \quad (3)$$

Este modelo ajuda a prever a redução na bateria ao longo do tempo para cada VANT, crucial para o planejamento operacional e a manutenção da eficiência energética.

4. Um algoritmo de Computação e Offloading para Redes Terrestres Assistidas por VANT

Esta seção apresenta o algoritmo de computação e offloading COOP, que se baseia em uma abordagem de otimização pautada em AG para melhorar QoS em cenários de rede assistidos por VANT.

4.1. Função de Otimização

A função de otimização desempenha um papel essencial no Algoritmo Genético (AG), avaliando continuamente as soluções geradas com o objetivo primordial de maximizar a Qualidade de Serviço (QoS) e minimizar tanto o movimento quanto o consumo de energia dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Attingir esses objetivos é crucial para manter uma rede ativa eficiente e sustentável. A função objetivo, que é o coração da otimização, é expressa na seguinte equação:

$$\text{Maximize } F = QoS_{\text{total}} - \lambda_1 \cdot M_{\text{total}} - \lambda_2 \cdot E_{\text{total}} \text{ sujeita a } C1, C2, C3, C4, C5 \quad (4)$$

onde QoS_{total} representa a soma do QoS de todos os usuários, M_{total} indica o movimento total dos VANTs, e E_{total} é o consumo total de energia desses veículos. Os coeficientes λ_1 e λ_2 são fatores de ponderação que equilibram a importância do movimento e do consumo de energia em relação à QoS.

As restrições que moldam a função objetivo incluem: $C1$, a capacidade computacional total dos VANTs e das estações base, que deve atender ou superar as demandas computacionais de todos os usuários; $C2$, o total da capacidade de armazenamento disponível deve ser maior ou igual ao requerido pelos usuários; $C3$, a energia total disponível nos VANTs, que deve exceder a necessidade de operações de voo e tarefas de comunicação; $C4$, a latência cumulativa, que deve permanecer dentro de limites aceitáveis; e $C5$, a distância total percorrida pelos VANTs, que não deve ultrapassar um limite predefinido para otimizar a eficiência energética.

4.2. Algoritmo Genético para otimização de Rede

O Algoritmo Genético (AG) desempenha um papel fundamental na otimização de redes terrestres assistidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), sendo a eficiência do processo altamente dependente do design dos cromossomos. Um cromossomo, neste cenário, é uma solução potencial proposta pelo algoritmo e é composto por três componentes principais: R , P , e E . O componente R representa a matriz de alocação de serviços e recursos de rede para VANTs e para servidores de Computação de Borda Móvel (MEC), detalhada na equação de referência. P indica a matriz de posições dos VANTs no

espaço, mostrando suas novas localizações após o processo de otimização. Por fim, \mathbf{E} é o vetor que quantifica o consumo de energia de cada VANT, considerando a realocação para novas coordenadas e o processamento necessário para os serviços alocados, conforme a equação específica de consumo de energia de VANT. As dimensões de \mathbf{R} , $m \times n$, correspondem ao número total de VANTs e servidores MEC, incluindo aqueles em estações base fixas, e ao total de serviços a serem alocados.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdots & R_{1,n} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \cdots & R_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m,1} & R_{m,2} & \cdots & R_{m,n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A matriz que apresenta as posições dos VANTs, denotada como \mathbf{P} , é representada na Eq. 6. Corresponde às coordenadas de cada VANT $\{V_j \mid V_j \in \mathcal{V}\}$, refletindo sua configuração espacial, que influencia diretamente a cobertura e eficiência da rede. O consumo de energia esperado para a configuração da rede descrita nos cromossomos é representado por \mathbf{E} na Eq. 7.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_m & y_m \end{bmatrix} \quad (6) \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

4.3. Avaliação de Aptidão Usando a Função Objetivo

No processo de avaliação de aptidão, cada cromossomo, que representa uma solução potencial, é avaliado com base na função objetivo. A métrica de aptidão leva em conta não apenas as condições estáticas da rede, como a localização das estações base, mas também as posições dinâmicas dos usuários. Os valores de \mathbf{R} , \mathbf{P} , e \mathbf{E} são utilizados para configurar a rede atualmente em uso, permitindo que a aptidão de um cromossomo x seja calculada como: $\text{Fitness}(x) = \text{ObjectiveFunction}(x)$

O cruzamento e a mutação são empregados para introduzir diversidade na população de cromossomos e evitar ótimos locais, respectivamente. O AG conclui cada iteração classificando os indivíduos por suas pontuações de aptidão e removendo os de menor desempenho. Após a conclusão do processo, os resultados são usados para reconfigurar ativamente a rede de VANTs, incluindo a realocação de VANTs, ajuste de áreas de serviço e realocação de recursos de rede, buscando alcançar o desempenho e a eficiência energética ideais.

5. Avaliação

Esta seção apresenta o comportamento e o impacto do COOP na melhoria da QoS em uma rede terrestre assistida por VANT. O COOP é comparado com abordagens de última geração e os resultados da simulação são discutidos posteriormente.

5.1. Metodologia

O cenário de simulação no NS-3.37 abrangeu uma densa área urbana de 2 quilômetros quadrados, incluindo VANTs, estações base e usuários móveis. Foi considerado o conjunto de dados de mobilidade de Koln [kol] para modelar padrões de mobilidade do

usuário e representa vários padrões de mobilidade, incluindo movimentos de pedestres. Neste ambiente, foi implantado uma rede composta por 8 VANTs, em conjunto com uma combinação de 4 estações base de macrocélulas e 8 estações base de pequenas células. Esta configuração permitiu avaliar a influência de vários tipos de células dentro de uma rede urbana mista e obter o entendimento sobre como os VANTs podem melhorar as infraestruturas de rede tradicionais baseadas em terra. A simulação durou ativamente 300 segundos e variamos o número de usuários nos cenários de simulação, incluindo 30, 50 e 100 usuários móveis. Cada cenário de simulação foi executado 33 vezes com diferentes sementes aleatórias para significância estatística.

Cada nó VANT compreende uma unidade de processamento NVidia Jetson AGX Orin de 60W com 64GB de RAM e 275 TOPS, e uma bateria de 350 kJ. Todos os MEC e VANT suportam os mesmos serviços de borda, incluindo serviços baseados em multimídia. Nas simulações foram considerados três tipos de serviços distintos, *i.e.*, AR, VR e Vídeo sob Demanda (VoD) [Akhtar et al. 2021]. Especificamente, AR exige maior taxa de transferência e menor atraso, enquanto VoD é o oposto.

Foi comparado o desempenho do algoritmo de orquestração COOP com as abordagens existentes como segue. Especificamente, o método Tang *et al.* [?] otimiza a colocação de VANT para a Internet das Coisas usando Particle Swarm Optimization, com foco na redução da implantação de VANT e ao mesmo tempo garantindo cobertura de comunicação e eficiência energética. O método Random utiliza random walk para maximizar a cobertura dos VANTs e é considerado como linha de base para os demais métodos. Finalmente, o COOP emprega um AG para otimizar a colocação de VANT e a alocação de serviços para usuários móveis no espaço terrestre, conforme descrito na Seção 3.

As seguintes métricas foram coletadas nos experimentos: Taxa de Provisionamento de Serviços (SPR), atraso e consumo de energia para cada serviço. Especificamente, o SPR mede a percentagem de utilizadores que satisfazem perfeitamente os seus requisitos de serviço. O atraso mede o tempo médio de serviço em três fases: upload do usuário para o nó do VANT, processamento no nó do VANT e download para o usuário. O consumo de energia $\in [0\%, 100\%]$ refere-se à energia total consumida em média durante a missão calculada com base na Equação 6.

5.2. Resultados

A Figura 1 mostra os resultados do nível de serviço ao longo do tempo de três algoritmos de computação e offloading em um cenário com diferentes números de usuários. A área verde mostra o percentual de usuários bem atendidos pelo MEC, enquanto o espaço em branco para chegar a 100% denota os mal atendidos. As demais cores mostram a eficácia de cada um dos trabalhos comparados. Ao analisar os resultados, concluímos que a abordagem do MEC necessita rapidamente da assistência dos VANT. Ao mesmo tempo, a rede assistida por VANT leva alguns segundos para permitir que os VANT selecionados cheguem ao local efetivo de assistência. Por exemplo, o COOP atinge o maior SPR comparado aos trabalhos analisados em um cenário de rede assistida por VANT, independentemente do número de usuários. Especificamente, o COOP demonstra 64,1% e 50,25% de melhoria no SPR em relação aos algoritmos Random e Tang, respectivamente, ressaltando sua eficácia no aprimoramento das operações de rede.

A Figura 2 mostra os resultados de atraso de três algoritmos de computação e offloading em um cenário de rede assistida por VANT com números variados de usuários, permitindo a análise da correlação entre o atraso (medido em milissegundos) e o tipo de serviço em três diferentes números de usuários. Os resultados da Figura 2 categorizam os serviços em três tipos, nomeadamente AR, VR e VoD. Ao analisar os resultados da Figura

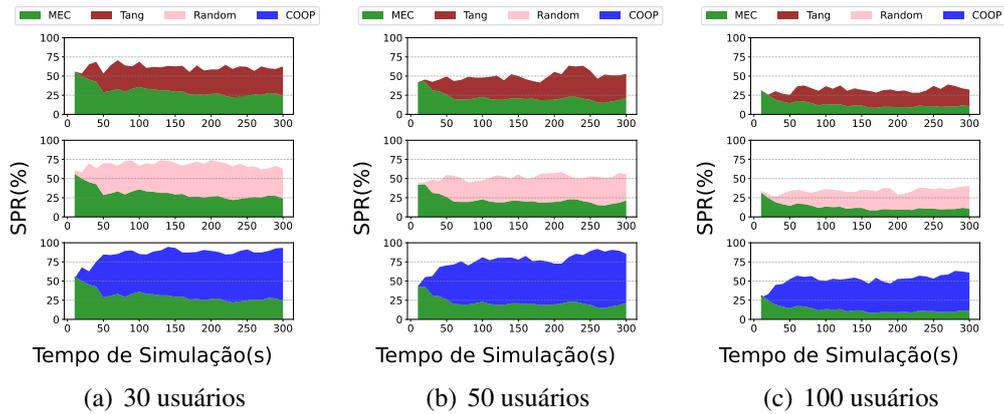


Figura 1. SPR para diferentes números de usuários

2, podemos concluir que o COOP apresenta um atraso menor na entrega dos serviços do que outros algoritmos.

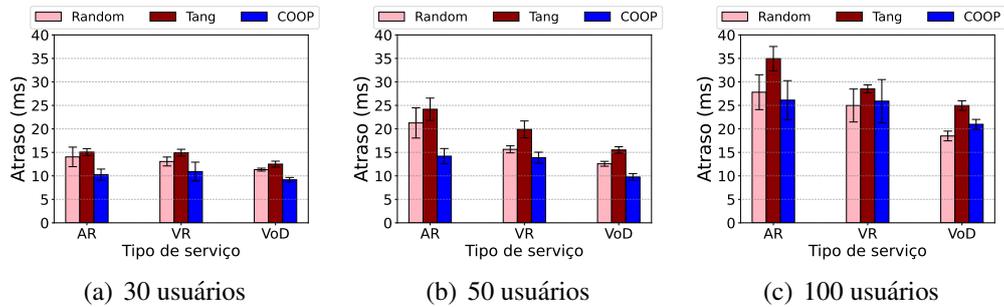


Figura 2. Atraso para diferentes números de usuários

A Figura 3 mostra os resultados do consumo de energia dos três algoritmos de computação e offloading em um cenário com diferentes números de usuários. Ao analisar os resultados da Figura 3, podemos concluir que o COOP apresenta resultados de menor consumo de energia comparado a outros algoritmos independente do número de usuários. O consumo de energia dos VANTs, utilizando o algoritmo COOP, aumenta em até 4,4% e 7,4%, comparando o cenário com 30 usuários para 50 e 100 usuários móveis, respectivamente. Além disso, a COOP reduziu o consumo de energia em até 21,9% em comparação com obras relacionadas nas mesmas condições. Isso ocorre porque o COOP maximiza a QoS e minimiza o movimento do VANT, ao mesmo tempo que reduz o consumo de energia do VANT.

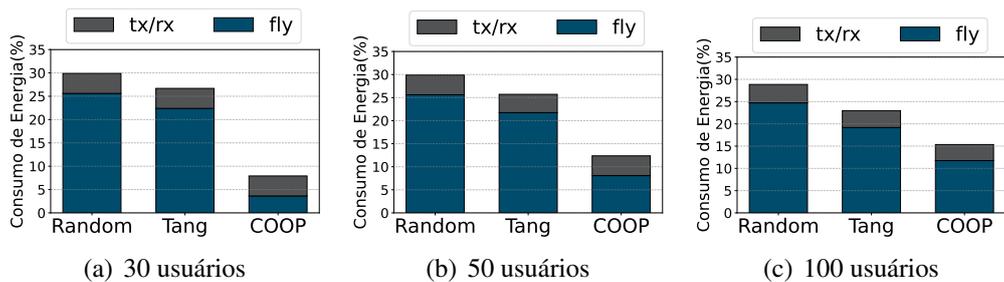


Figura 3. Consumo de energia para diferentes números de usuários

6. Conclusão e trabalhos futuros

Este artigo introduziu o algoritmo de computação e offloading COOP, que visa aprimorar as redes sem fio assistidas por VANT em resposta às crescentes demandas de aplicativos 5G e 6G e usuários móveis. COOP usa um AG para otimizar o posicionamento e a rede de VANT para alocação de serviços de computação. Os resultados indicam melhorias significativas de desempenho, com o COOP alcançando taxas de serviço até 30,7% e 30% maiores do que os métodos tradicionais em cenários com 30 e 50 usuários, respectivamente, enquanto gerencia o gasto de energia dos VANTs.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pelo CNPq para o projeto intitulado “INCT Redes de Comunicação e Internet das Coisas Inteligentes (ICoNIoT)”, e também pelo projeto intitulado “Computação de Borda em um Mundo de IoT Inteligente com Suporte a Latência Ultra Baixa (EdgeIo2T)”. Além disso, este estudo foi financiado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) para o processo 2023/00673-7

Referências

- Vehicular mobility trace of the city of cologne, germany [online]. <http://kolntrace.project.citi-lab.fr/>. Accessed: 2024-01-26.
- Agarwal, B., Togou, M. A., Ruffini, M., and Muntean, G.-M. (2022). Qoe-driven optimization in 5g o-ran-enabled hetnets for enhanced video service quality. *IEEE Communications Magazine*, 61(1):56–62.
- Akhtar et al. (2021). Managing chains of application functions over multi-technology edge networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*.
- Cumino, P., Luís, M., Rosário, D., Cerqueira, E., and Sargento, S. (2023). On the usefulness of flying base stations in 5g and beyond scenarios. *Wireless Networks*, pages 1–17.
- Fan, X., Wu, P., and Xia, M. (2024). Air-to-ground communications beyond 5g: Uav swarm formation control and tracking. *IEEE Trans. on Wireless Communications*.
- Guo, H., Wang, Y., Liu, J., and Liu, C. (2024). Multi-uav cooperative task offloading and resource allocation in 5g advanced and beyond. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 23(1):347–359.
- Pacheco, L., Oliveira, H., Rosário, D., Zhao, Z., Cerqueira, E., Braun, T., and Mendes, P. (2021). Towards the future of edge computing in the sky: Outlook and future directions. In *proceedings of the 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pages 220–227. IEEE.
- Pandey, S. R., Kim, K., Alsenwi, M., Tun, Y. K., and Hong, C. S. (2021). A crowd-enabled task execution approach in uav networks towards fog computing. In *proceedings of the IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp)*, pages 246–251. IEEE.
- Rahman, M. H., Al-Naeem, M., Banerjee, A., and Sufian, A. (2023). Eeto-ga: Energy efficient trajectory optimization of uav-iot collaborative system using genetic algorithm. *Applied Sciences*, 13(4):2535.
- Zhang, J., Tang, J., Feng, W., Zhang, X. Y., So, D. K. C., Wong, K.-K., and Chambers, J. (2024). Throughput maximization for ris-assisted uav-enabled wpcn. *IEEE Access*.
- Zhao, Y., Zhang, W., Zhou, L., and Cao, W. (2021). A survey on caching in mobile edge computing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021:1–21.