



# Otimização da trajetória com adaptação à autonomia de Drones como gateway de comunicação para dispositivos IoT

Lucas Soares Rodrigues<sup>1</sup>, Ciro José Almeida Macedo<sup>12</sup>, Vinicius da Cunha Martins Borges<sup>1</sup>, Leizer de Lima Pinto<sup>1</sup>, Kleber Vieira Cardoso<sup>1</sup>, Antonio Carlos de Oliveira Júnior<sup>13</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Informática (INF), Universidade Federal de Goiás (UFG)

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)

<sup>3</sup>Fraunhofer Portugal AICOS, Porto – Portugal

**Resumo**—Este trabalho propõe um modelo de otimização de trajetória de voo para drones que servem como gateway de comunicação ou mula de dados para dispositivos IoT (*Internet of Things*) distribuídos em um Campus Inteligente. Os resultados apresentados consideram um drone com autonomia energética (bateria) limitada, apresentando como consequências a redução do tempo de voo e a quantidade de dispositivos cobertos em determinados cenários. O artigo propõe duas abordagens que asseguram o atendimento do máximo de dispositivos possíveis, considerando a autonomia dos drones: a primeira utilizando a Programação Linear, e a segunda através de um algoritmo de otimização da colônia de formigas.

**Palavras-chave**—VANTs, IoT, Planejamento de Voo, Otimização de Trajetória

Trajectory optimization by autonomy adaptation of Drones as communication gateway for IoT devices

**Abstract**—This work presents a flight path optimization model for drones that serve as a communication gateway or a data mule for IoT (*Internet of Things*) devices distributed on an Intelligent Campus. The results presented here consider a drone with limited energy autonomy (battery life), which causes the reduction of flight time and the number of covered devices in certain scenarios. This article proposes two approaches that ensure serving the maximum number of possible devices, considering the drones autonomy: the first using the Linear Programming, and the second through the Ant Colony Optimization Algorithm.

**Index Terms**—UAVs, IoT, Flight planning, Trajectory Optimization

## I. INTRODUÇÃO

A importância de IoT (*Internet of Things*), também chamada de Internet das Coisas, é praticamente inquestionável, em partes devido à enorme quantidade de aplicações disponíveis e em desenvolvimento. Devido à implantação e do uso de grandes números de dispositivos de IoT já ser uma realidade, o tema ainda é considerado

extremamente importante tanto para a indústria quanto para a academia [1].

Pode-se citar como exemplo o fato de que o governo federal do Brasil reconheceu a importância do tema através da iniciativa nomeada como Plano Nacional de Internet das Coisas [2]. Dentre as aplicações para IoT, aparecem como destaques os ambientes inteligentes, e.g., Cidades e Campus Inteligentes [3].

O campus pode ser visto como uma versão reduzida da cidade, colocando sua menor extensão como facilitadora de uma gestão mais simples, acelerando a implantação e os testes de solução devido a possibilidade de acesso a toda sua infraestrutura física. Além disso, esta possibilidade de modelagem e testes mais rápidos faz com que o campus possa ser considerado um laboratório adequado para testar soluções para ambientes inteligentes baseadas em IoT.

Inúmeros trabalhos aliando ambientes inteligentes e IoT vêm sendo desenvolvidos, com a autonomia energética se apresentando como um dos principais desafios encontrados acerca dos dispositivos. Por causa de sua baixa autonomia, estes possuem pouca mobilidade de conexão, demonstrando uma limitação quanto à transmissão de longo alcance [4]. Os VANTs (Veículos Aéreos Não-Tripulados), também chamados *Drones*, podem ser empregados para prover maior mobilidade à uma infraestrutura IoT, pois conseguem se deslocar a uma posição com maior proximidade aos dispositivos IoT, mitigando as deficiências que estes possuem em relação ao seu alcance de transmissão.

Os VANTs podem ser usados como *relays* sem fio para o aperfeiçoamento da conectividade e a cobertura de dispositivos sem fio terrestres [4]. Comparados com estações base terrestres, a vantagem do uso de estações base utilizando VANTs é a sua habilidade em prover a comunicação *on-the-fly*, ou seja, no decorrer do voo esta comunicação se torna imediata aos dispositivos sobrevoados. Além disso, a maior altitude dos VANTs faz com que eles estabeleçam um link de comunicação LoS (*line-of-sight*), mitigando bloqueios e sombreamentos.

Os VANTs são previstos como importantes componentes

de um avançado ecossistema ciber-físico da Internet das Coisas [5], devido ao fato que estes possuem características únicas como [6]:

- Facilidade de implantação em diferentes localizações, fazendo com que seu uso seja dinâmico, adaptando às necessidades sazonais e de localidade
- Capacidade de medir qualquer coisa em qualquer lugar, já que há uma enorme abrangência de sensores possíveis de serem acoplados e assim utilizados para capturar dados
- Capacidade de entrega de carregamentos flexíveis, usada com inúmeros propósitos como militar, salvamento e entrega de produtos.
- Reprogramáveis em missão, ou seja no decorrer de um voo prédefinido, é possível alterar o percurso estabelecido pelo plano de voo.

Portanto, um VANT promove uma conectividade *up-link* para dispositivos IoT fixos numa localização em um campus inteligente, sendo empregado como um gateway de comunicação que se associa com tais dispositivos durante um voo programável e autônomo. Para a realização deste, o estabelecimento das comunicações é avaliado através de vários critérios e restrições, como a autonomia energética (capacidade de bateria) dos VANTs e a trajetória ótima a ser percorrida para obter a melhor performance possível, considerando todos os seus recursos.

Um Campus Inteligente pode possuir um parque de dispositivos IoT implantados com a função de coletar os mais variados tipos de dados possíveis relativos ao seu funcionamento. Considerando um campus universitário, por exemplo, pode-se implantar dispositivos IoT para auxiliar a coleta de lixo, verificar vagas de estacionamento disponíveis no campus e o funcionamento de recursos do campus, como ar

condicionado em salas de aula, dentre outros. Um exemplo do cenário de uso de VANTs como mula de dados é demonstrado na Figura 1. Como pode-se ver, existe um caminho traçado pelos dispositivos, mas a trajetória não foi necessariamente a mais eficiente dentro das possibilidades disponíveis.

Como base nestes conceitos, este trabalho visa avaliar um importante atributo quanto ao papel realizado por VANTs: a trajetória. O caminho percorrido pelos *drones*, que executam essa função de gateway ou mula de dados é algo muito importante de ser avaliado, pois está relacionado diretamente com a autonomia e o gasto energético do *drone* durante o desempenho deste papel. Ao visualizar-se um conjunto de dispositivos IoT espalhados por uma determinada área geográfica, sabe-se que em muitos casos não é possível servir todos os dispositivos devido a uma limitada carga de bateria encontrada em tais dispositivos.

Para além da versão preliminar deste trabalho [7], neste artigo propõe avanço quanto ao cálculo do gasto energético do VANT, passando a ser formulado com base nas características de aerodinâmica dos VANTs, agregando um maior realismo na relação dos movimentos executados durante os vãos e o gasto da energia equivalente. O modelo passa a apresentar a localização dos sensores em

três dimensões, possibilitando determinar o consumo de energia exato do dispositivo, seja durante o deslocamento horizontal ou vertical. Portanto, elabora-se uma proposta que permita exprimir de forma mais concreta a gama de possibilidades de uso da autonomia presente no momento antecedente ao voo.

Pode-se estabelecer, também, avanços a respeito da avaliação e seu resultado, distribuindo os sensores por uma área de 1 km. Esta abrangência de espaço passa a retratar mais fidedignamente as áreas encontradas nos campus universitários, assim como o campus da Universidade Federal de Goiás (UFG) em que foi implantando o projeto de P&D *SOFTWAY4IoT (SOFTware-defined gateWAY and fog computing for IoT (Internet of Things))* [8] financiado pela RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa) e que dá origem às especificações deste trabalho. Uma vez que os cálculos de gasto energético do drone foram aprimorados, passando a ser calculada a energia gasta em cada trecho do trajeto, é possível identificar nos gráficos apresentados quais movimentos têm um custo energético maior para o VANT.

Neste artigo o problema passa a ser abordado não somente por PLIM, mas também passa a ser aplicado um algoritmo baseado em heurística, especificamente o Sistema de Colônia de Formigas. Essa técnica tem ganhos em relação ao PLIM, pois permite expandir a rede de nós de sensores, sem que o processamento da otimização se torne computacionalmente inviável. Através dessa abordagem, ampliam-se os limites do uso do modelo para que este possa ser aplicado em diferentes cenários onde existam um maior volume de dispositivos.

Este cenário é delineado para referenciar o Campus Samambaia da UFG. Portanto, os requisitos são estabelecidos com o objetivo de atender as necessidades e especificidades deste campus, inicialmente. As especificações técnicas e a forma de aplicação do VANT advêm do projeto *SOFTWAY4IoT* que possui um piloto de IoT em operação no campus, o que permitiu a integração de sensores espalhados pelo campus com aplicações que utilizam os dados colhidos pelos sensores. O *SOFTWAY4IoT* oferece uma plataforma Web de orquestração, gerenciamento e configuração dos múltiplos gateways e dispositivos IoT, totalmente centralizada e virtualizada. Esta também gerencia o gateway que está presente no drone, bem como os sensores que dependem da conectividade oferecida por este veículo. Um módulo é executado em cada gateway composto de drivers IoT, componentes responsáveis por habilitar os gateways a se comunicarem com as interfaces sem fio instaladas nele, como, Zigbee, LoRa, Wi-Fi ou NRF24.

Para a aplicação no cenário indicado, o drone é utilizado como mula de dados, realizando um voo que percorra os pontos de localização dos sensores de um conjunto pré-estabelecido. Este voo é executado com objetivo de sincronizar com o drone os dados coletados pelos sensores, que permanecem sempre ativos. O conjunto de sensores somente mudará na realização de um novo voo. Os requisitos para a modelagem da otimização, realizada neste

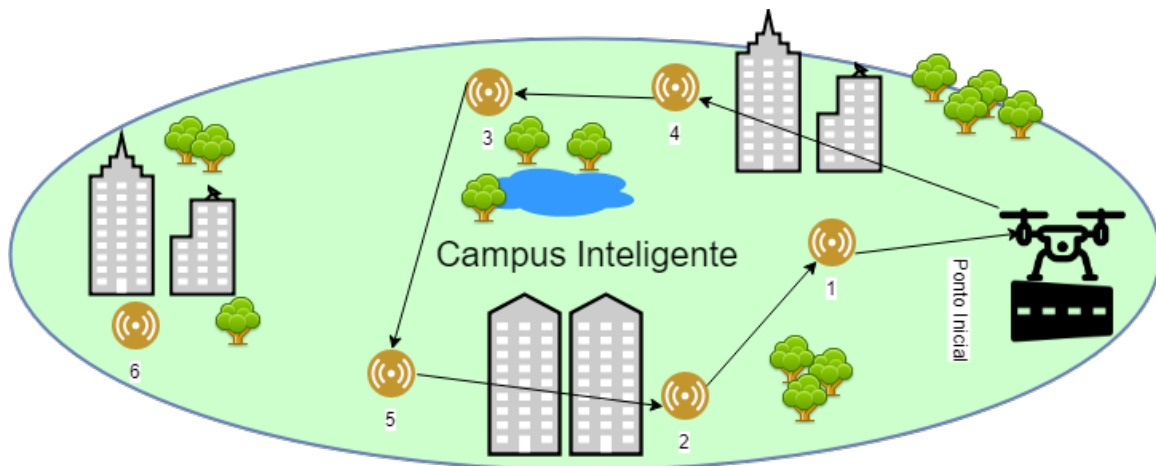


Fig. 1: Exemplo de Campus Inteligente com dispositivos IoT alocados.

trabalho, definem que o modelo atenda exclusivamente a realização de um único voo. A necessidade de que os dispositivos atendidos pelo drone estejam sempre ativos tem por objetivo garantir que os dados coletados no momento do voo sejam os mais atualizados naquele momento, pretendendo não realizar outro voo logo em seguida para realizar atualização dos dados que foram coletados por último. A estratégia utilizada, visando o melhor uso da energia presente no drone, comporta também o desenvolvimento de um agendador de voos, que passa a administrar a necessidade de dados por parte das aplicações e o gasto otimizado da energia do drone, considerando o trabalho com um drone que permanece sem recarga pelo tempo que for necessário. Para situações em que se percebe que algum dos sensores não será mais utilizado por determinado período de tempo que valha a desativação, este comando será executado pelo próprio drone, atualizando assim, o conjunto de sensores que estará ativo para o próximo voo. A cada novo conjunto de dispositivos ativos um novo processamento da otimização é realizado.

Neste artigo, é abordado o planejamento de voo autônomo de VANTs considerando a trajetória ótima para que seja atendido o máximo de dispositivos IoT possíveis, dada uma limitada autonomia energética, fazendo com que ao invés de realizar uma atualização da trajetória de voo enquanto o *drone* estiver pairando no ar, esta atualização seja feita antes do início de cada voo, realizando o percurso focando apenas na sincronização dos dados com cada um dos dispositivos IoT.

Através do PLIM (Programação Linear Inteira Mista), e por último através da aplicação de heurísticas, são propostos modelos que esquematizam o objetivo a ser atingido e as restrições que devem ser consideradas para que o *drone* sirva ao máximo de dispositivos IoT possíveis dentro de um Campus Inteligente, informando quais são os nós a serem sobrevoados e visitados.

Para além dessa introdução, as demais seções deste artigo são divididas da seguinte maneira: A seção II apresenta os trabalhos relacionados, a seção III expõe a proposta de um Modelo de Otimização de Trajetória

de Vôo, seção IV descreve a avaliação do modelo de Programação Linear, a seção V apresenta a aplicação da meta-heurística sistema de colônia de formigas para resolver o problema apresentado, e a seção VI apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Para possibilitar um sistema de transportes inteligente totalmente automatizado em um contexto de Cidade Inteligente, Menouar et al. [9] usa VANTs como dispositivos IoT conectados através de DSRC (*Dedicated Short Range Communications*) aos carros, provendo uma comunicação V2V (*vehicle-to-vehicle*) e V2X (*vehicle-to-infrastructure*). Dados são capturados diretamente dos veículos e transmitidos até seu destinatário interessado na estação base via comunicação *multihop* (*relays* de rádios), em uma abordagem D2D (*device-to-device*). O trabalho conclui que a operação verdadeiramente autônoma dos VANTs é um real desafio, pois este demanda a observação de seres humanos e outros obstáculos quaisquer. Não foi incluído este aspecto pois a investigação neste caso tem foco específico no gasto energético do VANT mediante uma trajetória otimizada, assim foi admitido que o espaço de voo do VANT não possui obstáculos para fins de simulação.

Seiber et al. [10] utilizam *drones* como sensores IoT, com a finalidade de detectar áreas perigosas contaminadas com agentes químicos, sem que seja necessário o uso de homens para fazer esta detecção. A tecnologia de comunicação utilizada entre os *drones* foi o Wi-Fi, e conexão entre *drone* e a estação base foi BLE (*Bluetooth Low Energy*). As limitações encontradas nos testes realizados foram em relação ao voo programado dos *drones*, que se limitou por estabelecer um alinhamento horizontal no enxame de VANTs, o que não aconteceria numa situação real. Este trabalho difere da nossa abordagem por utilizou um enxame de VANTs ao invés de um único VANT, para realização de um voo programado. Por isso não é necessário realizar alinhamento horizontal com outro VANT, facilitando o

movimento vertical dando maior flexibilidade para a ação do *drone*.

Kirichek [11] desenvolve um modelo de entrega de dados partindo de sensores terrestres, sendo transmitidos aos *drones* até a sua chegada em um servidor na nuvem. O modelo proposto possibilita o cálculo do número de VANTs necessários para coleta e entrega dos dados, levando em consideração a intensidade e volume do tráfego na rede, o número de unidades e o raio de sua conexão. O trabalho leva em consideração múltiplos VANTs, e não abrange a questão da otimização energética do VANT, pois o intuito é investigar o volume de dados na rede aumentando a capacidade de tráfego.

Zeng, Zhang e Lim [12] maximizam a taxa de transferência de um sistema de relay baseado em VANT através da otimização da trajetória do VANT juntamente com a taxa de transmissão entre a fonte e o *relay*. Apesar de ser apresentado uma abordagem semelhante quanto a programação de um ponto inicial e final para chegada do VANT o trabalho não demonstra uma modelagem quanto aos gastos energéticos do drone em relação a sua aerodinâmica.

Para mitigar a interferência, Mozaffari et al. [13], ajustam apropriadamente a altitude dos VANTs baseando-se no *beamwidth* da antena direcional, bem como nos requisitos de cobertura. Além disso, o número mínimo de VANTs necessários para garantir a probabilidade de cobertura do alvo para uma área geográfica é determinado. Considerando que o uso do *drone* é feito para se tornar uma estação base faz sentido a aplicação de inúmeros VANTs para que a área de cobertura seja aumentada. No entanto, em casos que o VANT é usado como mula de dados, e não há disponibilidade de inúmeras unidades, vê-se que esta mesma cobertura pode ser ampliada a partir da definição de um voo programado e otimizado onde serão contemplados todos os pontos de interesse para visita do *drone*.

Mozaffari et al. [4] pretenderam encontrar uma implantação ótima para que os *drones* servissem como estação base, conseguindo estabelecer uma associação com os dispositivos ativos naquele instante. A quantidade de dispositivos ativos se altera no decorrer do tempo de acordo com que novos dispositivos são ativados e desativados, com este padrão de ativação sendo conhecido pelo servidor na nuvem.

Para fazer esta atualização da trajetória de mobilidade dos VANTs, é realizada uma parada aérea estacionária para propiciar uma pequena economia de energia antes que se continue o movimento do VANT, sem saber qual será a nova trajetória[4]. Este cenário prevê o uso de um VANT de média autonomia energética, pois considera uma manutenção do voo do *drone* por um período extenso, fazendo com que ele paire no ar durante este período com o objetivo de servir como uma estação base para os dispositivos.

A intenção do projeto não é trabalhar com a mudança da quantidades de dispositivos ativos em tempo real, como acontece na referência [4] do trabalho que foi citado.

Esse detalhe foi mencionado apenas para descrever as características daquele, reforçando sua consideração à uma autonomia extensa. Por verdade, pretende-se enfatizar a forma como a autonomia do drone foi usada no referido trabalho, e que aquele caso requer uma quantidade de energia bem maior, já que o drone é usado como estação base e fica durante um longo tempo em voo. A proposta deste artigo tem como objetivo aplicar o uso da otimização dado um conjunto de sensores previamente estabelecidos a cada voo, fazendo com que o drone não permaneça muito tempo no ar, diferentemente do trabalho [4].

Para o cenário determinado naquele, são consideradas situações com autonomia limitada a uma bateria sem recarga, porém, no caso do trabalho relatado aqui, não há mudanças em quais dispositivos estão ativos no decorrer do tempo, já que é utilizado o VANT como mula de dados, diferentemente do trabalho anterior que utilizou o *drone* como estação base.

Quando os *drones* possuem baixa autonomia restante para voo, é necessário utilizar esta para sobrevoo e coleta de dados do máximo de dispositivos IoT possíveis. Em alguns casos pode-se sobrevoar todos os dispositivos IoT existentes em um campus inteligente, caso autonomia dos *drones* for utilizada eficientemente.

### III. MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

O primeiro modelo proposto visa reduzir o consumo de energia dos *drones* através do uso otimizado da autonomia de um *drone*, fazendo com que o máximo possível de dispositivos IoT sejam visitados dentro dos nós alocados. Essa solução pode ser modelada usando PLIM [14]. A escolha da técnica Programação Linear se dá pois as funções objetivo e as restrições são funções lineares.

Este modelo PLIM possui uma versão preliminar publicada em [7], mas neste trabalho há uma evolução em pontos muito importantes, como na localização 3D dos VANTs e o aperfeiçoamento do modelo de consumo energético que será detalhado a seguir. Após a definição do modelo matemático usado para tratar as variáveis existentes dentro do contexto do problema, este é aplicado através da ferramenta de otimização CPLEX [15], e, para a implementação, é usada a linguagem de otimização OPL (*Optimization Programming Language*). Após a coleta de dados extraídos das simulações e soluções encontradas no CPLEX, é utilizado o MATLAB [16] para realizar a plotagem dos dados resultantes em gráficos condizentes.

Considerando um conjunto de dispositivos IoT  $S = \{1, 2, \dots, N\}$  espalhados em um campus de forma aleatória, estabelecendo entre cada um desses sensores IoT um arco de distância, ou seja a linha da trajetória entre cada um dos pontos de localização destes dispositivos. A partir desse conjunto de dispositivos são gerados outros 3 conjuntos para as coordenadas tridimensionais da localização de cada um dos IoT:  $Xs = \{X_{s1}, X_{s2}, \dots, X_{sN}\}$ ,  $Ys = \{Y_{s1}, Y_{s2}, \dots, Y_{sN}\}$  e  $Zs = \{Z_{s1}, Z_{s2}, \dots, Z_{sN}\}$ .

O posicionamento dos sensores utilizando apenas duas coordenadas pode ser encontrado em outros trabalhos [7]. Nesta abordagem, desconsidera-se a altura do VANT,

por este motivo, o cálculo energético é feito de forma simplificada, baseando-se apenas em dois eixos de localização, utilizando assim a fórmula básica de velocidade para calcular a autonomia. Neste trabalho o cálculo energético leva em consideração outras variáveis que são apresentadas na próxima seção.

O conjunto de arestas entre os pontos de localização dos dispositivos IoT é dado por  $A_r = \{(1,1), (1,2), \dots, (N-1, N)\}$ . Este conjunto dá origem a uma matriz de energias consumidas para o trajeto entre os nós da aresta, referentes a todos os dispositivos IoT do conjunto S entre si quando a energia consumida dos pares com o mesmo sensor, por exemplo, (1,1), é zero. A matriz de energias juntamente com todo o conjunto  $A_r$  geram um grafo completo, ponderado e bidirecional, representado na Figura (2), usada para mostrar todos os percursos possíveis a serem executados pelo VANT. Na figura também são especificadas as localizações (x, y e z) dos 9 dispositivos IoT e o Ponto Inicial nessa instância.

O *drone* que executa o voo nessa trajetória possui autonomia limitada dada pela variável  $A$ , que terá seu cálculo, bem como o do Gasto Energético do *drone*, demonstrados na subseção a seguir. Para fins de modelagem, o conjunto S possui o número de elementos igual a: Número de dispositivos IoT somados ao Ponto Inicial. O Ponto Inicial é o local de decolagem e aterrissagem do *drone*.

É importante observar que o problema aqui abordado, em relação à modelagem de Programação Linear, possui similaridades à vários aspectos no Problema do Caixeiro Viajante [17]. Aquele problema tinha por objetivo visitar todos os nós distribuídos em uma determinada área atingindo o menor custo para se realizar isso. Note que neste trabalho é tratado a possibilidade de não ser viável visitar todos os nós, eventualmente por não se ter a autonomia necessária para tal. Com isso difere-se especialmente o objetivo da otimização, que neste caso é saber o máximo possível de pontos visitados dada a restrição de autonomia energética que é oferecida.

#### A. Cálculo da Autonomia e do Gasto Energético do Drone

É efetuado o cálculo da energia total armazenada em cada bateria que o drone pode utilizar. Todo o cálculo explicado nesta subseção é utilizado para gerar entradas para a matriz de energias especificada na subção anterior. Primeiramente, é necessário calcular a Potência da bateria ( $P$ ). Este cálculo se inicia a partir dos parâmetros de Corrente Elétrica ( $I$ ) e Tensão ( $V$ ) (1):

$$P = I \times V \quad (1)$$

Logo em seguida, com o dado de Potência auferido, pode-se calcular também o total de Energia, uma vez que a Potência nos informa sobre a quantidade de energia consumida por unidade de tempo. Esta quantidade de energia será utilizada para determinar a autonomia ( $A$ ) do drone no momento anterior ao vôo. Neste caso, é indicada a quantidade de energia armazenada na bateria em Watts-hora.

Para compatibilizar os cálculos do gasto energético do *drone* durante o deslocamento, feitos utilizando o Sistema Internacional de Medidas, converte-se a energia armazenada para Joules, multiplicando o valor em Watt-hora por 3600. Os dados utilizados em relação à autonomia das baterias, durante as simulações realizadas, se encontram na Tabela I.

No cenário tratado pela modelagem em Programação Linear é definido que o *drone* irá visitar o ponto exato de localização tridimensional do sensor. Observa-se que os dispositivos IoT estão em alturas diferentes, e a cada altura foi atribuído um valor entre o intervalo de 30 e 100 metros. Este intervalo é definido pela legislação brasileira, para que os VANTS transitem sem que haja riscos de colisão com aeronaves comerciais ou ameaça às pessoas. Esse aspecto do cenário pode ser visto de uma forma como se esta localização indicasse um ponto de visita para cobrir um grupo de sensores clusterizados o que justifica a determinação de que o VANT visite o exato ponto também na coordenada ( $Z$ ). Porém esta etapa de clusterização não foi o foco deste trabalho.

Considerando que o *drone* irá percorrer um trajeto realizando subidas e descidas, assim como deslocamentos horizontais, é necessário calcular o gasto de energia que há de acordo com a natureza do movimento que a aeronave executa. Em (2) tem-se a equação geral que define o cálculo do consumo de energia ( $E_{traj}$ ) para que o *drone* efetue um trajeto específico. A Distância ( $D$ ) é resultado da distância euclidiana tridimensional entre dois pontos de localização de dois dispositivos IoT diferentes, portanto, a fórmula (2) se refere a cada trajeto de deslocamento entre apenas dois dispositivos, e será usada para alimentar o conjunto ( $E$ ).  $P_v$  é a potência de consumo para o deslocamento vertical, e  $P_h$  é a potência de consumo para o deslocamento horizontal. Se houver diferença de altura  $\Delta h$  entre os dois pontos de movimentação, a velocidade correspondente ao movimento vertical e ao movimento horizontal serão respectivamente  $V_v = v \text{ seno } \phi$  e  $V_h = v \text{ cos } \phi$ , com  $\phi = \text{seno}^{-1} \left( \frac{\Delta h}{D} \right)$ .  $P_p$  é composto pela Força Parasita ( $P_p$ ) (3) e a Força Induzida ( $P_i$ ) (4), respectivamente para superarem o arrasto parasita e o arrasto induzido. O Arrasto Parasita é o arrasto, ou seja a resistência de atrito ao ar, provocado por todas as superfícies do avião que não produzem sustentação, já o Arrasto Induzido é provocado pela tendência que o ar tem em escoar da parte inferior para a parte superior das superfícies aerodinâmicas, devido a diferença de pressão existente entre elas, formando pequenos redemoinhos ou turbilhonamentos, que se não forem minimizados, afetarão a sustentação destas superfícies. Por isso o  $P_h$ , ou seja a força necessária para o VANT se locomover horizontalmente deve ser equivalente a ação dessas duas outras forças somadas, e dessa forma a Força Parasita ( $P_p$ ) e a Força Induzida ( $P_i$ ) se relacionam ao  $P_h$ . Estas fórmulas, bem como suas demonstrações, podem ser encontrados em [18].

$$E_{traj} = \frac{D}{v} (P_v + P_h) \quad (2)$$

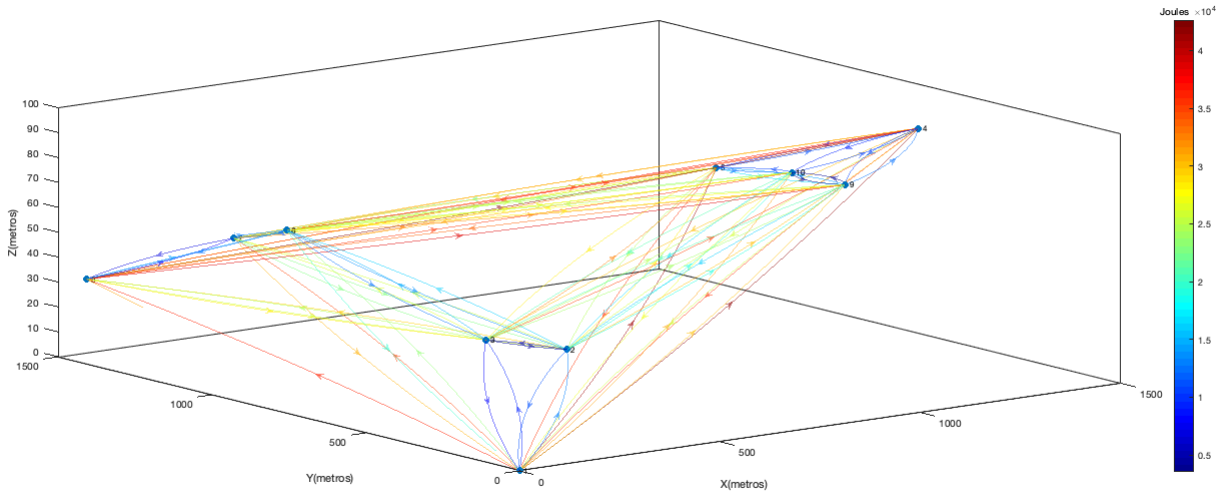


Fig. 2: Grafo completo, ponderado e bidirecional.

A Força Parasita é dada por:

$$P_p = \frac{1}{2} \rho C_{D0} A_e v_h^3 \quad (3)$$

Onde  $v_h$  é a velocidade horizontal efetiva,  $C_{D0}$  é o coeficiente de arrasto,  $\rho$  é a densidade do ar,  $A_e$  é a área de referência, neste caso específico, se tratando da área frontal do VANT, está fórmula não leva em consideração a força aplicada por ventanias contra o VANT, o que pode ser um fator complicador para se auferir os resultados práticos.

A Força Induzida é calculada através de:

$$P_i = \omega R_{ad} W \times \lambda \quad (4)$$

A equação é formada por  $\omega$  que é a velocidade angular,  $R_{ad}$  é o radio do disco rotor,  $W$  é o peso do *drone* e o  $\lambda$ , caracterizado por ser o fator da velocidade induzida, que será encontrado através da resolução da seguinte equação:

$$g(\lambda) = 2\rho\pi\omega^2 R_{ad}^4 \lambda \sqrt{\frac{v_h^2}{\omega^2 R_{ad}^2} + \lambda^2} - W = 0 \quad (5)$$

A potência de consumo vertical devido à ascensão e às descidas (assumindo descidas rápidas) é dada [18] pelas equações:

$$P_v = \begin{cases} \frac{W}{2} v_v + \frac{W}{2} \sqrt{v_v^2 + \frac{2W}{\rho R_{ad}^2}}, & \text{ascendendo,} \\ \frac{W}{2} v_v - \frac{W}{2} \sqrt{v_v^2 - \frac{2W}{\rho R_{ad}^2}}, & \text{descendo,} \end{cases} \quad (6)$$

### B. Formulação do Problema

Para cada uma das arestas que é computada como trajetória contida no percurso do voo é necessário determinar uma variável booleana que especifica se a aresta é percorrida ou não para um par  $(i, j)$  sendo o  $i, j \in S$  e  $(i, j) \in E$ . Esta variável de decisão é dada em (7):

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E \quad (7)$$

Num cenário onde se tenha um conjunto de dispositivos IoT espalhados por determinada área, serviriam ao propósito de produção de dados, que por sua vez serão utilizados para prover algum serviço ou aplicação. Portanto, para este contexto o maior interesse é que seja visitado o maior número de dispositivos IoT possíveis. Ainda, temos para este cenário, que o VANT deverá sair de um Ponto Inicial, padronizado como tendo coordenadas  $(0, 0, 0)$  e deverá voltar para o mesmo ponto, ou seja, esta coordenada é definida também como a posição de retorno do VANT. Dado um conjunto  $A_r$  de arestas percorridas, o número de dispositivos IoT visitados é igual a  $A_r - 1$ , pois a última aresta  $(i, j)$  é relativa à volta do *drone* para o Ponto Inicial  $(1, 1)$ . O objetivo da otimização modelada é maximizar o número de dispositivos IoT visitados, dado pelo somatório de arestas percorridas. Este objetivo é demonstrado em (8):

$$MAX w = \left( \sum_{(i,j) \in E} X_{ij} \right) - 1 \quad (8)$$

Para atender o objetivo especificado existem várias restrições de comportamento para se atender em relação à trajetória. O *drone* deve obrigatoriamente sair do Ponto Inicial e se dirigir para algum dos dispositivos IoT somente uma vez. Para isso, têm-se que o somatório das variáveis de decisão das arestas do Ponto Inicial para todos os  $N$  dispositivos IoT deve ser igual a um, tal como demonstrado em (9). Isso significa que caso haver, por exemplo, 5 sensores espalhados pelo campus, o VANT irá sair do Ponto Inicial e ir sair de lá para somente um dos 5 sensores, ou seja, não poderá uma vez que retornou ao Ponto Inicial sair novamente para um outro sensor, considerando que o VANT realizará apenas um voo. Tal padrão vale para o

| Carga Elétrica | Tensão | Energia Convertida em Joules |
|----------------|--------|------------------------------|
| 1500Ah         | 11, 1V | 59940J                       |
| 2500Ah         | 11, 1V | 99900J                       |
| 4000Ah         | 11, 1V | 159840J                      |

TABELA I: Especificações das baterias LiPO simuladas

retorno ao Ponto Inicial, onde o somatório das variáveis de decisão também vale um (10).

$$\sum_{(1,j) \in E} X_{1,j} = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{(i,1) \in E} X_{i,1} = 1 \quad (10)$$

A restrição (11) garante que o somatório das variáveis de decisão de chegada em um sensor deve ser igual ao somatório das saídas no mesmo sensor. Essa restrição é importante pois em cada sensor que o *drone* entre sobrevoando, percorrendo a trajetória de chegada pelo sensor, o *drone* deve, para este, percorrer a trajetória de saída. Entende-se por trajetória de saída a aresta que vai do último ponto visitado pelo drone até o próximo ponto de sensor que será visitado.

$$\sum_{(i,h) \in E} X_{i,h} = \sum_{(h,j) \in E} X_{h,j}, \forall h \in S \quad (11)$$

Dado um subconjunto  $R$  de dispositivos IoT dentro do conjunto total, neste, o total de arestas percorridas deve ser igual o total de vértices (dispositivos IoT), menos um, para que não se feche uma sub trajetória dentro daquele conjunto de dispositivos IoT (12). Esta restrição atua para evitar qualquer desperdício na autonomia restante do *drone* durante o voo, uma vez que se um sensor já tiver sido visitado anteriormente não é necessário que se retorne ao mesmo.

$$\sum_{i \in R} \sum_{j \in R} X_{i,j} \leq |R| - 1, R \subset S, 2 \leq |R| \leq n \quad (12)$$

Para especificar que o *drone* não possa percorrer uma distância maior do que a autonomia que ele possui, deve-se multiplicar cada variável de decisão, zero ou um, pela distância daquela aresta, e o somatório de todas distâncias percorridas deve ser menor ou igual à autonomia total do *drone* (13).

$$\sum_{(i,j) \in E} E_{i,j} X_{i,j} \leq A \quad (13)$$

#### IV. AVALIAÇÃO

**F**OI simulado um conjunto de 10 dispositivos IoT distribuídos numa área de  $1500m^2$  e três instâncias de autonomies diferentes, cada uma destas referindo - se a um modelo de bateria com especificações técnicas diferentes, demonstradas na Tabela I. Os dispositivos IoT são alocados em uma área num raio de no máximo 1500 metros de distância, distribuídos a partir da definição de

| Parâmetro | Valor            |
|-----------|------------------|
| $\rho$    | $1,225kg/m^{-3}$ |
| $C_{D0}$  | 0,0225           |
| $A_e$     | $0,07992m^2$     |
| $\omega$  | 20rad/s          |
| $R_{ad}$  | 0,5cm            |
| $V$       | 15m/s            |
| $W$       | 19N              |

TABELA II: Parâmetros para cálculo do gasto energético do Drone.

dos eixos x e y. Para os valores do eixo z, referente altura do sensor, foram definidos números no à intervalo entre 30 e 100 metros, atendendo aos requisitos de altura para voo do VANT na legislação brasileira. As distâncias entre os dispositivos IoT são estáticas, isto é, não mudam a cada voo, caso a posição dos sensores for modificada é necessária atualizar o conjunto de arestas definido como  $A_r$ . O nó inicial, que é o ponto de saída do *drone*, deve ser levado em consideração para compor o total de nós do conjunto de dispositivos IoT. O Ponto Inicial é um local onde será guardado o *drone*, e eventualmente pode-se efetuar recargas, preferencialmente no período onde não há voos programados, por isso neste cenário se é considerado vários voos executados sequencialmente, como por exemplo, num campus universitário ao longo de um período que não houve recargas no VANT. Para o cálculo das potências de consumo vertical e horizontal, bem como o custo energético em cada uma dos caminhos do drone, são utilizados os parâmetros constantes da Tabela II, sendo empregado as especificações do *drone* Intel Aero Ready to Fly Drone [19], inclusive para o requerimento das baterias utilizadas, sendo estas: Li-Po, 3S ou 4S e conector XT60.

Como foi especificado nas formulações do modelo de consumo energético, os cálculos de potência para movimento vertical assumem descidas rápidas. Porém, em alguns casos os cálculos padrões atribuem velocidade muito baixa na descida devido a grande proximidade horizontal entre os dois dispositivos IoT por onde o drone realiza seu deslocamento. Como a formulação não contempla esse caso de descida devagar, é atribuída a velocidade padrão do VANT utilizado, que é de 15m/s.

Na primeira instância (Figura 3), o *drone* tem uma autonomia total de 59940 Joules para serem usados no percurso, e considerando os 10 dispositivos IoT alocados na área, o *drone* só consegue visitar 3 destes, fazendo um percurso de 4 arestas para visitar tais dispositivos, sendo elas: (1,2), (2,3), (3,6) e (6,1). O gasto total da trajetória percorrida pelo *drone* é de 52713 Joules, restando 7227 Joules de autonomia que ainda poderiam ser usada pelo *drone*, porém, não é aproveitada pois não é suficiente para visitar mais dispositivos IoT, considerando não somente o gasto para chegada no sensor como também o gasto de volta até o Ponto Inicial.

Apesar da autonomia restante parecer alta, a otimização realizada concentra-se na quantidade de dispositivos IoT visitados, isto é, independente da quantidade de autonomia restante o número de dispositivos IoT visitados é o

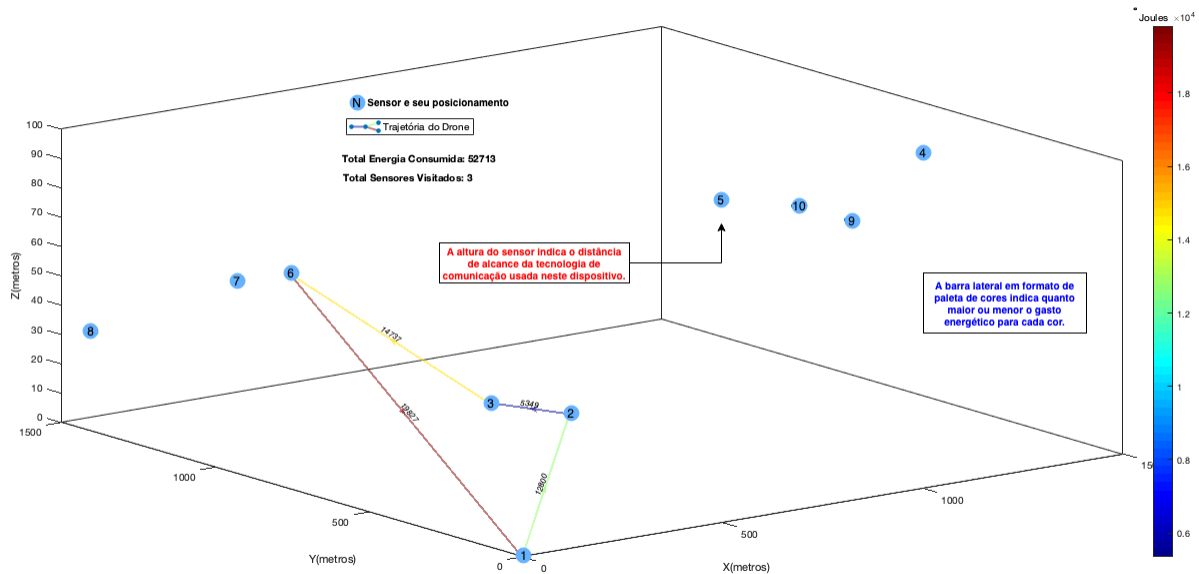


Fig. 3: Trajetória do Drone para a bateria de 1500 mAh.

máximo que se conseguiria sobrevoar com a autonomia considerada. É possível que haja várias instâncias de consumos energéticos para a mesma quantidade de dispositivos IoT visitados considerando a mesma autonomia. Os custos energéticos entre os dispositivos IoT utilizados na primeira instância são os mesmos entre todas as demais instâncias simuladas dentro deste conjunto. Na trajetória ilustrada nas figuras é exibida a sequência de pontos visitados com a sua localização especificada em relação ao Ponto Inicial e aos eixos do gráfico.

Quanto a segunda instância analisada (Figura 4), foi atribuído uma autonomia total do *drone* de 99900 Joules. Fazendo um aproveitamento dessa autonomia, o maior número possível de dispositivos IoT visitados foram 6. O total do gasto energético é de 94696 Joules com restante de autonomia de 5204 Joules.

Para a terceira e última instância de autonomia analisada foram atribuídos 159840 Joules de autonomia para o *drone* (Figura 5). Nessa instância, o *drone* consegue sobrevoar 9 nós de dispositivos IoT dentro da alocação estabelecida, ou seja, todos os dispositivos IoT alocados e o Ponto Inicial de saída do drone, totalizando 10 nós. Para efetuar toda a trajetória ele gasta 128202 Joules de autonomia com o restante de 31638 Joules. Não se pode afirmar que o custo do sobrevôo empregado equivale ao mínimo gasto para que o *drone* sobrevoe os dispositivos IoT dessa instância, pois as restrições não garantem que ele use o mínimo de energia para sobrevoar o máximo de dispositivos IoT. Esse gasto energético mínimo não é garantido pelo modelo de otimização proposto, pois caso fosse, se constituiria uma função multiobjetivo, o que não é o caso deste modelo.

## V. OTIMIZAÇÃO ATRAVÉS DE META-HEURÍSTICA

### A. Sistema de colônia de formigas

O cenário descrito na seção III passa a apresentar características de um problema NP-Completo a medida em que fatores adicionais são levados em consideração, como a existência de múltiplos objetivos ou o aumento considerável no número de dispositivos IoT na área de cobertura. Problemas como estes apresentam uma característica de explosão combinatória, onde técnicas tradicionais que buscam a *solução ótima* podem não apresentar um comportamento computacionalmente viável. Em alguns casos nem sempre haverá uma solução única global para o problema em questão, mas um conjunto de soluções ótimas chamado Frente de Pareto [20].

Diante disso, uma solução em potencial pode ser obtida através da utilização de técnicas mais elaboradas, como o uso das meta-heurísticas[21]. As meta-heurísticas representam um conjunto de técnicas de otimização adaptadas para lidar com problemas complexos. Dentre as diversas técnicas existentes, o sistema de colônia de formigas (*Ant Colony Optimization - ACO*) [22] se apresenta como uma técnica multi-agentes para resolver problemas de otimização combinatória. As formigas artificiais possuem alguma memória, são completamente cegas, atuam em um tempo discreto e se movimentam pelo espaço de busca alimentando uma trilha de feromônios  $\tau$  [23], cujo comportamento se descreve da seguinte maneira. Seja  $\tau_{ij}(t)$  a intensidade de feromônio na aresta  $(i, j)$  no tempo  $t$ , cada formiga no tempo  $t$  escolhe a próxima aresta onde irá no tempo  $t + 1$ . A escolha da aresta para movimentação é definida como uma função de probabilidade de  $\alpha$  e  $\beta$ , cujos valores de referência são apresentados na tabela IV. Deste modo, é possível definir uma iteração do sistema como sendo os  $n$  movimentos realizados pelas  $m$  formigas



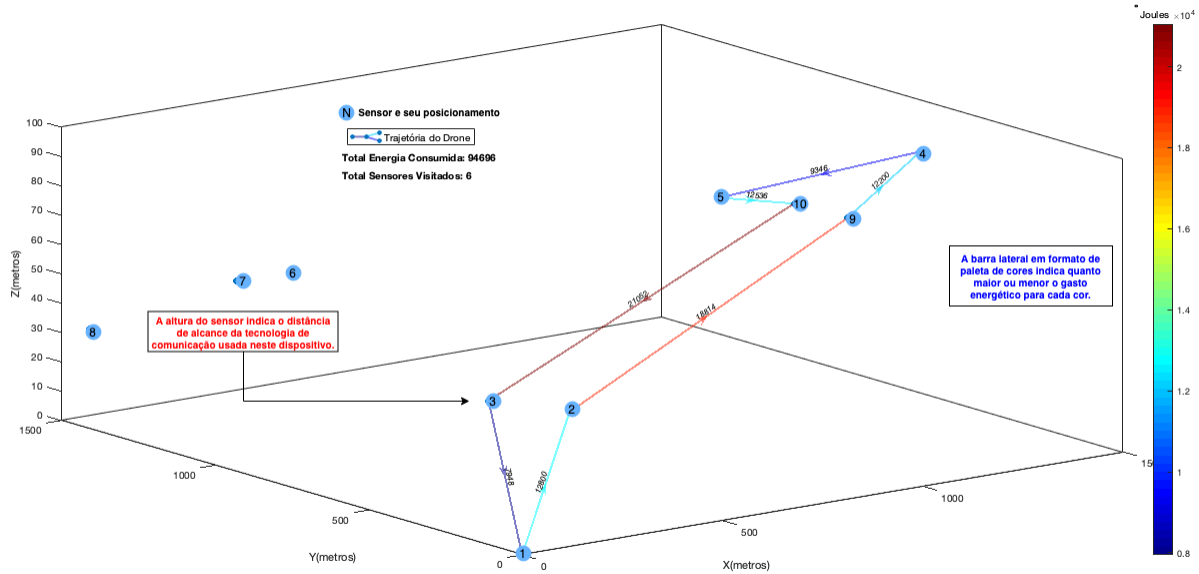


Fig. 4: Trajetória do Drone para a bateria de 2500 mAh.

no intervalo  $(t, t + 1)$ , então as  $n$  iterações de cada uma das formigas formam um ciclo, ou seja, cada formiga realizou um *tour* passando por todas as arestas. Em todos estes pontos a intensidade do feromônio  $\tau$  é atualizada segundo a equação 14, onde  $\rho$  é o coeficiente de evaporação do feromônio entre os tempos  $t$  e  $t + n$ , e  $\Delta\tau_{ij}$  é a quantidade por unidade de comprimento de feromônio entre os tempos  $t$  e  $t + 1$ , caracterizada pela equação 15 em que  $Q$  é uma constante e  $L_k$  é o comprimento do caminho percorrido pela  $k$ -ésima formiga, considerando os possíveis deslocamentos verticais e visando alcançar uma determinada altitude de cruzeiro *alt* cujo valor é apresentado na IV. O coeficiente  $\rho$  deve ser ajustado em um valor menor que 1, visando evitar acúmulo ilimitado de substância.

$$\tau_{ij}(t + n) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{se a formiga } k \text{ passa pela aresta } (i, j) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (15)$$

A intensidade do feromônio de cada aresta irá evaporar depois de um certo tempo, perdendo a intensidade e outras formigas não passarão pelo mesmo caminho e depositarão mais resíduo. O processo iterativo termina se for alcançado um número máximo de iterações pré-estabelecidas ou se todas as formigas escolherem o mesmo *tour*. Uma versão resumida da adaptação da técnica utilizada nesta seção é apresentada no algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1: OTIMIZE**


---

**Entrada:**  $S, ants$ 
**Saída:** Melhor tour

**1 início**
**2** Inicializar matriz de feromônio

**3** Inicializar taxa de evaporação

**4 repita**
**5 para cada  $k \in ants$  faça**
**6** | Movimentar as formigas pelas arestas

**7** | Armazenar cada *tour* resultante da movimentação em *tours*
**8** | Avaliar *custo* cada *tour* com a função de *fitness*
**9 fim**
**10 para cada  $t \in tours$  faça**
**11 se *Custo***
**12** |  $\in t < \text{Custo} \in \text{MelhorTour}$  então

**13** | |  $\text{MelhorTour} = t$ 
**14 fim**
**15 fim**
**16 para cada  $k \in ants$  faça**
**17** | Atualizar a matriz de feromônios

**18 fim**
**19** | Atualizar taxa de evaporação

**20 até enquanto existir chamadas de função disponíveis;**
**21 fim**
**22 retorna *tour***


---

B. Aplicação do método de otimização baseado em meta-heurística

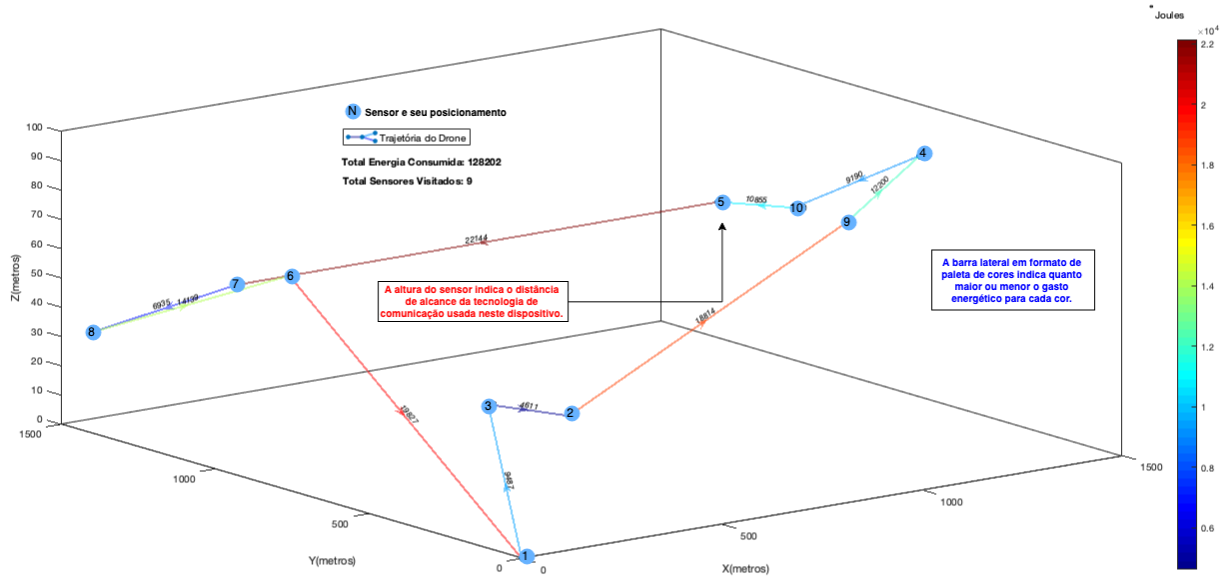


Fig. 5: Trajetória do Drone para a bateria de 4000 mAh.

| Identificador | Descrição         | Alcance |
|---------------|-------------------|---------|
| 1             | Bluetooth Class 1 | 100 mts |
| 2             | WiFi              | 50 mts  |
| 3             | Bluetooth Class 3 | 10 mts  |

TABELA III: Potência efetiva de transmissão dos dispositivos IoT

| Símbolo  | Parâmetro                              | Valor   |
|----------|----------------------------------------|---------|
| $ants$   | Número de formigas                     | 40      |
| $\rho$   | Taxa de evaporação                     | 0,05    |
| $\alpha$ | Peso exponencial do feromônio          | 0,8     |
| $\beta$  | Peso exponencial heurístico            | 0,8     |
| $alt$    | Altitude de voo durante o deslocamento | 100 mts |

TABELA IV: Parâmetros de referência - Sistema de colônia de formigas

Formalmente, um problema de otimização multiobjetivo (*POM*) pode ser definido como:

$$\min_{x \in Q} \{F(x)\} \quad (16)$$

com  $Q \in R^n$  sendo o domínio.

A função  $F$  é definida como um vetor de funções objetivo:  $F : Q \rightarrow R^k, F(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x))$  e cada  $f_i : Q \rightarrow R$  é contínua.

O modelo de simulação empregado nesta seção explora o mesmo cenário descrito na seção III. Nesta, é considerado adicionalmente que cada um dos dispositivos IoT é dotado de uma tecnologia com um alcance de transmissão ( $T$ ), cujos valores são descritos na tabela III.

Diante disso, tem-se que para cada sensor  $S_i \in \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ , são definidos os seguintes parâmetros:

- $(x_i, y_i)$ : localização do sensor, isto é, valores discretos sobre a representação matricial *raster* do terreno;
- $P_i \in P$ : potência efetiva de irradiação, dado um conjunto discreto de possíveis níveis de potência  $P$  de acordo com a tecnologia do respectivo sensor IoT.

Quanto ao deslocamento entre dois dispositivos IoT  $S_n$  para  $S_{n+1} \in S$ , foi definida uma altitude de cruzeiro  $alt$ . O valor de  $alt$ , apresentado na tabela IV, tem como base as características físicas do ambiente apresentado na Figura 1, onde a vegetação e a estrutura predial são obstáculos a serem considerados [24]. Deste modo, o

cálculo da distância  $D$  entre dois dispositivos IoT  $S_n$  e  $S_{n+1}$  deve considerar a potência efetiva de transmissão  $P$  de  $S_n$  e o respectivo deslocamento vertical em direção a  $alt$ . O padrão de irradiação da antena foi simplificado, deste modo, não é considerado o modelo omnidirecional, apenas a aproximação para um determinado ponto  $(x_i, y_i)$  dado uma potência  $P$ . Os valores de referência utilizados nas simulações do sistema de colônia de formigas são apresentados na tabela IV.

### C. Resultados - Sistema de colônia de formigas

Uma vez que o cenário exposto se encaixa como um problema de otimização, o resultado final é formado por um conjunto de soluções não-dominadas e equivalentes em termos de custo final. Em alguns casos, como o proposto neste artigo, nem sempre haverá uma solução única global, mas um conjunto de soluções ótimas [20]. Neste sentido, o processo de otimização através de meta-heurística irá encontrar a solução mais equilibrada.

A Figura 6 apresenta o resultado obtido com uma simulação envolvendo 6 dispositivos IoT, com um VANT parametrizado com autonomia de 780 metros. O ponto de partida é destacado em verde e está posicionado à 2 metros do solo. Os pontos amarelo indicam o alcance de cada um dos  $n$  dispositivos IoT de acordo com a potência efetiva

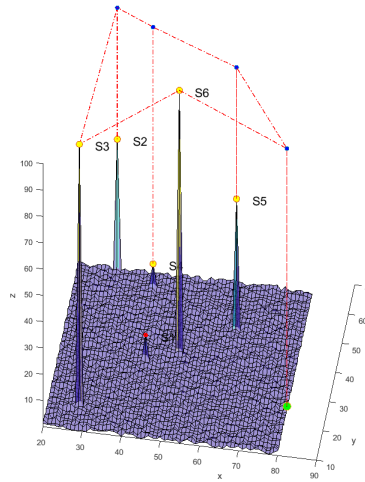


Fig. 6: Trajetória gerada com autonomia de 780 metros. 6 dispositivos IoT

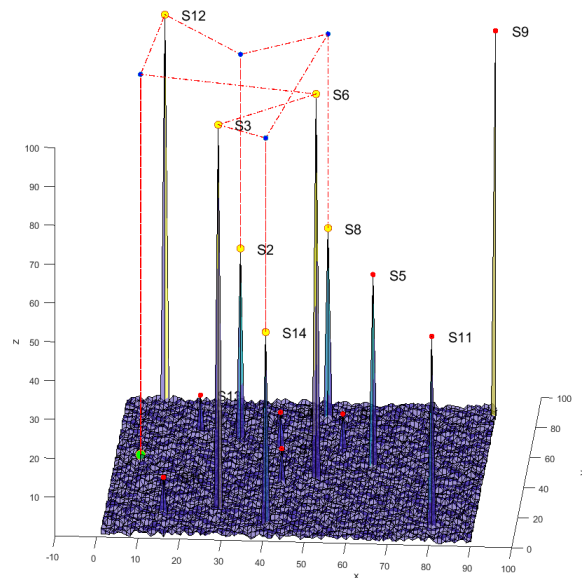


Fig. 7: Trajetória gerada com autonomia de 780 metros. 14 dispositivos IoT

de transmissão de cada um. A linha vermelha indica a rota otimizada a ser percorrida pelo VANT. Os pontos destacados em azul indicam os vértices de junção entre altitude de cruzeiro  $alt$  e o ponto de alcance do sensor dados pela potência  $P$ . A rota otimizada apresentada na Figura 6 possui a seguinte sequência de visitação:  $\{S_5, S_4, S_2, S_3, S_6\}$ . Os valores de potência efetiva de transmissão  $P$  para cada um dos dispositivos IoT são definidas da seguinte forma:  $10 \forall P_s \in \{S_1, S_4\}$ ,  $50 \forall P_s \in \{S_2, S_5\}$  e  $100 \forall P_s \in \{S_3, S_6\}$ . Diante disso o deslocamento do ponto de partida para o primeiro sensor do *tour*  $S_5$  compreende os seguintes passos:

- deslocamento vertical da estação base até  $alt$ ;
- deslocamento horizontal de  $alt$  até as coordenadas de  $S_5$ ;
- deslocamento vertical de  $alt$  até  $P_{S_5}$ ;
- deslocamento vertical de  $P_{S_5}$  até  $alt$ .

Esta sequência será repetida para cada um dos  $n$  dispositivos IoT de  $S$  visitados no tour. A função de *fitness* considera como distância todo o trajeto percorrido entre  $S_n$  e  $S_{n+1}$ , incluindo os possíveis deslocamentos verticais visando o retorno a altitude de cruzeiro. O processo de convergência da meta-heurística tem como objetivos a busca do menor caminho, atingindo o maior número de dispositivos.

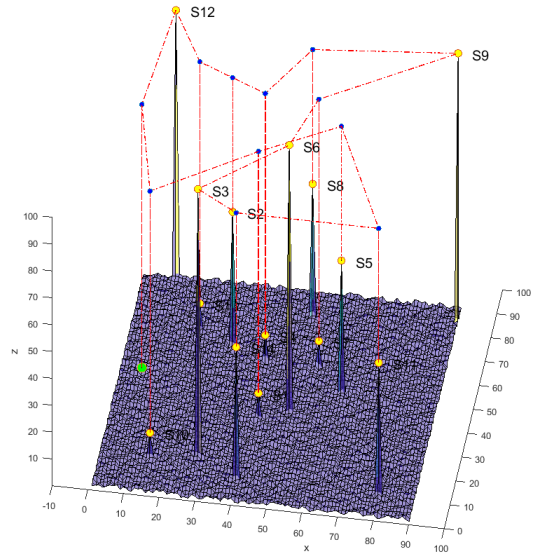


Fig. 8: Trajetória gerada com autonomia de 2500 metros. 14 dispositivos IoT

ativos IoT, sujeito a autonomia do dispositivo. Conforme exposto na Figura 6 o sensor  $S_1$  não foi contemplado.

Incrementando o número de dispositivos IoT para 14 unidades e mantendo o mesmo valor para o parâmetro de autonomia, naturalmente atribui-se complexidade adicional ao espaço de busca. Os resultados são apresentados na Figura 7. A trajetória considerada como a melhor resposta consegue cobrir os dispositivos IoT  $\{S_6, S_3, S_{14}, S_8, S_2, S_{12}\}$ .

Se o parâmetro de autonomia do VANT for incrementado, o processo de convergência irá naturalmente aumentar o número de dispositivos IoT cobertos. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos com os mesmos dispositivos IoT descritos na Figura 7, com autonomia de voo de 2500 metros. A trajetória obtida como melhor resposta consegue cobrir 14 dispositivos IoT:  $\{S_{10}, S_1, S_5, S_{11}, S_{14}, S_3, S_6, S_7, S_9, S_8, S_4, S_2, S_{13}, S_{12}\}$ .

Para estabelecer um comparativo entre os dois modelos é definido como parâmetro geral a quantidade de sensores, em diferentes instâncias, pois este conjunto apresenta o maior impacto quanto ao tempo de processamento em cada um dos modelos. Na figura (9) vê-se um gráfico do tempo de processamento no eixo vertical e a quantidade de sensores no eixo horizontal. A partir disso, verificamos que o tempo de processamento utilizando ACO, mostrado o crescimento na linha vermelha, possui uma variação pequena, e a medida que o tamanho do problema cresce, o tempo de processamento permanece viável. Quanto ao caso de processamento utilizando MILP, em azul, verifica-se que a medida que o tamanho do problema cresce o tempo de processamento cresce consideravelmente, apresentando um indicativo de se tornar inviável, caso opte-se por simular com quantidade de sensores bem maior.

## VI. CONCLUSÃO

NESTE trabalho é proposta uma modelagem de otimização combinatória muito semelhante ao problema de roteirização de veículo, porém, várias especificidades são adequadas neste cenário com um *drone* sobrevoando dispositivos IoT alocados numa determinada área. O modelo proposto visou atingir, com um drone de autonomia limitada, o máximo de visitas aos nós de dispositivos IoT alocados. O modelo de Programação Linear foi elaborado considerando algumas simplificações quanto ao raio de alcance específico para cada sensor, devido a sua tecnologia de comunicação e em relação à irradiação da antena que é acoplada ao VANT durante o voo. Estes fatores deveriam ser considerados e podem ser agregados no modelo de programação linear de trabalhos futuros.

Posteriormente, uma adaptação do sistema de colônia de formigas foi utilizado. Os resultados mostram a eficácia do modelo aplicado a um cenário real, com alta complexidade. O melhor resultado alcançou uma cobertura de 14 dispositivos IoT, considerando fatores adicionais quando do deslocamento do *drone* por sobre a área de cobertura.

O modelo de programação linear se preocupou em delimitar algumas variáveis dentro deste contexto de uso dos *drones* como gateway de comunicação, ou mula de dados, e com estas obteve-se sucesso no objetivo do modelo e foi conquistado um terreno importante para o tratamento deste tipo de problema de trajetória de *drones*. Pretende-se agregar ao algoritmo de pesquisa operacional outras variáveis e simular utilizando as tecnologias de redes sem fio possíveis dentro da comunicação *drone* e sensor, e também, espera-se alocar os dispositivos IoT usando coordenadas geográficas reais com o objetivo de calcular as distâncias num dado espaço geográfico real. Dessa forma, pode-se

REFERÊNCIAS



Fig. 9: Gráfico do tempo de processamento utilizando MILP em azul, e ACO em vermelho para cada instância de sensores.

comparar as simulações feitas com um teste envolvendo *drones* reais.

Nas simulações através do sistema de colônia de formigas foi utilizado uma simplificação no padrão de irradiação da antena, e com trabalhos futuros, é prevista a consideração do modelo omnidirecional de irradiação de sinal. Deste modo, para cada um dos dispositivos IoT é possível se ter um círculo com atenuação nas bordas e centro quando visto de cima. Diante disto, a aproximação de cobertura por parte do *drone* passa a considerar um toroide em 3 dimensões de acordo com a tecnologia do sensor, deste modo, o sensor será considerado coberto apenas com uma aproximação, não necessitando tocar no ponto específico.

REFERÊNCIAS

- [1] J. A. Stankovic, “Research directions for the internet of things,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 3–9, 2014.
- [2] MCTIC. (2017). Plano nacional de iot. Data acesso: Julho 2018, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.
- [3] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, “Internet of things for smart cities,” *IEEE Internet of Things journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
- [4] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “Mobile unmanned aerial vehicles (uavs) for energy-efficient internet of things communications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 11, pp. 7574–7589, 2017.
- [5] O. Vermesan and P. Friess, *Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems*. River Publishers, 2013.
- [6] Snow. (2014). Why drones are the future of the internet of things? Data acesso: Julho 2018.
- [7] L. Soares, C. Macedo, K. Cardoso, V. Borges, L. Pinto, and A. Junior, “Otimização da trajetória de drones como gateway de comunicação para sensores iot,” *VI edição da ERIGO - Escola Regional de Informática de Goiás (Evento)*, 2018.
- [8] K. Cardoso, A. Junior, S. Correa, P. Souza, J. Vieira, J. Jesus, and P. Sousa, “Gt-software4iot: Software-defined gateway and fog computing for iot (internet of things),” *20º Workshop da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (WRNP)*, 2019.
- [9] H. Menouar, I. Guvenc, K. Akkaya, A. S. Uluagac, A. Kadri, and A. Tuncer, “Uav-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 22–28, 2017.
- [10] C. Seiber, D. Nowlin, B. Landowski, and M. E. Tolentino, “Tracking hazardous aerial plumes using iot-enabled drone swarms,” in *Internet of Things (WF-IoT), 2018 IEEE 4th World Forum on*, IEEE, 2018, pp. 377–382.
- [11] R. Kirichek, “The model of data delivery from the wireless body area network to the cloud server with the use of unmanned aerial vehicles.,” in *ECMS*, 2016, pp. 603–606.
- [12] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, “Throughput maximization for uav-enabled mobile relaying systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 12, pp. 4983–4996, 2016.
- [13] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage.,” *IEEE Com-*

- munications Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1647–1650, 2016.
- [14] S. Ouahouah, T. Taleb, J. Song, and C. Benzaid, “Efficient offloading mechanism for uavs-based value added services,” in *Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [15] I. I. CPLEX, “V12. 1: User’s manual for cplex,” *International Business Machines Corporation*, vol. 46, no. 53, p. 157, 2009.
- [16] M. U. Guide, “The mathworks,” *Inc., Natick, MA*, vol. 5, p. 333, 1998.
- [17] G. B. Dantzig, D. R. Fulkerson, and S. M. Johnson, “On a linear-programming, combinatorial approach to the traveling-salesman problem,” *Operations Research*, vol. 7, no. 1, pp. 58–66, 1959.
- [18] A. Filippone, *Flight performance of fixed and rotary wing aircraft*. Elsevier, 2006.
- [19] Intel. (2018). Intel aero ready to fly drone. Data acesso: Julho 2018, Intel Corporation.
- [20] A. S. Rocha, C. J. A. Macedo, P. H. S. Palhares, and L. C. Brito, “An improved multiobjective search method applied to single frequency networks planning,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 10, no. 1, pp. 1143–1148, Jan. 2012, ISSN: 1548-0992. DOI: 10.1109/TLA.2012.6142450.
- [21] X.-S. Yang, “A new metaheuristic bat-inspired algorithm,” in *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, J. R. González, D. A. Pelta, C. Cruz, G. Terrazas, and N. Krasnogor, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 65–74, ISBN: 978-3-642-12538-6. DOI: 10.1007/978-3-642-12538-6\_6. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6).
- [22] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*. Scituate, MA, USA: Bradford Company, 2004, ISBN: 0262042193.
- [23] M. J. R. S. Romero R, “Introdução a metaheurística,” *3º Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC*, 2004.
- [24] J. Á. Rizzo, J. Ribeiro Filho, and M. Y. Hashimoto, “Estudo da arborização e das áreas verdes do campus ii da universidade federal de goiás,” 1993.