Otimização da trajetória de Drones como gateway de comunicação para sensores IoT

Lucas Soares Rodrigues[1], **Kleber Vieira Cardoso**[1],**Vinicius da Cunha Martins Borges**[1]
Leizer de Lima Pinto [1], **Antonio Carlos de Oliveira Júnior**[1]

[1]Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás
Goiânia, Goiás, Brazil

{lucassoaresrodrigues, kleber, vinicius, leizer, antonio} @inf.ufg.br

Abstract. *This work proposes a flight path optimization model for drones that serve as a communication gateway or data mule for IoT (Internet of Things) sensors scattered in an Intelligent Campus. This drone has limited power autonomy (battery), and in many cases can not fly over the course required to serve all allocated sensors. Therefore, the paper proposes, using Linear Programming, a model that ensures the maximum of sensors are satisfied considering the autonomy found in the drone.*

Resumo. *Este trabalho propõe um modelo de otimização de trajetória de vôo para drones que servem como gateway de comunicação ou mula de dados para sensores IoT (Internet of Things) distribuídos em um Campus Inteligente. Este drone possui autonomia energética (bateria) limitada, e em muitos casos não pode sobrevoar o percurso necessário para atender todos os sensores existentes no conjunto alocado. Por isso o artigo propõe, utilizando Programação Linear, um modelo que assegure que o máximo de sensores sejam atendidos considerando a autonomia encontrada no drone.*

Palavras-chave— VANTs, IoT, Planejamento de Vôo, Otimização de Trajetória

1. Introdução

A importância de IoT (*Internet of Things*), a chamada Internet das Coisas, é praticamente inquestionável, em parte devido à enorme quantidade de aplicações disponíveis e em desenvolvimento. Apesar da implantação e uso de um grande número de dispositivos de IoT já ser uma realidade, o tema ainda é considerado extremamente importante tanto para a indústria quanto para a academia [Stankovic 2014].

No Brasil, por exemplo, o governo federal reconheceu a importância do tema através da iniciativa chamada Plano Nacional de Internet das Coisas [MCTIC 2017]. Dentre as aplicações para IoT, aparecem com destaque os ambientes inteligentes, e.g., Cidades e Campus Inteligentes [Zanella et al. 2014].

O campus pode ser visto como uma versão reduzida da cidade, portanto, o menor tamanho torna a gestão mais simples, e além disso, a possibilidade de acesso a toda a infraestrutura física do campus facilita a implantação e testes de soluções de maneira mais rápida. Por exemplo, o campus universitário é um laboratório adequado para testar soluções para ambientes inteligentes baseadas em IoT.

Inúmeros trabalhos aliando ambientes inteligentes e IoT vêm sendo desenvolvidos. A autonomia energética é um dos principais desafios encontrados acerca dos dispositivos e sensores IoT. Por causa de sua baixa autonomia, estes dispositivos possuem pouca mobilidade de conexão, ou seja, possuem limitação quanto à transmissão de longo alcance a partir de sua localização. [Mozaffari et al. 2017]. Os VANTs (Veículos Aéreos Não-Tripulados), e neste caso os *drones*, podem ser empregados para prover maior mobilidade a uma infraestrutura IoT.

Os VANTs podem ser usados como *relays* sem fio para aperfeiçoamento da conectividade e cobertura de dispositivos sem fio terrestres [Mozaffari et al. 2017]. Comparados com estações bases terrestres a vantagem do uso de estações bases usando VANTs é sua habilidade em prover comunicação *on-the-fly*, ou seja, no decorrer do vôo. Além disso, a alta atitude dos VANTs faz com que eles estabeleçam um link de comunicação LoS (*line-of-sight*), mitigando bloqueios e sombreamentos.

Os VANTs são previstos como um importante componente de um avançado ecosistema ciber-físico da Internet das Coisas [Vermesan and Friess 2013]. Isso é devido ao fato que os VANTs possuem características únicas como serem dinâmicos, fáceis de implantar, fáceis de reprogramar durante o tempo de execução, capazes de medir qualquer coisa em qualquer lugar, e capazes de voarem em um controle de espaço aéreo com um alto grau de autonomia [Snow 2014].

Portanto, um VANT pode prover uma conectividade *uplink* para dispositivos IoT fixos numa localização em um campus inteligente, sendo que este VANT é empregado como um gateway de comunicação que faz associação com estes dispositivos durante um vôo programável e autônomo. Para a realização deste vôo e o estabelecimento dessas comunicações podem ser avaliados vários critérios e restrições tais como a autonomia energética (capacidade de bateria) dos VANTs e a trajetória ótima a ser percorrida para obter melhor performance considerando todos seus recursos.

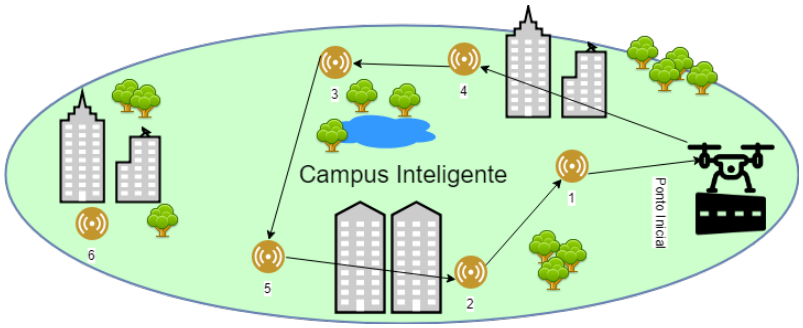

Figura 1. Exemplo de Campus Inteligente com sensores alocados

Um Campus Inteligente pode possuir um parque de sensores IoT implantados com a função de coletar os mais variados tipos de dados possíveis relativos ao funcionamento deste campus. Considerando um campus universitário, por exemplo, podemos implantar sensores para auxiliar a coleta de lixo, sensores para mapear vagas de estacionamento disponíveis no campus, sensores para monitorar funcionamento de recursos tais como ar condicionado em salas de aula, etc. A difícil conectividade móvel em lugares remotos onde foram ocasionados acidentes e catástrofes requerendo resgate imediato de pessoas também é um cenário onde se vê a utilidade do emprego de *drones* funcionando como

gateway de comunicações ou mula de dados. Essa comunicação é necessária para auxiliar tais ações, e a implantação eficiente de VANTs apoiando uma rede de sensores IoT pode ser crucial nessas situações extremas Um exemplo deste cenário é demonstrado na Figura 1, mas no caso da figura a trajetória não foi necessariamente a mais eficiente possível.

Este trabalho visa avaliar um importante atributo quanto ao papel realizado por VANTs neste cenário: 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. Visualiza-se um conjunto de sensores IoT espalhados por uma determinada área geográfica e sabe-se que em muitos casos não é possível servir todos os nós devido a uma limitada carga de bateria encontrada nos *drones*.

Neste artigo, aborda-se o planejamento de vôo autônomo de VANTs considerando a trajetória ótima para que seja atendido o máximo de sensores IoT possíveis dada uma baixíssima e limitada autonomia energética. Fazendo com que ao invés de realizar uma atualização da trajetória de vôo enquanto estiver pairando no ar, esta atualização é feita antes do início de cada vôo, e este *drone* somente realiza o vôo focado em realizar a sincronização dos dados com cada um dos sensores.

Neste contexto, através de Programação Linear, é proposto um modelo matemático que esquematize o objetivo a ser atingido e as restrições que deva-se atender para que o *drone* sirva o máximo de sensores possíveis dentro de um Campus Inteligente, informando quais são os nós a serem sobrevoados e a sequência de nós a serem visitados.

Para além dessa introdução, as demais seções a seguir deste artigo são divididas em: A seção 2 apresenta os trabalhos relacionados enquanto que a seção 3 a proposta de um Modelo de Otimização de Trajetória de Vôo. A seção 4 descreve a avaliação e a seção 5 as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Para possibilitar um sistema de transportes inteligente totalmente automatizado num contexto de Cidade Inteligente, [Menouar et al. 2017] usa VANTs como sensores conectados através de DSRC (*Dedicated Short Range Communications*) aos carros provendo comunicação V2V (*vehicle-to-vehicle*) e V2X (*vehicle-to-infrastructure*), capturando dados diretamente dos veículos e transmitindo essas informações até seu destinatário interessado na estação base via comunicação *multihop* (*relays* de rádios) numa abordagem D2D (*device-to-device*). O trabalho conclui que a operação verdadeiramente autônoma dos VANTs é um verdadeiro desafio, porque demanda a observação de seres humanos e outros obstáculos quaisquer.

[Seiber et al. 2018] usa *drones* como sensores IoT com a finalidade de detectar áreas perigosas contaminadas com agentes químicos sem que seja necessária uso de homens para fazer a detecção. A tecnologia de comunicação entre os *drones* foi *Wi-Fi*, e conexão entre *drone* e a estação base foi protocolo BLE (*Bluetooth Low Energy*). As limitações encontradas nos testes realizados foram em relação ao vôo programado dos *drones* que limitou-se por estabelecer alinhamento horizontal no enxame de VANTs, o que não aconteceria numa situação real.

[Kirichek 2016] desenvolve um modelo de entrega de dados partindo de sensores

terrestres sendo transmitidos aos *drones* até a 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.

Em [Jiang and Swindlehurst 2012] os autores investigaram a trajetória ótima de VANTs equipados com múltiplas antenas para maximizar a somatória da taxa de transmissão em comunicações *uplink*. O trabalho [Zeng et al. 2016] maximiza 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*. Em [Mozaffari et al. 2016b] é investigado a implantação ótima e o movimento de um único VANT para apoiar comunicações sem fio *downlink*.

Para mitigar a interferência , em [Mozaffari et al. 2016a], a altitude dos VANTs são apropriadamente ajustadas baseadas 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.

[Mozaffari et al. 2017] pretendeu encontrar uma implantação ótima para que os *drones* sirvam 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 outros desativados, este padrão de ativação é conhecido pelo servidor na nuvem.

Para fazer esta atualização da trajetória de mobilidade dos VANTs é realizada uma parada aérea estacionária para uma pequena economia de energia antes que se continue o movimento do VANT sem saber qual será a nova trajetória. Este cenário provavelmente prevê o uso de um VANT de média autonomia energética pois considera uma manutenção do vôo do *drone* por um período relativamente extenso, fazendo com que ele paire no ar por este tempo para servir como uma estação base para os dispositivos. Para o cenário determinado neste trabalho, é considerada situações com baixíssima autonomia.

3. Modelo de Otimização de Trajetória de Vôo

O modelo proposto visa reduzir o consumo de energia dos *drones* através do uso otimizado da autonomia restante de bateria de um *drone*, fazendo com que o máximo de sensores possíveis sejam visitados dentro dos nós alocados. Essa solução pode ser modelada usando PL (Programação Linear) [Ouahouah et al. 2017]. A escolha da técnica Programação Linear se dá pois as funções objetivo e as restrições são funções lineares. Mais especificamente foi aplicada a Programação Inteira Mista, pois algumas variáveis do problema assumem valor inteiro e outras assumem valor real.

Após a definição do modelo matemático usado para tratar as variáveis existentes dentro do contexto do problema é utilizado a ferramenta de otimização CPLEX [CPLEX 2009] para realização da implementação usando a linguagem de otimização OPL (Optimization Programming Language). Após coleta de dados extraídos das simulações e soluções encontradas no CPLEX, é utilizado o MATLAB [Guide 1998] para realizar a plotagem dos dados resultantes em gráficos condizentes.

Para otimização da trajetória de *drones* é aplicado a técnica de Programação Linear. Para cenários onde *drones* possuem baixa autonomia restante para vôo, é necessário

utilizar esta autonomia para sobrevôo e coleta de dados do máximo possível de sensores. Em alguns casos pode-se sobrevoar todos os sensores existentes em um campus inteligente, se a autonomia dos *drones* for utilizada otimizadamente.

Considere um conjunto de sensores $S = \{1, 2, ..., N\}$, estes sensores estão espalhados em um campus de forma aleatória, estabelecendo entre cada um desses sensores um arco de distância. O conjunto de arestas de distâncias entre os pontos de localização dos sensores é dado por $D = \{(1, 1), (1, 2), ..., (N - 1, N)\}$, onde os pares distância entre o mesmo sensor, por exemplo (1,1), é zero. A distância entre um par de sensores, por exemplo (1,2), é igual ao seu inverso (2,1). Este conjunto de arestas dá origem uma matriz de distâncias entre todos os sensores do conjunto S, que por sua vez gera um grafo completo bidirecional (Figura 2). Para fins de modelagem, o conjunto S possui o número de elementos igual a: Número de Sensores somado o Ponto Inicial. O grafo demonstra todas as possibilidades de percurso a ser sobrevoado por um *drone*, com finalidade de coletar dados em todos esses sensores. O *drone* que executa o vôo nessa trajetória possui autonomia limitada dada pela variável A. Os grafos não ilustram o tamanho das arestas real de acordo com os valores atribuídos a cada uma delas. As figuras apenas irão demonstrar a sequência de vértices visitados para cada conjunto de sensores e autonomia especificada.

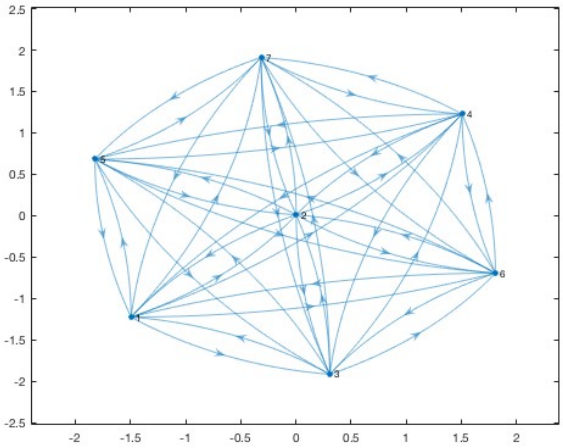

Figura 2. Grafo Completo Bidirecional

A partir da energia dada, em watt-hora, a autonomia é calculada pelo tempo restante $T = E \times P$, (P = Potência, em watt). Considerando uma velocidade constante V, em m/s, do *drone* se tem a distância máxima possível de ser sobrevoada, considerando a autonomia inicial, dada por $A = T \div V$. É importante frisar que para fins de simplificação não é considerada um outro vetor de localização que determinaria a altitude do drone num dado instante do percurso, bem como não são considerados outros fatores de influência na autonomia do *drone* como peso total do *drone*, empuxo líquido etc. Porém, para compreensão e solução de parte importante do problema as informações consideradas são suficientes para demonstração da otimização realizada e das simulações feitas.

Para cada uma das arestas que é computada como trajetória contida no percurso do vôo 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 $(i, j) \in D$. Esta variável de decisão é dada

em (1):

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in D \tag{1}$$

Num cenário onde se tenha num conjunto de sensores espalhados por determinada área, estes sensores servem 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 sensores possíveis. Dado um conjunto A de arestas percorridas, o número de sensores visitados é igual a $A-1$, pois a última aresta (i,j) é relativa a volta do *drone* para o Ponto Inicial $(1,1)$. O objetivo da otimização modelada é maximizar o número de sensores visitados dado pelo somatório de arestas percorridas. Este objetivo é demonstrado em (2):

$$MAXw = \left(\sum_{(i,j)\in D} X_{ij} \right) - 1 \tag{2}$$

Para atender o objetivo especificado têm-se várias restrições de comportamento na trajetória para se atender. O *drone* deve obrigatoriamente sair do Ponto Inicial e se dirigir para algum dos sensores somente uma vez. Para isso têm-se que o somatório das variáveis de decisão das arestas do Ponto Inicial para todos os N sensores deve ser igual a um, tal como demonstra em (3). Isso deve valer similarmente para o retorno ao Ponto Inicial, o somatório das variáveis de decisão também é um (4).

$$\sum_{(1,j)\in D} X_{1,j} = 1 \tag{3}$$

$$\sum_{(i,1)\in D} X_{i,1} = 1 \tag{4}$$

A restrição (5) 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 por que em cada sensor que o *drone* entre sobrevoando por cima, percorrendo a trajetória de chegada neste sensor, o *drone* deve para esse sensor percorrer a trajetória de saída.

$$\sum_{(i,h)\in D} X_{i,h} = \sum_{(h,j)\in D} X_{h,j}, \forall h \in S \tag{5}$$

Dado um subconjunto de sensores dentro do conjunto total, neste subconjunto o total de arestas percorridas deve ser igual o total de vértices (sensores), menos um, para que dessa forma não se feche uma sub trajetória dentro daquele conjunto de sensores (6). Esta restrição atua para evitar qualquer desperdício na autonomia restante do *drone* durante o vôo, uma vez que um sensor já tiver sido visitado não é necessário que se retorne a esse sensor.

$$\sum_{i\in R} \sum_{j\in R} X_{i,j} \leq |R| - 1, R \subset S, 2 \leq |R| \leq n \tag{6}$$

Para especificar que o *drone* não pode percorrer uma distância maior do que a autonomia que ele possui, deve-se multiplicar cada variável de decisão, zero ou um que seja, à distância daquela aresta, e o somatório de todas distâncias percorridas deve ser menor ou igual à autonomia total do *drone* (7).

$$\sum_{(i,j)\in D} D_{i,j} X_{i,j} \leq A \tag{7}$$

4. Avaliação

Foram simuladas dois conjuntos de sensores alocados, o primeiro com 6 sensores e o segundo com 14, cada conjunto com três instâncias de autonomias diferentes. Os sensores são alocados em uma área num raio de no máximo 100 metros de distância entre cada um dos sensores. As distâncias entre os sensores são estáticas, isto é, não mudam a cada vôo. 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 sensores. O Ponto Inicial é um local onde será guardado o *drone* e eventualmente pode-se efetuar recargas, preferencialmente no período onde não há vôos programados, por isso neste cenário é considerado vários vôos executados sequencialmente por exemplo num campus universitário ao longo de um período que não houveram recargas no VANT.

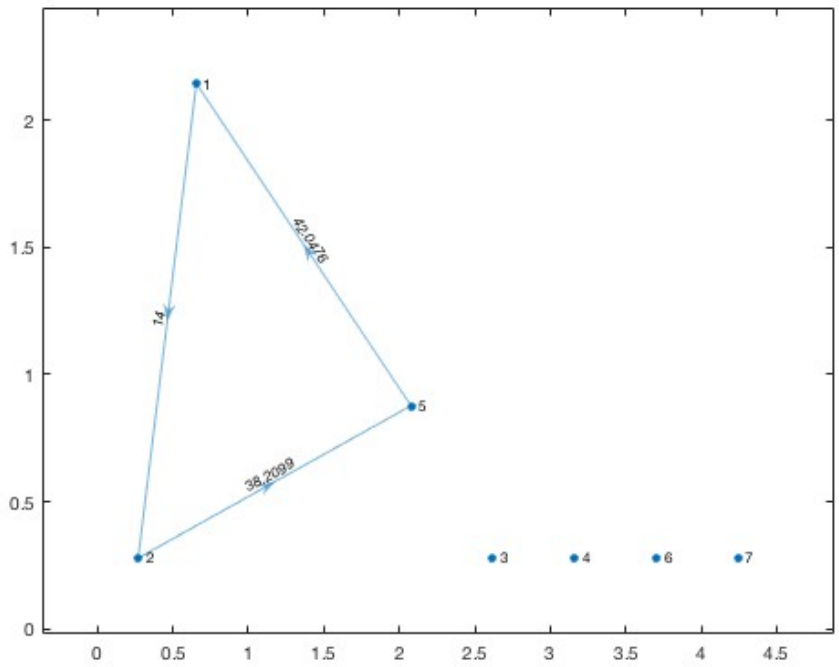

Figura 3. Trajetória gerada para o *drone* com autonomia de 150 metros

Na primeira instância (Figura 3) o *drone* tem uma autonomia total de 150 metros para ser percorrido, e considerando os 6 sensores alocados na área, o *drone* só consegue visitar 2 sensores, fazendo o percurso de três arestas para visitar estes sensores, sendo

eles: (1,5), (5,2) e (2,1). A distância total percorrida pelo *drone* é de 94,24 metros portanto restante 55,76 metros de autonomia que ainda pode ser percorridos pelo *drone*, porém não podem ser aproveitados pelo *drone* por que não seria suficiente para visitar mais sensores considerando não somente a distância para chegada no sensor como também a distância de volta até o ponto inicial. As distâncias entre os sensores utilizada na primeira instância é a mesma entre todas as demais instâncias simuladas dentro deste conjunto de sensores, mas as distâncias são diferentes no outro conjunto de sensores. Nos grafos ilustrados nas figuras é mostrado a sequência de pontos visitados porém não é marcada a localização geográfica dos pontos.

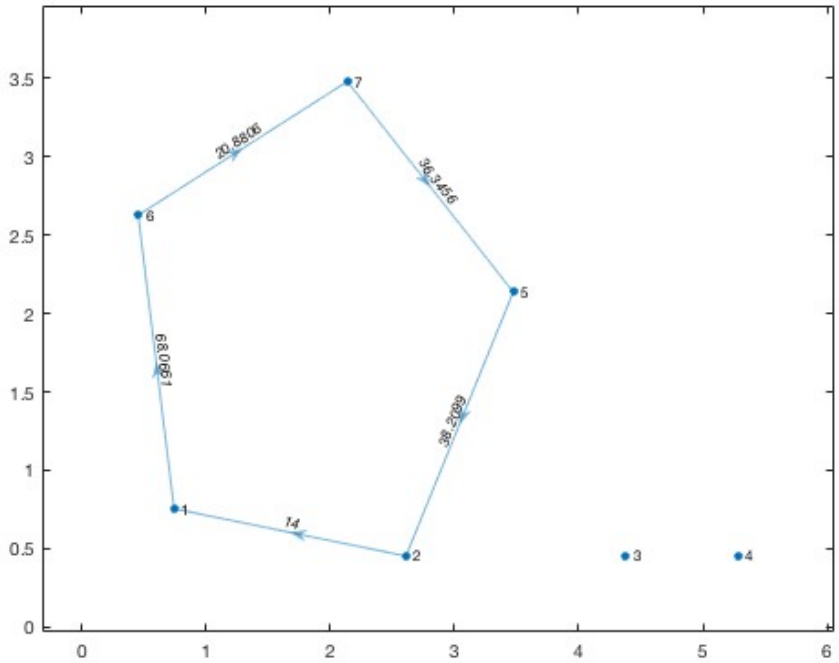

Figura 4. Trajetória gerada para o *drone* com autonomia de 200 metros

Quanto à segunda instância (Figura 4) analisada foi atribuído uma autonomia total do *drone* de 200 metros. Fazendo um aproveitamento desses 200 metros para o total de sensores alocados, o maior número possível de sensores visitados foi 4. O total da distância sobrevoada é de 125,28 metros com restante de autonomia de 74,72 metros. Veja que apesar da autonomia restante parecer alta a otimização realizada concentra-se na quantidade de sensores visitados, por isso é certo que independente da quantidade de autonomia restante o número de sensores visitados é o máximo que se conseguiria sobrevoar com a autonomia considerada. É possível que haja várias instâncias de distâncias totais percorridas para a mesma quantidade de sensores alcançadas com a autonomia limitada.

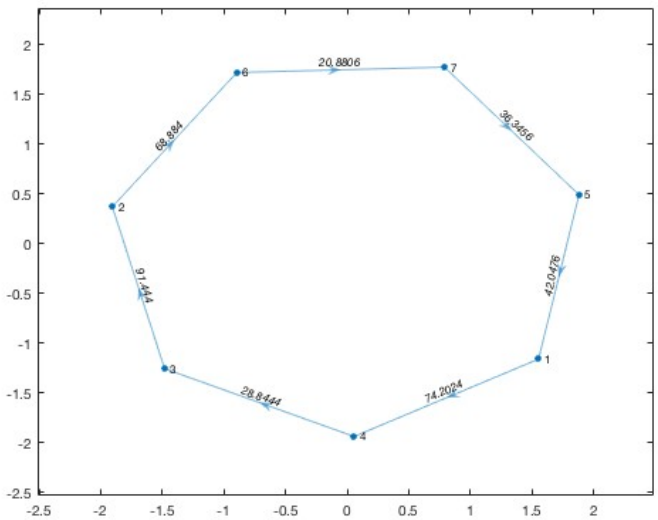

Figura 5. Trajetória gerada para o *drone* com autonomia de 500 metros

Uma terceira e última instância de autonomia é analisada, atribuindo 500 metros de autonomia para o *drone* (Figura 5). Para essa instância o *drone* consegue sobrevoar todos os 6 nós de sensores dentro da alocação estabelecida. Para efetuar toda essa trajetória ele gasta 362,62 metros de autonomia com restante de 137,38 metros. Nota-se que com apenas um pouco mais de carga no *drone*, já seria possível efetuar a trajetória da primeira instância. É importante enfatizar que não se pode afirmar que 362,62 metros é o mínimo de autonomia que o *drone* deve ter para sobrevoar todos os sensores. Por que as restrições não garantem que ele sobrevoe o mínimo de distância para sobrevoar o máximo de sensores. Essa distância mínima não é garantida pelo modelo de otimização proposto.

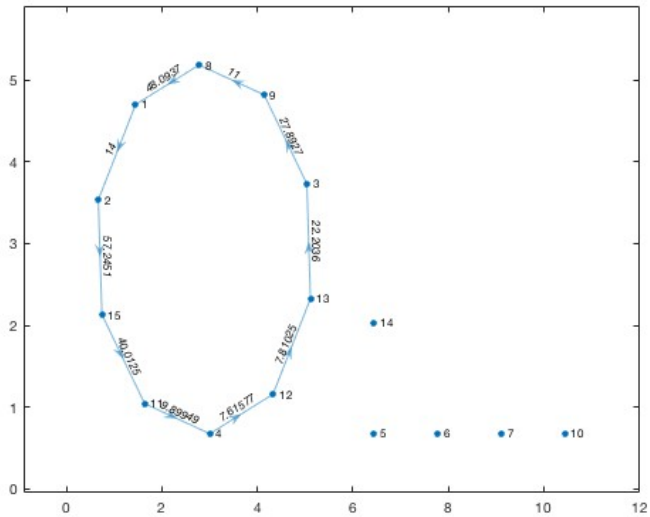

Figura 6. Trajetória possível para 15 sensores alocados e autonomia de 250 metros para o *drone*

Também é simulado um campus onde haja 14 sensores alocados, ou seja, mais que o dobro de sensores nos testes realizados no cenário anterior. Para este conjunto de sensores é executado três instâncias de testes. Na primeira instância, (Figura 6) para uma autonomia de 250 metros encontrada no VANT é percorrida a distância de 245,63 metros, e consegue-se sobrevoar 9 sensores, sem contar o Ponto Inicial de onde parte o *drone*. Na segunda instância (Figura 7) é alocada uma autonomia de 350 metros para o veículo, que assim percorre uma distância de 348,73 metros para se atingir 13 sensores. Quanto a terceira e última instância (Figura 8) com autonomia de 450 metros, são sobrevoados todos os 14 sensores e é percorrido 448.38 metros para chegar a este fim.

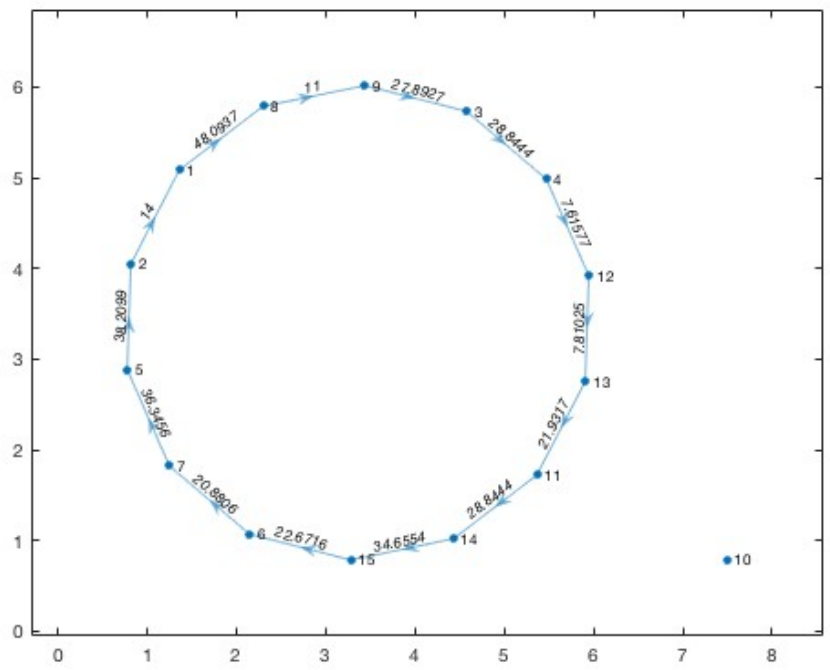

Figura 7. Trajetória possível para 15 sensores alocados e autonomia de 350 metros para o *drone*

Algo que pode ser destacado quanto a essas simulações se refere ao grande aproveitamento das autonomias encontradas no VANT, fazendo com que a autonomia restante seja muito pouca. Considerando que o limite de distância entre os sensores é o mesmo usado no conjunto anterior alocado (100 metros) nota-se que uma densidade maior de sensores num dado espaço é encontrado, e por isso há um maior aproveitamento das rotas, pois é possível fazer dentro dos mesmos deslocamentos referentes ao conjunto de sensores anteriores porém visitando um maior número de sensores.

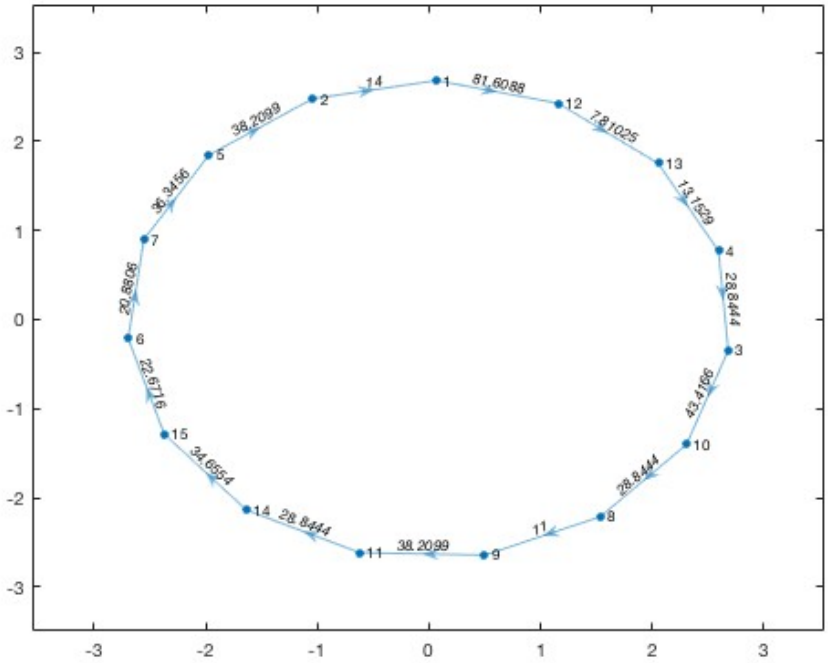

Figura 8. Trajetória possível para 15 sensores alocados e autonomia de 450 metros para o *drone*

5. Conclusão

Propomos neste trabalho uma modelagem de otimização combinatória muito semelhante ao problema de roteirização de veículo, porém, várias especificidades são adequadas neste cenário com um *drone* sobrevoando sensores IoT alocados numa determinada área. O modelo proposto visou atingir, com um drone de autonomia limitada, o máximo de visitas nos nós de sensores alocados. Este modelo foi elaborado considerando algumas simplificações quanto ao padrão de consumo dos *drones*, ignorando peso total do *drone* bem como o empuxo, fatores que deveriam ser considerados e podem ser agregados nos modelos de trabalhos futuros.

Outra simplificação empregada foi em relação a altitude do *drone* durante o sobrevôo. Esta localização do *drone* em três dimensões propiciaria um acompanhamento do VANT de forma que poderia ser calculado precisamente a distância do *drone* para o sensor e com isso determinar quais os alcances possíveis dentro das tecnologias de comunicação utilizadas entre o *drone* e os sensores. O trabalho se preocupou em delimitar algumas variáveis dentro deste contexto de uso dos *drones* como gateway de comunicação, ou mula de dados, e com essas variáveis obteve sucesso no objetivo do modelo e conquistou um terreno importante para tratamento deste tipo de problema de trajetória de *drones*.

Para trabalhos futuros, pretendemos agregar essas outras variáveis e simular utilizando as tecnologias de redes sem fio possíveis dentro da comunicação *drone* e sensor, também espera-se alocar os sensores usando coordenadas geográficas podendo calcular as distâncias num dado espaço geográfico real. Dessa forma pode-se comparar as simulações com um teste envolvendo drones reais.

Referências

CPLEX, I. I. (2009). V12. 1: User's manual for cplex. *International Business Machines Corporation*, 46(53):157.

Guide, M. U. (1998). The mathworks. *Inc., Natick, MA*, 5:333.

Jiang, F. and Swindlehurst, A. L. (2012). Optimization of uav heading for the ground-to-air uplink. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(5):993–1005.

Kirichek, R. (2016). The model of data delivery from the wireless body area network to the cloud server with the use of unmanned aerial vehicles. In *ECMS*, pages 603–606.

MCTIC (2017). Plano nacional de iot. http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/salaImprensa/noticias/?titulo=IoT. Data acesso: Julho 2018.

Menouar, H., Guvenc, I., Akkaya, K., Uluagac, A. S., Kadri, A., and Tuncer, A. (2017). Uav-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(3):22–28.

Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., and Debbah, M. (2016a). Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage. *IEEE Communications Letters*, 20(8):1647–1650.

Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., and Debbah, M. (2016b). Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(6):3949–3963.

Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., and Debbah, M. (2017). Mobile unmanned aerial vehicles (uavs) for energy-efficient internet of things communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(11):7574–7589.

Ouahouah, S., Taleb, T., Song, J., and Benzaid, C. (2017). Efficient offloading mechanism for uavs-based value added services. In *Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE.

Seiber, C., Nowlin, D., Landowski, B., and Tolentino, M. E. (2018). Tracking hazardous aerial plumes using iot-enabled drone swarms. In *Internet of Things (WF-IoT), 2018 IEEE 4th World Forum on*, pages 377–382. IEEE.

Snow (2014). Why drones are the future of the internet of things? http://droneanalyst.com/2014/12/01/drones-are-the-future-of-iot/. Data acesso: Julho 2018.

Stankovic, J. A. (2014). Research directions for the internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1):3–9.

Vermesan, O. and Friess, P. (2013). *Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems*. River Publishers.

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., and Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, 1(1):22–32.

Zeng, Y., Zhang, R., and Lim, T. J. (2016). Throughput maximization for uav-enabled mobile relaying systems. *IEEE Transactions on Communications*, 64(12):4983–4996.