

Mestrado em
MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO
ECONÓMICA E EMPRESARIAL

Trabalho Final de Mestrado

Relatório de Estágio

MODELOS MATEMÁTICOS PARA O PROBLEMA
DE INSPEÇÃO DE LINHAS ELÉTRICAS

ALEXANDRE ALHO BARROS

Orientado por:

PROFESSORA DOUTORA RAQUEL MONTEIRO DE NOBRE COSTA
BERNARDINO

ENGENHEIRO ANDRÉ FILIPE JESUS COSTA NUNES COELHO

Documento especialmente elaborado para a obtenção do grau de mestre

JUNHO 2026

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora, a professora Raquel Bernardino que, com o seu conhecimento, me guiou e orientou neste grande desafio, o que fez garantir a qualidade deste trabalho.

De igual forma, devo agradecer à coordenadora do mestrado, a professora Cândida Mourão, que também teve um impacto significativo neste estudo.

Do lado da EDP Labelec agradeço ao meu orientador, Engenheiro André Coelho que, com a sua experiência no setor e conhecimento mais técnico contribuiu imenso para o presente relatório e, ainda, ao colega Samuel Marques que foi um grande auxílio na componente mais técnica da empresa.

Apesar de última, é a mais importante: toda a minha família. A todos vós deixo o meu sincero obrigado, com especial ênfase aos meus pais, por me apoiarem incondicionalmente e sempre que necessário, e à minha namorada, que diariamente me deu força para conseguir terminar esta etapa.

A todos os que contribuíram para a minha resiliência diária e que me apoiaram ao longo dos anos, o meu muito obrigado.

Resumo

A crescente utilização de drones na inspeção das linhas elétricas tem vindo a transformar a forma como estas são realizadas. Na EDP Labelec a adoção de drones tem tido, cada vez mais, um maior peso. Contudo, estas operações são realizadas em regime VLOS (*Visual Line of Sight*), em que o drone tem de permanecer no campo de visão do seu operador, algo que condiciona o seu alcance operacional e afeta diretamente o planeamento das rotas de inspeção.

A possibilidade de realizar estas operações em regime BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*), em que não é necessário que o drone permaneça no campo de visão do seu operador, permite que o drone percorra distâncias significativamente superiores. Associado a esta alteração, surge a hipótese de poderem ser realizadas múltiplas rotas a partir de um mesmo ponto de paragem terrestre.

Neste contexto é proposto um modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o Problema de Inspeção de Linhas Elétricas com Drones (PILED), no qual se permite a realização de múltiplas rotas do drone, partindo de um mesmo ponto de paragem. O modelo determina as rotas do drone e do veículo de apoio terrestre, garantindo que os segmentos da rede elétrica são inspecionados e respeitando as restrições operacionais do drone.

Este modelo foi implementado em Python e resolvido utilizando o *solver* Gurobi, sendo os testes computacionais realizados sobre diferentes conjuntos de instâncias reais, o que permitiu comparar o desempenho de diferentes modelos de drones, caracterizados por diferentes valores de autonomia e alcance, bem como a influência do número máximo de rotas permitido por cada ponto de paragem.

Os resultados obtidos evidenciam que a possibilidade em realizar múltiplas rotas, a partir do mesmo ponto pode contribuir para a redução do tempo total da inspeção.

Palavras-chave: Inspeção das Linhas Elétricas com Drones, Programação Linear Inteira Mista, Regime BVLOS, Regime VLOS

Abstract

The increasing use of drones in power line inspections has led to a transformation in how these inspections are carried out. At EDP Labellec, the adoption of drones has become increasingly important. However, these operations are performed in VLOS (Visual Line of Sight) mode, where the drone must remain within the operator's field of vision, which limits its operational range and directly affects the planning of inspection routes.

The possibility of performing these operations in BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) mode, where the drone does not need to remain within the operator's field of vision, allows the drone to travel significantly greater distances. Associated with this modification comes the possibility of performing several routes from the same ground stopping point.

In this context, a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model is proposed for the Line Inspection Problem with Drones (PILED), which allows for multiple drone routes from the same stopping point. The model determines the routes of the drone and of the ground support vehicle, ensuring the power grid segments are inspected and respecting the drone's operational restrictions.

This model was implemented in Python and solved using the Gurobi *solver*, with computational tests applied on different sets of real-world instances, which allowed comparing the performance of different models of drones, characterized by different autonomy and range values, as well as the influence of the maximum number of routes allowed for each stopping point.

The results obtained show that the possibility of performing multiple routes from the same point can contribute to reducing the total inspection time.

Keywords: Power Line Inspection with Drones, Mixed Integer Linear Programming, BVLOS Mode, VLOS Mode

Índice

CAPÍTULO 1 • INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 • REVISÃO DE LITERATURA	3
CAPÍTULO 3 • DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	5
CAPÍTULO 4 • METODOLOGIA.....	9
CAPÍTULO 5 • RECOLHA DE DADOS E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS.....	13
5.1. RECOLHA E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	13
5.2. PARAMETRIZAÇÃO.....	15
5.3. CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS E TEMPOS	16
CAPÍTULO 6 • RESULTADOS.....	18
6.1. VLOS <i>VERSUS</i> BVLOS	18
6.2. TESTE A K_{MAX}	19
6.3. INSTÂNCIA REAL	21
CAPÍTULO 7 • CONCLUSÃO.....	23
BIBLIOGRAFIA.....	25

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Exemplo de instância do PILED	7
Figura 3.2 - Possível solução admissível da instância apresentada na Figura 3.1.....	7
Figura 5.1 - Representação espacial da rede elétrica referente ao conjunto de instâncias B.....	14
Figura 6.1 - Relação entre o comprimento da instância e a redução percentual do tempo de inspeção.....	19

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Conjuntos utilizados para a formulação do PILED.....	6
Tabela 5.1 - Características das instâncias dos dois conjuntos.....	14
Tabela 5.2 - Valores dos parâmetros dos drones.....	16
Tabela 5.3 - Valores dos parâmetros gerais do modelo	16
Tabela 6.1 - Resultados VLOS versus BVLOS.....	18
Tabela 6.2 - Resultados do teste a $K_{\max}$	20

Glossário

ALNS (<i>Adaptive Large Neighborhood Search</i>).....	3
ANAC (Autoridade Nacional da Aviação Civil).....	14
ARP (<i>Arc Routing Problem</i>)	3, 4
BVLOS (<i>Beyond Visual Line of Sight</i>).....	ii, iii, 1, 4, 5, 13, 14, 15
DT-ARP (<i>Drone-Truck Arc Routing Problem</i>).....	3
LCK-DRPP (<i>Length Constrained K-Drones Rural Postman Problem</i>).....	3
LiDAR (<i>Light Detection and Ranging</i>).....	1
MM-MT-dLARP (<i>Min Max Multi-Trip drone Location Arc Routing Problem</i>)	4
PILED (Problema de Inspeção de Linhas Elétricas)	ii, iii, 4, 5, 6, 9
PLIM (Programação Linear Inteira Mista).....	ii, iii, 4, 5, 9
RGB (<i>Red, Green and Blue</i>).....	1
VLOS (<i>Visual Line of Sight</i>)	ii, iii, 1, 13
VTOL (<i>Vertical Take-Off and Landing</i>)	ii, iii, 14, 15

Capítulo 1 • Introdução

A EDP Labelec inspeciona anualmente cerca de 23 000 quilómetros de linhas de alta e média tensão, sendo mais de 50% das inspeções realizadas por drones, substituindo patrulhas a pé e missões de helicóptero, inicialmente limitadas pela pouca estabilidade das imagens recolhidas (Coelho et al., 2025).

Historicamente, esta operação começou com inspeções a pé nos anos 80 do século XX, um método laborioso e de alcance limitado. Evoluiu para o uso de helicópteros em 1994, que permitiram uma cobertura mais ampla, ou seja, uma maior área abrangida, bem como a introdução de gimbais, que possibilitaram a estabilização da câmara, em 1996, e incorporou a tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*)¹ a partir de 2007, permitindo uma avaliação mais precisa das distâncias de segurança entre a vegetação e as linhas elétricas. Em 2014, a EDP Labelec desenvolveu os seus próprios drones para inspeção de linhas e, a partir de 2018, passou a utilizar drones industriais avançados, operando sempre em regime VLOS (*Visual Line of Sight*), um regime de voo que apenas permite ao operador controlar o drone enquanto o mantém em linha de vista.

O processo atual da inspeção das linhas elétricas segue três fases: recolha de dados; processamento dos dados; e criação de produtos de valor acrescentado. Na recolha são usados: sensores RGB (*Red, Green and Blue*), para obter imagens de alta resolução; sensores infravermelhos, para detetar sobreaquecimento; e sensores LiDAR, de forma a criar nuvens de pontos tridimensionais. Estes últimos precisam ser recolhidos separadamente dos dois primeiros. O processamento aplica algoritmos para identificar defeitos estruturais, anomalias térmicas e a proximidade da vegetação às linhas, integrando as diferentes fontes de dados referidas anteriormente. Os resultados desta análise são, depois, organizados em relatórios detalhados e recomendações de priorização de manutenção (Coelho et al., 2025).

Entre 2022 e 2024, a inspeção utilizando drones passou de mil quilómetros para 13 mil quilómetros, enquanto a inspeção utilizando helicópteros caiu de 24 mil quilómetros para nove mil quilómetros, totalizando 22 mil quilómetros em 2024. A digitalização reduziu tempos de processamento e aumentou a precisão e eficácia das inspeções, embora a operação com drones ainda enfrente restrições regulatórias que limitam a sua utilização a operações em regime VLOS. Por consequência, a área que pode ser inspecionada por cada equipa é reduzida, exigindo equipas adicionais, ou um maior tempo de operação, para inspecionar o mesmo número de linhas que um helicóptero.

Com isto, surge a possibilidade de integrar operações com drones em regime BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*), algo que até então não foi integrado na EDP Labelec devido à existência de restrições regulatórias. Neste regime de operação o controlo do drone não depende da manutenção de contacto visual direto entre o operador e o drone, possibilitando atingir maiores distâncias do que as permitidas em regime VLOS, independentemente da existência de obstáculos visuais entre os dois.

A possibilidade de operar em regime BVLOS cria novos desafios de planeamento, já que aumenta, significativamente, a área alcançada por cada lançamento do drone, alterando a forma como as rotas de inspeção podem ser organizadas.

¹ Tecnologia de laser que permite gerar nuvens de pontos tridimensionais do terreno e dos elementos circundantes, através da medição do tempo de retorno dos pulsos emitidos.

Neste contexto, torna-se pertinente estudar de que forma podem ser coordenados o drone e o veículo de apoio, de forma a minimizar o tempo total necessário para a inspeção das linhas elétricas, considerando a operação com regime BVLOS.

Para responder a este desafio, neste trabalho será proposta uma extensão do Problema de Inspeção de Linhas Elétricas com Drones (PILED), formulada através de um modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), que permite a realização de múltiplas rotas do drone a partir de um mesmo ponto de paragem do veículo de apoio.

Adicionalmente, pretende-se analisar o impacto da utilização de drones em regime BVLOS na inspeção de linhas elétricas, comparando os resultados obtidos com os do atual regime VLOS, bem como estudar a influência do número máximo de rotas permitidas por cada ponto de paragem nas soluções geradas pelo modelo.

O presente documento encontra-se organizado em sete capítulos. O capítulo um corresponde à presente introdução. No capítulo dois é apresentada uma revisão da literatura relevante para o problema em estudo. O capítulo três descreve o problema considerado, enquanto que no capítulo quatro é apresentada a formulação matemática proposta. No capítulo cinco, dividido em três subcapítulos, são apresentados os dados utilizados e o processo de construção das instâncias, bem como a forma de recolha e cálculo dos valores dos parâmetros a utilizar no modelo. No capítulo seis, também dividido em três subcapítulos, são apresentadas as diferentes análises realizadas a partir das soluções obtidas pelo modelo. Por fim, o capítulo sete apresenta as principais conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2 • Revisão de Literatura

A existência de drones para uso em operações de inspeção tem vindo a ganhar cada vez mais relevância em vários setores, especialmente quando as infraestruturas a controlar são extensas. No caso das linhas elétricas, a inspeção consiste em garantir que os segmentos da rede são observados e não apenas em visitar pontos isolados da rede. Esta característica aproxima a componente de inspeção das linhas elétricas, do Problema de Roteamento nos Arcos (*Arc Routing Problem*, ARP), cujo objetivo é servir os segmentos da rede e não apenas os seus nodos.

Nos ARP clássicos, os veículos servem um conjunto de arcos através de uma rede rodoviária. No entanto, a introdução de drones altera esta ideia, visto que estes se irão deslocar para fora da rede rodoviária. Campbell et al. (2021), com o Problema do Carteiro Rural com K-Drones e Restrição de Comprimento (*Length Constrained K-Drones Rural Postman Problem*, LCK-DRPP) destacam esta diferença: nos ARP com drones, os drones podem entrar e sair de uma linha em qualquer dos infinitos pontos que a ela pertencem, e não apenas nos seus extremos. Para colmatar esta dificuldade, os autores discretizam as linhas ao criar um número finito de pontos, dividindo as linhas em vários segmentos, permitindo que o drone apenas entre e saia nesses pontos.

A autonomia dos drones constitui outra questão central nestes problemas. No seu estudo, Campbell et al. (2021) tratam de drones que devem inspecionar um conjunto de linhas, estando cada rota sujeita a um limite máximo de comprimento, devido à autonomia dos drones e, por isso, esse estudo é relevante no contexto do presente trabalho, pois evidencia que quando a rede a inspecionar é extensa, a autonomia dos drones pode afetar a forma como os segmentos a inspecionar são distribuídos em diferentes rotas.

Outro trabalho que constitui uma importante referência na literatura é o Problema de Roteamento de Veículos com Drones (*Vehicle Routing Problem with Drones*) estudado por Sacramento et al. (2019). Neste estudo, os autores modelam operações de distribuição em que uma carrinha e um drone trabalham de forma coordenada, tornando clara a necessidade de sincronizar as rotas aéreas com as rotas do veículo terrestre através de decisões de lançamento e recolha do drone e de restrições de tempo que garantem que, após o drone ser lançado e realizar a sua rota ao visitar os clientes que lhe foram atribuídos, este se reencontra com a carrinha num ponto e instante compatíveis. Esta coordenação é, também, relevante em problemas de inspeção de infraestruturas, onde as decisões relativas às rotas do drone dependem dos pontos de paragem terrestres.

A coordenação entre drones e veículos terrestres foi aprofundada por Amorosi et al. (2021), que analisam um problema que envolve um veículo de apoio que funciona como uma base móvel para o drone. Neste contexto, o veículo de apoio transporta o drone entre diferentes localizações e posiciona-se em pontos a partir dos quais o drone é lançado para realizar uma missão aérea. Apesar do contexto não ser especificamente o da inspeção de linhas elétricas, o referido estudo continua a ser relevante, por explorar a coordenação entre um veículo e um drone.

Liu et al. (2025) apresentam o Problema de Roteamento nos Arcos com Drone e Carrinha (*Drone-Truck Arc Routing Problem*, DT-ARP) que está mais relacionado com o presente estudo. Neste problema existe uma carrinha e múltiplos drones, que colaboram entre si para servir os segmentos necessários. Enquanto a carrinha está limitada à rede rodoviária, os drones podem deslocar-se para fora dessa rede, estando apenas sujeitos a restrições de alcance associados à bateria. A coordenação entre as duas rotas – terrestre e aérea – é particularmente desafiante, segundo os autores, uma vez que os drones são lançados e posteriormente recolhidos pela carrinha num mesmo ponto de paragem, pelo que os pontos de lançamento e recolha dos drones dependem da posição da carrinha. Os autores recorrem, ainda, à Pesquisa Adaptativa em Grandes Vizinhanças (*Adaptive Large Neighborhood Search*, ALNS), uma metaheurística, de modo a possibilitar a resolução de instâncias de maior dimensão.

Outro trabalho especialmente relevante é o Problema Min-Max de Localização e Roteamento nos Arcos com Drone de Múltiplas Rotas (*Min Max Multi-Trip Drone Location Arc Routing Problem*, MM-MT-dLARP) de Corberán et al. (2025), onde veículos terrestres transportam os drones até aos pontos de lançamento selecionados, a partir dos quais os drones podem realizar várias rotas, sendo o objetivo minimizar o tempo necessário para concluir o serviço. Este estudo é particularmente próximo do presente trabalho, pois combina decisões de localização, roteamento nos arcos, veículos terrestres de apoio e múltiplas rotas do drone. Contudo, ao contrário do problema do presente estudo, os autores não determinam a rota do veículo terrestre, considerando apenas os pontos de lançamento utilizados pelos drones.

No contexto específico do presente estudo – inspeção de linhas elétricas – Pereira (2025) propôs o PILED, formulando-o como um ARP resolvido através de PLIM. Este modelo tem em conta a coordenação entre o drone e o veículo de apoio, garantindo que os segmentos da rede elétrica são inspecionados e que as restrições operacionais do drone são cumpridas, nomeadamente a autonomia e o alcance. No entanto, esse estudo assume que cada ponto de paragem do veículo origina apenas uma rota do drone.

Com a possibilidade de realizar operações em regime BVLOS, esta hipótese é alterada, uma vez que quando o alcance operacional do drone aumenta, faz sentido que uma mesma localização terrestre possa permitir o acesso a uma área mais extensa da rede. Por isso, a autonomia poderá tornar-se mais limitativa do que o alcance, tornando plausível a realização de várias rotas a partir do mesmo ponto de paragem.

Assim, apesar de existirem estudos que refletem ARP's com drones, coordenação entre veículos terrestres e drones, e operações com múltiplas rotas, existe, ainda, espaço para adaptar estas ideias ao contexto específico do PILED, em regime BVLOS. Por isso, o presente trabalho contribui para essa linha de investigação ao estender o modelo proposto por Pereira (2025), permitindo a realização de múltiplas rotas do drone a partir de um mesmo ponto de paragem do veículo de apoio.

Capítulo 3 • Definição do Problema

O aumento do alcance operacional proporcionado pelo regime BVLOS altera significativamente a forma como o drone pode ser utilizado no terreno. Ao permitir que o drone percorra distâncias superiores, a área de cobertura potencial pode exceder aquela que a autonomia do drone possibilita, pelo que se torna plausível realizar mais do que uma rota aérea a partir do mesmo ponto de paragem do veículo terrestre. Assim, assumir que cada ponto de paragem origina uma única rota de voo do drone, tal como foi realizado por Pereira (2025), deixa de ser razoável, pois será, possivelmente, mais eficiente que o drone realize múltiplas rotas a partir do mesmo ponto de paragem.

Neste contexto, o operador não se encontra parado num único local ao longo de toda a operação, deslocando-se entre diferentes pontos de paragem através de um veículo terrestre, responsável pelo transporte do drone e pelo acesso aos diferentes pontos de paragem estratégicos com o intuito de lançar o drone e posteriormente recolhê-lo nesse mesmo ponto de onde foi lançado, uma vez que o operador apenas prossegue para o ponto seguinte após recuperar o drone. Por isso, o operador permanece no mesmo local enquanto o drone é lançado e apenas segue para o próximo ponto após o drone ser recolhido. Logo, o problema envolve tanto o planeamento das rotas aéreas, como o da rota terrestre.

Assim, o planeamento das rotas aéreas e terrestres deve assegurar a cobertura total das linhas elétricas, isto é, a inspeção de todos os segmentos da rede que requerem inspeção. As rotas aéreas devem respeitar os limites de alcance e autonomia do drone, enquanto o percurso terrestre deve possibilitar o acesso da viatura aos pontos de paragem selecionados para o lançamento e recolha do drone. Além disto, deve ser possível que o drone realize múltiplas rotas a partir de um mesmo ponto de paragem. Para resolver este problema, será desenvolvido um modelo em PLIM que irá gerar as rotas ótimas tanto do drone, como do veículo de apoio, minimizando o tempo total de inspeção.

De modo a definir o problema, será necessário utilizar uma série de conjuntos e parâmetros, que se encontram descritos de seguida.

O conjunto P representa os possíveis pontos de paragem terrestres, o qual contém, ainda, um depósito fictício, representado por 0, que é incluído tendo em vista a simplificação da formulação do problema em PLIM. O conjunto S inclui as arestas de serviço, ou seja, os segmentos da rede elétrica que necessitam de inspeção. Os pontos extremos desses segmentos formam o conjunto P_s , definido como $P_s = \{i: \{i, j\} \in S\}$.

O conjunto A_p é formado pelos arcos terrestres que podem ser atravessados pelo veículo de apoio, definidos pelas ligações entre quaisquer dois pontos de paragem pertencentes a P e, por isso, será definido como $A_p = \{(i, j): i, j \in P, i \neq j\}$. Já o conjunto A_s representa os arcos aéreos que podem ser percorridos pelo drone, definidos pelas ligações entre qualquer par de nodos da rede, desde que, no máximo, um dos nodos pertença ao conjunto P , ou seja, desde que não seja um arco terrestre de A_p , i.e. $A_s = \{(i, j): i, j \in P \cup P_s, i \neq j\} \setminus A_p$.

Adicionalmente, define-se K_{max} como o número máximo de rotas aéreas que o drone pode realizar, a partir de cada ponto de paragem. A introdução deste parâmetro permite representar situações em que, por motivos operacionais, o drone pode efetuar várias rotas a partir do mesmo ponto de paragem, sendo esse número, no entanto, limitado por restrições como a gestão das baterias ou o planeamento operacional definido pelo operador. Para simplificar a apresentação do modelo, define-se: $K = \{1, \dots, K_{max}\}$.

Com base na descrição apresentada, o PILED pode ser modelado num grafo orientado definido como: $G = (V, A)$, no qual o conjunto de nodos V é igual a $P \cup P_s$ e o conjunto de arcos A a $A_p \cup A_s$.

A autonomia do drone é α (unidades de tempo), enquanto β é a distância máxima a que o drone pode estar do seu comando remoto, em unidades de distância. A distância associada a cada arco $(i, j) \in A_s \cup A_p$, seja terrestre ou aéreo, será representada por d_{ij} , em unidades de distância, sendo t_{ij} o respetivo tempo de percurso, em unidades de tempo. Por fim, o parâmetro c representará o tempo total necessário para a preparação e posterior recolha do drone após cada lançamento do mesmo, ou seja, será a soma dos tempos de *set-up* e de *set-down*.

Os conjuntos que designam a rede, bem como os parâmetros do problema, que serão usados na formulação matemática, encontram-se sintetizados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Conjuntos utilizados para a formulação do PILED

Conjuntos/Parâmetros	Definição	Elemento associado
P	Conjunto de pontos de paragem, incluindo o depósito fictício 0	Veículo terrestre e drone
S	Conjunto dos segmentos a inspecionar	Drone
$P_s = \{i: \{i, j\} \in S\}$	Conjunto dos pontos extremos dos segmentos a inspecionar (S)	Drone
$V = P \cup P_s$	Conjunto de todos os vértices da rede	Veículo terrestre e drone
$A_p = \{(i, j): i, j \in P, i \neq j\}$	Arcos terrestres	Veículo terrestre
$A_s = \{(i, j): i, j \in P \cup P_s, i \neq j\} \setminus A_p$	Arcos aéreos	Drone
$A = A_s \cup A_p$	Conjunto de todos os arcos da rede	Veículo terrestre e drone
K_{max}	Número máximo de rotas que o drone pode realizar, a partir de cada ponto de paragem	Drone
α	Autonomia do drone (em unidades de tempo)	Drone
β	Alcance máximo do drone (em unidades de distância)	Drone
d_{ij}	Distância do arco $(i, j) \in A$ (em unidades de distância)	Veículo terrestre e drone
t_{ij}	Tempo para percorrer o arco $(i, j) \in A$ (em unidades de tempo)	Veículo terrestre e drone
c	Tempo de <i>set-up</i> + tempo de <i>set-down</i> (em unidades de tempo)	Drone

A Figura 3.1 ilustra um exemplo de uma instância do PILED, permitindo evidenciar os principais elementos da rede operacional que se assemelham à estrutura de rede apresentada por Pereira (2025).

Este exemplo tem: três possíveis pontos de paragem, aos quais soma o depósito fictício para formar o conjunto $P = \{0, 1, 2, 3\}$, representados pelos triângulos azuis; 12 arcos terrestres A_p , representados pelas setas azuis; sete segmentos a inspecionar, que correspondem ao conjunto $S = \{\{101, 102\}, \{102, 103\}, \{102, 105\}, \{104, 105\}, \{105, 106\}, \{106, 107\}, \{108, 109\}\}$, que estão representados pelos traços verdes; nove pontos extremos dos segmentos a inspecionar, que

formam o conjunto $P_s = \{101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109\}$, simbolizados pelos círculos verdes; e 126 arcos aéreos A_s , representados pelas setas cinzentas, que não são apresentados na totalidade, com o objetivo de não tornar complexa a apresentação visual da instância.

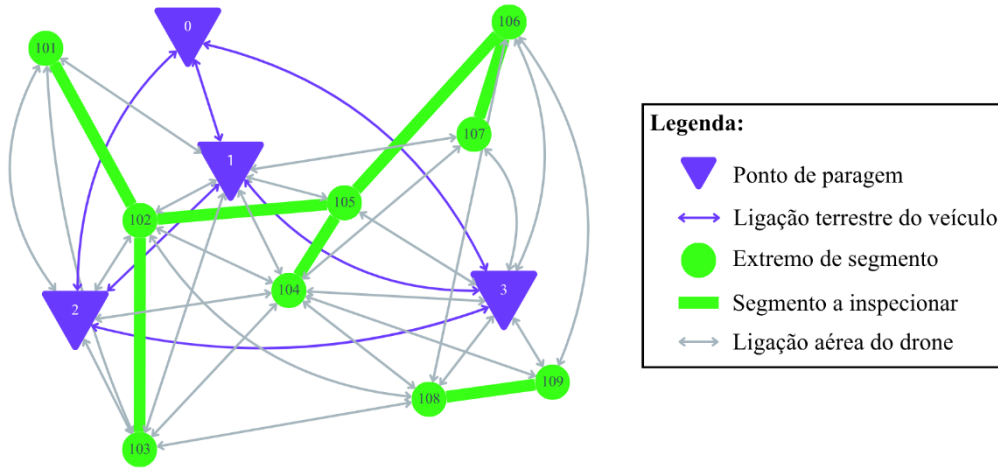


Figura 3.1 - Exemplo de instância do PILED

Na [Figura 3.2](#) é ilustrada uma solução admissível da instância apresentada na [Figura 3.1](#), assumindo que o alcance e a autonomia do drone são respeitados.

Surgem, agora, os elementos associados a esta solução admissível: os triângulos a lilás representam os pontos de paragem do conjunto P efetivamente selecionados na rota; as setas a lilás correspondem aos arcos de A_p escolhidos para o percurso do veículo de apoio; por sua vez, as setas a laranja representam os arcos de A_s selecionados nas diferentes rotas do drone, para realizar a inspeção dos segmentos do conjunto S .

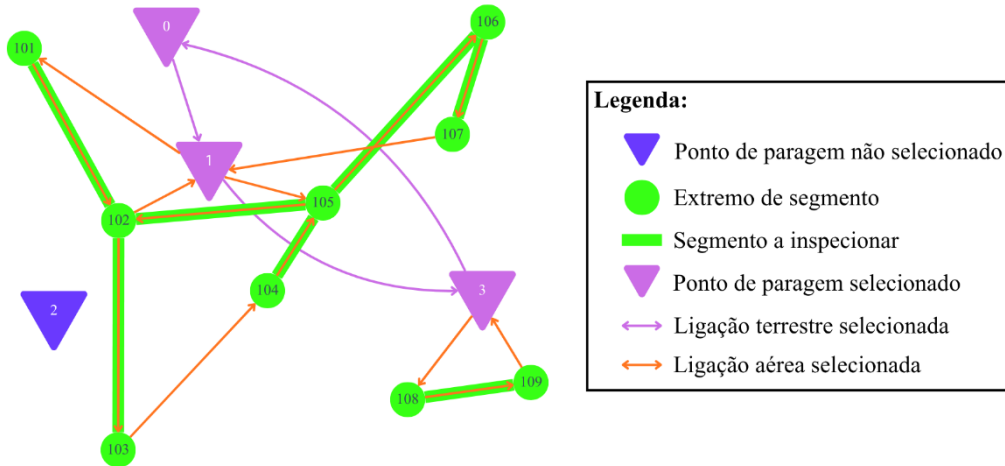


Figura 3.2 - Possível solução admissível da instância apresentada na Figura 3.1

A solução admissível da [Figura 3.2](#) pode ser descrita da seguinte forma:

- A rota do veículo de apoio tem início no depósito fictício 0, sendo o primeiro ponto de paragem selecionado para lançar o drone, o ponto número um, de onde o drone é lançado duas vezes:
 - A primeira rota do drone sai do ponto de paragem número um e visita, por ordem, os nodos 101, 102, 103, 104, 105 e 102, novamente, antes de retornar ao ponto número um. Com esta rota, o drone realiza, sucessivamente, a inspeção dos seguintes segmentos: $\{101; 102\}$, $\{102; 103\}$, $\{104; 105\}$ e $\{102; 105\}$.

- A segunda rota do drone sai deste mesmo ponto de paragem número um para visitar, por ordem, os nodos 105, 106 e 107, para depois retornar ao ponto número um. Com esta rota, o drone realiza a inspeção dos seguintes segmentos, sucessivamente: {105; 106} e {106; 107}.
- Após realizar estas duas rotas, o drone é recolhido e o veículo de apoio segue para o ponto de paragem número três, onde o drone realiza apenas uma rota:
 - O drone é lançado do ponto de paragem número três em direção aos nodos 108 e 109, sucessivamente, retornando depois ao ponto de paragem número três. Com esta última rota, o drone realiza a inspeção do único segmento que faltava inspecionar: {108; 109}.
- Com todos os segmentos inspecionados, e após o drone ser recolhido neste último ponto de paragem, o veículo de apoio volta ao depósito fictício, finalizando, assim, a rota.

Capítulo 4 • Metodologia

Neste capítulo apresenta-se o modelo em PLIM para o PILED que é adaptado da formulação de Pereira (2025), de forma a permitir múltiplas rotas a partir de cada ponto de paragem. São definidas as variáveis de decisão e, de seguida, é apresentada a função objetivo, bem como o conjunto de restrições, compondo a formulação matemática.

Variáveis

$$x_{ij}^{kp} = \begin{cases} 1, & \text{se na rota } k \in K, \text{ que parte de } p \in P \setminus \{0\}, \text{ é atravessado } (i, j) \in A_s: \\ & (d_{ip} \leq \beta \wedge d_{jp} \leq \beta \wedge i, j \notin P) \vee (i = p \wedge d_{pj} \leq \beta \wedge j \notin P) \vee (j = p \wedge d_{ip} \leq \beta \wedge i \notin P) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y^p = \begin{cases} 1, & \text{se o drone é lançado de } p \in P \setminus \{0\} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z^{kp} = \begin{cases} 1, & \text{se a rota } k \in K \text{ parte de } p \in P \setminus \{0\} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo terrestre atravessa } (i, j) \in A_p \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

g_{ij} = fluxo que atravessa $(i, j) \in A_p$ e que representa o número de pontos de paragem que ainda podem ser usados

$$u_i^{kp} = \begin{cases} 1, & \text{se, na rota } k \in K, \text{ que parte de } p \in P \setminus \{0\}, \text{ é visitado } i \in P_s: d_{ip} \leq \beta \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$f_{ij}^{kp} = \text{fluxo que, na rota } k \in K \text{ que parte de } p \in P \setminus \{0\}, \text{ atravessa } (i, j) \in A_s: \\ (d_{ip} \leq \beta \wedge d_{jp} \leq \beta \wedge i, j \notin P) \vee (i = p \wedge d_{pj} \leq \beta \wedge j \notin P) \vee (j = p \wedge d_{ip} \leq \beta \wedge i \notin P)$$

Note-se que as restrições de alcance do drone são incorporadas diretamente na definição das variáveis x_{ij}^{kp} , f_{ij}^{kp} e u_i^{kp} , sendo estas variáveis criadas apenas caso as distâncias entre o ponto de paragem p e os nodos i e j sejam menores ou iguais que o alcance β . Do mesmo modo, as variáveis x_{ij}^{kp} e f_{ij}^{kp} são definidas apenas para arcos que não envolvam pontos de paragem distintos daquele onde a rota é iniciada.

Função Objetivo

$$\min \sum_{p \in P \setminus \{0\}} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_s} t_{ij} x_{ij}^{kp} + \sum_{(i,j) \in A_p} t_{ij} w_{ij} + c \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} z^{kp} \quad (1)$$

Restrições

$$\sum_{p \in P \setminus \{0\}} \sum_{k \in K} (x_{ij}^{kp} + x_{ji}^{kp}) \geq 1, \quad \forall \{i, j\} \in S: i < j \quad (2)$$

$$\sum_{j: (p,j) \in A_s} x_{pj}^{kp} = z^{kp}, \quad \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} z^{kp} \leq K_{max} y^p, \quad \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (4)$$

$$y^p \leq \sum_{k \in K} z^{kp} \quad \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (5)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A_s} x_{ij}^{kp} = \sum_{j: (j,i) \in A_s} x_{ji}^{kp}, \quad \forall i \in P_s, \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (6)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_s} t_{ij} x_{ij}^{kp} \leq \alpha z^{kp}, \quad \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (7)$$

$$\sum_{j: (j,i) \in A_s} x_{ji}^{kp} \leq \left(\frac{M_i^p}{2} + 1 \right) u_i^{kp}, \quad \forall i \in P_s, \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$u_i^{kp} \leq \sum_{j: (j,i) \in A_s} x_{ji}^{kp}, \quad \forall i \in P_s, \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (9)$$

$$f_{ij}^{kp} \leq N^p x_{ij}^{kp}, \quad \forall (i, j) \in A_s, \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (10)$$

$$\sum_{j: (p,j) \in A_s} f_{pj}^{kp} = \sum_{i \in P_s} u_i^{kp}, \quad \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (11)$$

$$\sum_{j: (j,i) \in A_s} f_{ji}^{kp} - \sum_{j: (i,j) \in A_s} f_{ij}^{kp} = u_i^{kp}, \quad \forall i \in P_s, \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (12)$$

$$z^{kp} \geq z^{(k+1)p}, \quad \forall k \in K \setminus \{K_{max}\}, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (13)$$

$$x_{ij}^{kp} \leq z^{kp}, \quad \forall (i, j) \in A_s, \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in P} w_{0j} = 1 \quad (15)$$

$$\sum_{j \in P: j \neq p} w_{pj} = y^p, \quad \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (16)$$

$$\sum_{j \in P: j \neq p} w_{jp} = y^p, \quad \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (17)$$

$$\sum_{p \in P} g_{0p} = \sum_{p \in P} y^p \quad (18)$$

$$\sum_{j \in P} g_{jp} - \sum_{j \in P} g_{pj} = y^p, \quad \forall p \in P \setminus \{0\} \quad (19)$$

$$g_{ij} \leq (|P| - 1) w_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A_p \quad (20)$$

$$x_{ij}^{kp} \in \{0,1\}, f_{ij}^{kp} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_s, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (21)$$

$$y^p \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P \quad (22)$$

$$z^{kp} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, \forall k \in K \quad (23)$$

$$w_{ij} \in \{0,1\}, g_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_p \quad (24)$$

$$u_i^{kp} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in P_s, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (25)$$

O objetivo deste modelo é minimizar o tempo total de inspeção das linhas elétricas, definido na função objetivo (1), como a soma dos tempos de voo do drone, dos tempos de deslocação do veículo terrestre e dos tempos de *set-up* e de *set-down*.

O conjunto de restrições (2) determina que todos os segmentos que requerem inspeção sejam percorridos por, pelo menos, uma rota de drone, assegurando a cobertura completa da infraestrutura em análise.

As restrições (3) garantem que, sempre que uma rota $k \in K$ é realizada a partir de um ponto de paragem $p \in P$, existe exatamente um arco aéreo usado nessa rota que parte desse ponto de paragem, garantindo, assim, o início da respetiva rota. As restrições (4) impõem que o número total de rotas realizadas num ponto de paragem $p \in P$ não pode exceder K_{max} , sendo esse limite condicionado pela variável y^p . Assim, se o ponto de paragem não for visitado pela carrinha ($y^p = 0$), nenhuma rota pode ser realizada pelo drone a partir desse ponto, e se for visitado ($y^p = 1$), o drone pode realizar até K_{max} rotas.

O conjunto de restrições (5) garante que um determinado ponto de paragem p apenas é selecionado caso exista pelo menos uma rota do drone a sair dele.

As restrições (6) asseguram o equilíbrio nos extremos dos segmentos aéreos, ou seja, que o número de arcos que sai do nodo $i \in P_s$ é igual ao número de arcos que entra em i , para a mesma rota e ponto de paragem.

O conjunto de restrições (7) garante que a duração de cada rota $k \in K$, iniciada no ponto $p \in P$, ou seja, a soma dos tempos de todos os arcos percorridos pelo drone, não excede a autonomia do drone, igualando a 0, caso a rota $k \in K$ não seja realizada a partir do ponto $p \in P$.

As restrições (8) asseguram que, se um extremo i não for visitado na rota ($u_i^{kp} = 0$), então nenhum arco pode entrar nesse nodo. Caso seja utilizado, poderão entrar $\frac{M_i^p}{2} + 1$ arcos nesse nodo, sendo M_i^p o número de arestas de serviço incidentes no nodo i , cujos extremos sejam alcançáveis a partir do ponto de lançamento $p \in P$ e, por isso, definido como:

$$M_i^p = |\{(j, i) \in A_s : \{j, i\} \in S \wedge d_{jp} \leq \beta \wedge d_{ip} \leq \beta\}|.$$

As restrições (9) impõem que um determinado nodo só pode ser utilizado, numa rota $k \in K$ que parte de um ponto de paragem $p \in P$, se existir pelo menos um arco, nessa rota, a entrar nele.

O conjunto de restrições (10) assegura que não existe fluxo a circular em arcos que não são utilizados na solução e, ao mesmo tempo, que, caso um determinado arco $(i, j) \in A_s$ seja utilizado na rota $k \in K$ que parte do ponto $p \in P$, o fluxo máximo que pode circular nesse arco será N^p , i.e., o número de extremos alcançáveis a partir do ponto de paragem do veículo de apoio. Assim, $N^p = |\{i \in P_s : d_{ip} \leq \beta\}|$. O conjunto de restrições (11) define que o fluxo que sai do ponto de paragem $p \in P$ na origem de cada rota $k \in K$ é igual ao número de extremos de arestas de serviço visitados na sua rota. Já as restrições (12) asseguram que cada nodo consome exatamente uma unidade de fluxo, caso ele seja utilizado, pelo que a diferença entre o fluxo que entra e o fluxo que sai é igual a uma unidade; caso não seja utilizado ($u_i^{kp} = 0$), o nodo não irá consumir nenhuma unidade de fluxo, sendo o fluxo que entra nele igual ao fluxo que sai. Como o fluxo que sai do depósito é igual ao número de nodos visitados, na rota k que parte do ponto de paragem p , garante-se a continuidade da rota, ou seja, que não há rotas isoladas dos pontos de paragem.

O conjunto de restrições (13) introduz uma ordenação nas rotas associadas a cada ponto de paragem, impondo que uma rota $k + 1$ só pode ser utilizada se a rota k também for utilizada, eliminando simetrias na numeração das rotas.

As restrições (14) garantem que um arco aéreo $(i, j) \in A_s$ apenas pode ser utilizado numa rota k se essa rota for utilizada. Caso contrário ($z^{kp} = 0$), a variável correspondente (x_{ij}^{kp}) toma valor 0.

O conjunto de restrições (15) impõe que o depósito fictício tem apenas um arco que sai dele. Já os conjuntos de restrições (16) e (17) asseguram que cada ponto selecionado é visitado exatamente uma vez pela carrinha (se $y^p = 1$, então por (16) a carrinha usa apenas um arco a sair de p e, por (17), apenas um arco a entrar em p ; se $y^p = 0$ a carrinha não entra nem sai de p).

As restrições (18) impõem que o fluxo total proveniente do depósito fictício seja igual ao número de pontos de paragem a visitar, isto é, o número de variáveis y^p utilizadas. As restrições (19) asseguram a conservação de fluxo em cada ponto de paragem, impondo que a quantidade de fluxo que entra num ponto p seja igual à quantidade que sai acrescida de uma unidade (y^p que representa a unidade de fluxo consumida nesse ponto), sempre que esse ponto de paragem, seja visitado. Caso não seja visitado ($y^p = 0$), o fluxo que entra no ponto é igual ao fluxo que sai. O conjunto de restrições (20) limita o valor máximo do fluxo de um determinado arco $(i, j) \in A_p$ ao número de pontos de paragem, caso esse arco seja utilizado na rota do veículo terrestre.

Por fim, as restrições de (21) a (25) definem o domínio da variáveis.

Capítulo 5 • Recolha de Dados e Geração de Instâncias

No presente capítulo serão apresentados os dados e os parâmetros utilizados na implementação do modelo. Inicialmente descrevem-se as instâncias consideradas no estudo e a forma como estas foram organizadas. De seguida são definidos e justificados os valores dos parâmetros adotados. Por fim, descreve-se o processo de cálculo das distâncias e dos tempos associados às diferentes ligações consideradas no problema.

5.1. Recolha e Organização dos Dados

Para a realização dos testes computacionais foram utilizados dois conjuntos de instâncias previamente preparadas para propósitos diferentes: o conjunto A, que apresenta instâncias de diferentes localizações geográficas sem nenhuma ligação e será utilizado como conjunto de instâncias de teste, de modo a verificar a redução do tempo de inspeção de que beneficia o regime BVLOS, em comparação com o VLOS; e o conjunto B, que apresenta instâncias que compõem uma rede elétrica da zona do Baixo Alentejo interior e será utilizado para testar os vários valores possíveis de K_{max} e, conforme o valor selecionado para este parâmetro, comparar a solução da linha total em BVLOS com o tempo que demoraria à equipa atual da EDP Labelec a fazer a inspeção dessa mesma linha (conforme o procedimento atual).

Esta diferenciação entre instâncias é necessária, uma vez que os objetivos das duas análises são distintos. Enquanto o conjunto A permite avaliar o desempenho operacional tanto do regime VLOS como do BVLOS, o conjunto B foi preparado especificamente para avaliar o impacto que tem o número máximo de rotas que podem ser realizadas a partir de um mesmo ponto de paragem. Neste último caso é também possível comparar o tempo total em BVLOS com o tempo total com o procedimento atualmente adotado pela EDP Labelec, no qual a equipa opera em regime VLOS, visto que todas as instâncias deste conjunto pertencem à mesma zona geográfica.

As instâncias usadas neste estudo foram construídas com procedimentos idênticos aos usados em (Pereira, 2025), aos quais foi adicionado um passo extra: após a geração dos pontos de paragem, estes foram agrupados em zonas de, aproximadamente, 7.07 hectares para o conjunto A, e 300 hectares para o conjunto B, nas quais foram selecionados os pontos com maior altitude. Este passo foi adicionado para que se pudessem favorecer locais potencialmente mais adequados ao lançamento e recolha do drone.

Estas instâncias foram construídas garantindo a cobertura total dos segmentos de linha elétrica, ou seja, que todos os segmentos, incluindo os respetivos nodos, são alcançados por, pelo menos, um ponto de paragem, conforme o alcance do drone.

A [Figura 5.1](#) apresenta a representação espacial da rede elétrica correspondente ao conjunto de instâncias B, permitindo visualizar o traçado da linha, bem como a delimitação das diferentes áreas que deram origem às instâncias consideradas nos testes computacionais.

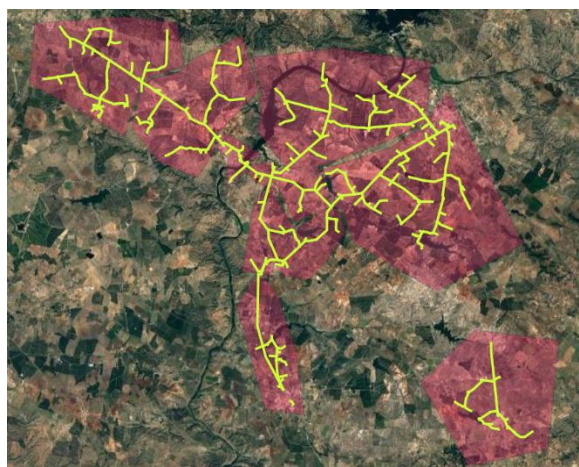


Figura 5.1 - Representação espacial da rede elétrica referente ao conjunto de instâncias B

As 15 instâncias do conjunto A, bem como as 10 instâncias do conjunto B estão organizadas em dois ficheiros ‘.xlsx’ cada, nos quais se encontram, respetivamente, os possíveis pontos de paragem e os segmentos da rede elétrica que necessitam de inspeção. No ficheiro dos segmentos, cada registo contém as coordenadas dos nodos inicial e final, aos quais correspondem um ID único. No ficheiro dos pontos de paragem, cada ponto contém as respetivas coordenadas e estão identificados com um ID único não confundível com os ID’s dos segmentos.

Todas as coordenadas estão no sistema de coordenadas projetadas EPSG:25829, de forma a possibilitar cálculos métricos, uma vez que este sistema utiliza unidades em metros.

A Tabela 5.1 apresenta as características de cada instância dos dois conjuntos, nomeadamente o número de segmentos a inspecionar ($|S|$), o número de pontos de paragem ($|P|$) e o seu comprimento (em km). As instâncias do conjunto A designam-se por “A#” e as do conjunto B por “B#”.

Tabela 5.1 - Características das instâncias dos dois conjuntos

Instância	Comprimento (km)	$ P $	$ S $
A1	7.2	13	47
A2	6.8	14	54
A3	11.1	32	71
A4	10.2	27	55
A5	12.7	33	74
A6	7.7	20	46
A7	11.9	31	64
A8	13	26	69
A9	8.6	16	52
A10	11.4	19	73
A11	13.5	33	73
A12	8.9	17	49
A13	9.7	18	58
A14	8.4	22	49
A15	10.5	25	59
B1	37.78	19	67
B2	31.45	11	51
B3	7.92	2	20
B4	5.73	2	14
B5	16.11	5	22
B6	19.61	7	30
B7	12.74	5	22
B8	57.1	17	89
B9	60.23	20	114
B10	19.28	10	29

5.2. Parametrização

Devido à possibilidade de obtenção de autorização para operar em BVLOS, teremos de ter em conta algumas implicações operacionais relevantes para o problema em questão. As operações BVLOS são fortemente condicionadas do ponto de vista regulatório em ambientes urbanos, pelo que é necessário obter uma autorização específica da ANAC (Autoridade Nacional de Aviação Civil), o que pode condicionar a inspeção de determinadas linhas (Autoridade Nacional da Aviação Civil [ANAC], 2026).

Em operações BVLOS é comum recorrer a dois tipos distintos de drones: asa fixa e VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*). Os drones de asa fixa são semelhantes a um avião convencional que necessita de deslocação horizontal contínua para se manter em voo. Não conseguindo realizar voo estacionário, necessitam de espaço para descolagem e aterragem, o que iria restringir os possíveis pontos de paragem da carrinha a ambientes mais rurais. Os drones VTOL são aeronaves híbridas que combinam a descolagem e aterragem vertical dos multirotores com o voo horizontal dos asa fixa durante a operação. Assim, estes não precisam de pista nem de impulso para descolarem.

Como forma de generalizar o modelo ao máximo, permitindo a sua aplicação em contextos tanto urbanos, como rurais, assume-se a utilização da tipologia de drone VTOL para a definição dos parâmetros considerados neste estudo.

De forma a garantir as necessidades da EDP Labelec na inspeção das linhas elétricas, torna-se necessário procurar um modelo específico de drone VTOL, para garantir que a qualidade e o tipo de imagem capturada correspondiam às exigências da empresa e, ao mesmo tempo, para obter os valores dos parâmetros referentes ao drone, nomeadamente a autonomia, alcance, e velocidade de inspeção (velocidade do voo horizontal do drone).

Será, então, assumida, neste estudo, a utilização do drone *WingtraOne Gen II* cujas capacidades fotográficas foram aprovadas pelo especialista da EDP Labelec.

Assim, conforme a ficha técnica oficial do modelo (Wingtra AG, 2024), a velocidade de inspeção (v_d) será de 16 m/s (57.6 km/h), sendo a autonomia (α) de 59 minutos.

Apesar de voos em regime BVLOS serem, usualmente, controlados via rede móvel (comummente 4G ou 5G), não existindo, nesse caso, um alcance máximo definido, poder-se-á aplicar o modelo numa zona maioritariamente rural, onde a rede móvel tenha por hábito ser fraca, ou mesmo inexistente. Por este motivo, será melhor assumir o valor do alcance máximo do drone (β) como a distância máxima a que o drone pode estar em ligação via rádio (*radio link*), sendo esse valor de 10 km. Desta forma, garante-se que o drone não perde a ligação, em momento algum, com o operador.

Para considerar os valores dos parâmetros associados aos drones multirotores, foi feita uma análise, em conjunto com o especialista da EDP Labelec, aos valores apurados por Pereira (2025) tendo-se concluído pela sua manutenção.

Assim, assumem-se os valores dos parâmetros do drone multirotor utilizados em Pereira (2025), ou seja, a velocidade de inspeção (v_d) é igual a quatro m/s (14.4 km/h); a autonomia (α) de 30 minutos; e o alcance (β) de 700 metros.

Com o objetivo de poderem ser calculadas as distâncias das ligações iniciais e finais de cada rota dos drones, ou seja, os arcos entre pontos de paragem e nodos dos segmentos que requerem inspeção (d_{ij} : $(i \in P \wedge j \in P_s) \vee (i \in P_s \wedge j \in P)$), é necessário definir a altura a que voarão (δ) tanto os drones multirotores, como os VTOL. Considerando a altura média dos postes da rede, assume-se que o drone voa a uma altura média de 20 metros.

Tendo em conta as estradas selecionadas e a generalização pretendida para o presente estudo, considera-se prudente igualar a velocidade do veículo de apoio (v_c) a um valor intermédio entre o de circulação urbana e o de interurbana. Assim, assume-se $v_c = 17$ m/s (≈ 61 km/h), procurando representar uma velocidade média operacional compatível com deslocações realizadas em diferentes contextos rodoviários, sem privilegiar qualquer tipologia específica de via.

Para atribuir um valor aos tempos de *set-up* e de *set-down*, foram considerados os procedimentos habituais da operação atual da EDP Labelec, nomeadamente o estacionamento da viatura, orientação da equipa relativamente à área de inspeção, montagem e preparação do drone, verificações de segurança e configurações necessárias, bem como os procedimentos de aterragem, desmontagem e acondicionamento do drone após a conclusão da inspeção. Segundo a empresa, estas operações equivalem, em média, a cinco minutos cada um e, portanto, $c = 10$ minutos.

De seguida, na [Tabela 5.2](#), encontram-se resumidos os valores dos parâmetros das diferentes categorias de drones que são considerados no presente estudo. Do mesmo modo, encontram-se resumidos na [Tabela 5.3](#) os valores dos restantes parâmetros do modelo, comuns às duas categorias de drones e, naturalmente, aos dois regimes de voo.

Tabela 5.2 - Valores dos parâmetros dos drones

Parâmetro	Definição	Valor multirotor	Valor VTOL
α	Autonomia do drone (min.)	30	59
β	Alcance máximo do drone (m)	700	10 000
v_d	Velocidade do drone (m/s)	4	16

Tabela 5.3 - Valores dos parâmetros gerais do modelo

Parâmetro	Definição	Valor
v_c	Velocidade do veículo de apoio (m/s)	17
c	Tempo de <i>set-up</i> + tempo de <i>set-down</i> (min.)	10
δ	Altura de voo de ambos os drones (m)	20

5.3. Cálculo das Distâncias e Tempos

Reunidos os valores apresentados no subcapítulo anterior, já se torna possível o cálculo das distâncias das ligações da rede e respetivos tempos (d_{ij} e t_{ij}).

Existem três tipos de ligações diferentes, pelo que as suas distâncias (em metros) terão de ser calculadas de diferentes formas:

- Arcos entre pares de pontos de paragem: Como estas ligações envolvem exclusivamente pontos de paragem ($i, j \in P \setminus 0$), que se encontram em estradas, as distâncias são calculadas com base na rede rodoviária obtida através da biblioteca osmnx do Python. Estas distâncias correspondem ao comprimento (em metros) do caminho mais curto na rede rodoviária entre cada par de pontos de paragem. Os valores das distâncias das ligações que envolvem o depósito fictício $\{0, j\} : j \in P$, são igualadas a 0.
- Arcos entre pares de extremos dos segmentos: Assumindo que o drone voa a uma altura média constante (δ) e que se desloca entre estes nodos ($i, j \in P_s$) em linha reta, podem-se desenhar estas ligações num plano bidimensional e o cálculo destas distâncias pode ser

feito pela fórmula da distância Euclideana, ou seja, $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, sendo (x_k, y_k) as coordenadas do ponto k .

- Arcos entre pontos de paragem e extremos dos segmentos: Como nestas ligações cada nodo pertence a um conjunto diferente $((i \in P \wedge j \in P_s) \vee (i \in P_s \wedge j \in P))$, nos quais o drone está em alturas diferentes, é necessário adaptar a fórmula da distância Euclideana, sendo o cálculo das distâncias destas ligações dado por:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + \delta^2}.$$

O cálculo dos tempos (em segundos) é feito através de uma proporção simples, sendo necessário considerar apenas dois cenários diferentes:

- Arcos terrestres (A_p): a proporção simples é feita através de uma divisão entre a distância de cada arco $(i, j) \in A_p$ e a velocidade do veículo de apoio (v_c), ou seja, $t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_c}$.
- Arcos aéreos (A_s): a proporção simples é feita através de uma divisão entre a distância de cada arco $(i, j) \in A_s$ e a velocidade do drone (v_d), ou seja, $t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_d}$.

Capítulo 6 • Resultados

Para obter os resultados que irão ser apresentados neste capítulo, desenvolveu-se o modelo em PLIM no Python, resolvido através do *solver* Gurobi, versão 12.0.3. O modelo foi executado num computador com as seguintes especificações: processador 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400H @ 2.70GHz; 16 GB de memória RAM; e sistema operativo Windows 10 Pro.

6.1. VLOS versus BVLOS

De modo a testar a redução do tempo que o regime BVLOS permite, foram então utilizadas as instâncias do conjunto A (Tabela 5.1). Para tal, cada instância foi resolvida impondo um tempo limite de uma hora ao *solver* e considerando dois cenários distintos. No primeiro, foram utilizados os valores de velocidade, autonomia e alcance correspondentes ao drone multirrotor, representando uma operação em regime VLOS. No segundo, foram utilizados os parâmetros do drone VTOL, representando uma operação em regime BVLOS. Cada resultado apresenta um limite superior (LS) e um limite inferior (LI), ambos em segundos, do valor ótimo obtido pelo *solver* dentro do tempo limite.

Para esta comparação, foi assumido $K_{max} = 2$, de forma a permitir que existam várias rotas por ponto de paragem, não tornando o problema demasiado grande.

Os resultados para os tempos de cada regime de voo apresentam-se na Tabela 6.1, onde se encontram os seguintes valores para cada regime de voo: limite superior e limite inferior (convertidos de segundos para o formato de horas, minutos e segundos (h:mm:ss)); gap percentual, que representa a diferença entre os limites superior e inferior (calculado da seguinte forma: $gap = \frac{LS-LI}{LS}$); e o tempo percorrido pelo *solver* até encontrar a solução ótima (limitado a uma hora, ou seja, 3600 segundos). Para além destes valores, a tabela apresenta, ainda, a redução percentual entre os tempos dos limites superiores, em segundos, dos dois regimes (calculado da seguinte forma: $Redução = \frac{LS_{BVLOS}-LS_{VLOS}}{LS_{VLOS}}$).

Tabela 6.1 - Resultados VLOS versus BVLOS

Inst.	VLOS				BVLOS				Redução (%)
	LS (h:mm:ss)	LI (h:mm:ss)	Gap	Tempo percorrido (s)	LS (h:mm:ss)	LI (h:mm:ss)	Gap	Tempo percorrido (s)	
A1	1:45:29	1:45:29	0%	27.65	0:22:12	0:20:41	6.86%	3600	-78.95%
A2	1:13:00	1:13:00	0%	25.47	0:19:48	0:18:50	4.93%	3600	-72.87%
A3	2:17:42	2:17:42	0%	186.24	0:27:21	0:21:29	21.43%	3600	-80.14%
A4	2:28:04	2:28:04	0%	72.8	0:25:55	0:21:00	18.97%	3600	-82.50%
A5	3:20:16	3:20:16	0%	113.62	0:33:05	0:24:41	25.39%	3600	-83.48%
A6	1:48:24	1:48:24	0%	12.8	0:22:19	0:21:08	5.25%	3600	-79.42%
A7	3:07:00	3:07:00	0%	42.44	0:28:52	0:22:41	21.40%	3600	-84.57%
A8	3:04:00	3:04:00	0%	7.29	0:31:08	0:24:06	22.61%	3600	-83.08%
A9	1:37:12	1:37:12	0%	14.98	0:22:15	0:20:55	5.99%	3600	-77.11%
A10	2:19:17	2:19:17	0%	29.01	0:27:15	0:22:31	17.34%	3600	-80.44%
A11	3:11:04	3:11:04	0%	126.29	0:28:22	0:23:33	16.98%	3600	-85.15%
A12	1:51:37	1:51:37	0%	30.72	0:23:24	0:21:31	8.01%	3600	-79.04%
A13	2:28:54	2:28:54	0%	40.13	0:26:23	0:21:59	16.70%	3600	-82.28%
A14	1:55:41	1:55:41	0%	51.21	0:23:43	0:21:26	9.64%	3600	-79.50%
A15	2:16:17	2:16:17	0%	132.38	0:25:46	0:21:44	15.64%	3600	-81.10%

Apesar de algumas instâncias em regime BVLOS apresentarem valores de gap relativamente elevados, é observável que a utilização deste regime resulta numa redução muito significativa (e consistente) do tempo de operação, obtendo uma média de redução percentual de -80.64%, sendo que as reduções observadas variam entre -72.87% e -85.15%.

Estes valores resultam exclusivamente da diferença dos parâmetros utilizados (multirotor *versus* VTOL), uma vez que em todas as soluções em regime BVLOS apenas foi utilizada uma única rota que parte de um único ponto de paragem, ou seja, o modelo não vê necessidade, nestas instâncias, de criar uma segunda rota de voo, já que consegue fazer a inspeção de todos os segmentos da linha elétrica em uma única rota aérea, respeitando os limites de alcance e de autonomia.

Podemos ainda visualizar, através da [Figura 6.1](#), que representa um gráfico de dispersão entre o comprimento de cada instância (em km) e a redução percentual entre os dois regimes, que existe uma tendência para que a diferença entre os dois regimes se torne mais acentuada à medida que aumenta o comprimento da linha a inspecionar, tal como explicitado pela linha a tracejado que representa a regressão linear dos referidos dados.

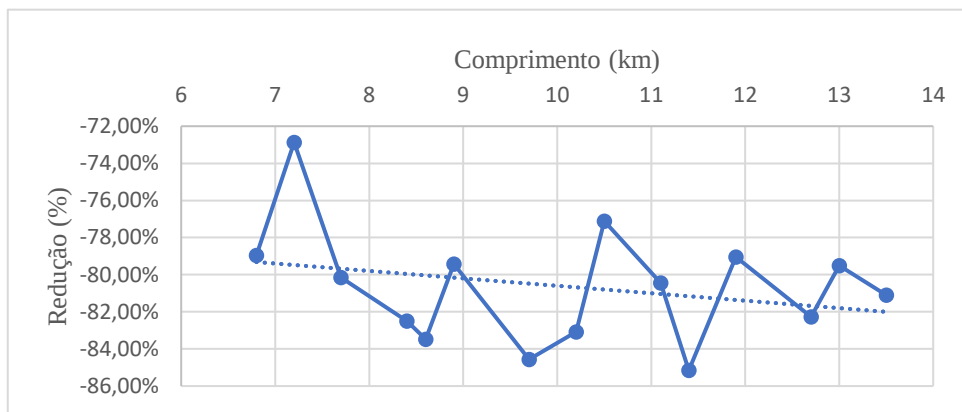


Figura 6.1 - Relação entre o comprimento da instância e a redução percentual do tempo de inspeção

Estes resultados evidenciam que a adoção de drones VTOL em operações em regime BVLOS poderá traduzir-se numa redução substancial dos tempos de operação, especialmente em redes de maior dimensão.

6.2. Teste a K_{max}

O número de rotas utilizadas a partir de um determinado ponto é um valor que dependerá sempre de três fatores: alcance; autonomia; e dimensão da rede. Tendo isto em conta, torna-se essencial estudar diferentes valores de K_{max} , para que ao utilizar os dados necessários, o modelo não restrinja possíveis soluções e, ao mesmo tempo, não se torne demasiado grande, uma vez que um maior valor de K_{max} significa um maior número de variáveis, o que impacta significativamente na resolução do problema.

Assim, para este estudo, foram utilizadas as instâncias do conjunto B, que foram resolvidas para valores crescentes deste parâmetro, com o objetivo de analisar a partir de que valor o aumento de K_{max} deixa de alterar as soluções encontradas, indicando, portanto, que o número máximo de rotas permitidas por ponto de paragem deixa de ser um fator limitativo para este conjunto de instâncias. Para tal, cada instância foi resolvida para $K_{max} = 1$, $K_{max} = 2$ e $K_{max} = 3$.

Estes resultados encontram-se na [Tabela 6.2](#) onde, para cada instância e valor de K_{max} são apresentados os LS e LI obtidos no fim do tempo limite, bem como o gap percentual (calculado conforme apresentado no subcapítulo anterior), o tempo, em segundos, até à obtenção da solução final, e o número máximo de rotas na solução, a partir de um mesmo ponto de paragem.

Tabela 6.2 - Resultados do teste a K_{max}

Instância	K_{max}	LS (hh:mm:ss)	LI (hh:mm:ss)	Gap	Tempo percorrido (s)	Nº máximo de rotas num ponto usadas
B1	1	01:05:58	00:54:20	17.64%	3600	1
	2	01:05:58	00:51:37	21.76%	3600	1
	3	01:05:59	00:49:57	24.31%	3600	1
B2	1	00:55:45	00:55:44	0.008%	1174.10	1
	2	00:55:45	00:55:44	0.008%	1220.96	1
	3	00:55:45	00:55:45	0%	1953.34	1
B3	1	00:22:53	00:22:53	0%	0.35	1
	2	00:22:53	00:22:53	0%	0.48	1
	3	00:22:53	00:22:53	0%	0.49	1
B4	1	00:19:51	00:19:51	0%	0.16	1
	2	00:19:51	00:19:51	0%	0.35	1
	3	00:19:51	00:19:51	0%	0.35	1
B5	1	00:35:58	00:35:58	0%	19.83	1
	2	00:35:58	00:35:58	0%	31.99	1
	3	00:35:58	00:35:58	0%	36.79	1
B6	1	00:42:00	00:42:00	0%	85.35	1
	2	00:42:00	00:42:00	0%	244.68	1
	3	00:42:00	00:42:00	0%	293.65	1
B7	1	00:30:32	00:30:32	0%	20.84	1
	2	00:30:32	00:30:32	0%	21.14	1
	3	00:30:32	00:30:32	0%	20.44	1
B8	1	01:51:40	01:20:22	28.03%	3600	1
	2	01:50:34	01:13:28	33.55%	3600	1
	3	01:52:28	01:12:44	35.32%	3600	1
B9	1	07:05:55	01:12:18	83.02%	3600	1
	2	01:51:24	01:12:09	35.23%	3600	2
	3	01:55:08	01:12:09	37.34%	3600	2
B10	1	00:39:12	00:39:12	0%	123.60	1
	2	00:39:12	00:39:12	0%	99.01	1
	3	00:39:12	00:39:12	0%	122.11	1

Como se pode observar, o maior número de rotas utilizadas foram duas (coluna sete da [Tabela 6.2](#)), na Instância B9. Assim, considerar $K_{max} = 3$ traduz-se no aumento da dificuldade de resolução do problema, sem qualquer benefício para a solução obtida, quando comparado com as soluções em que $K_{max} = 2$. Nas instâncias em que o tempo limite não é excedido, ao aumentarmos o valor de K_{max} o modelo tende a demorar mais tempo a ser resolvido. Nas instâncias em que o limite de tempo é atingido, ao aumentarmos o valor deste parâmetro, o gap percentual aumenta. Neste segundo caso apenas é exceção a Instância B9, onde o gap percentual da solução obtida com $K_{max} = 1$ é muito elevado (83.02%). Ainda assim, nesta Instância B9, existe um crescimento do gap entre as soluções obtidas com $K_{max} = 2$ e $K_{max} = 3$.

Na Instância B2 as soluções obtidas, que não atingiram o tempo limite, apresentam um gap positivo muito reduzido, para $K_{max} = 1$ e $K_{max} = 2$, pelo que não é considerado solução ótima, efetivamente. Isto acontece, certamente, devido a questões de arredondamento e de tolerância.

De um modo geral, o valor deste parâmetro não influenciou o valor das soluções obtidas, já que na maior parte das instâncias o valor da solução manteve-se igual, tal como se pode observar nas Instâncias B2, B3, B4, B5, B6, B7 e B10. Mesmo nas Instâncias B1 e B8, em que o limite de tempo foi atingido, os valores das soluções obtidas são muito parecidos, o que faz criar a percepção de que, caso não houvesse um limite de tempo imposto ao modelo, os três valores de cada instância seriam idênticos.

Apenas uma instância beneficiou da aplicação de um valor maior de K_{max} , a instância B9. A solução desta instância, com $K_{max} = 1$, foi de 7:05:55 (com gap de 83.02%) e com $K_{max} = 2$ foi de 1:51:24 (com gap de 35.23%), uma diferença de 5:14:31. Apesar de o valor do primeiro gap ser muito elevado, o segundo gap também pode ser considerado relativamente alto, pelo que, apesar dos valores dos gaps, podemos afirmar que, nesta instância, permitir múltiplas rotas por ponto de paragem levou a obter uma melhor solução admissível dentro do tempo limite.

O facto da única instância que beneficiou da aplicação de múltiplas rotas ser aquela com maior comprimento, sugere que quanto maior a dimensão da instância, maior a probabilidade de a mesma beneficiar de múltiplas rotas a partir de um mesmo ponto de paragem.

Disto pode ser reiterado que $K_{max} = 2$ é suficiente para representar todas as soluções observadas sem tornar o problema demasiado grande, pelo que para o conjunto de instâncias B (rede elétrica do Baixo Alentejo interior), é o valor que faz mais sentido ser utilizado.

6.3. Instância Real

Não foi possível resolver a linha completa do Baixo Alentejo interior devido à sua dimensão. Com o aumento de $|P|$, $|S|$ e K_{max} , o número de variáveis e de restrições cresce rapidamente, o que torna a formulação demasiado grande para ser construída e resolvida.

Por este motivo, esta análise vai ser feita com base nos resultados obtidos para as instâncias pertencentes a esta rede elétrica, considerando os valores correspondentes a $K_{max} = 2$, presentes na [Tabela 6.2](#).

Somando os valores das soluções admissíveis encontradas para cada instância, quando $K_{max} = 2$, obtemos a estimativa para o tempo de inspeção total da rede elétrica de 8:54:07. Como os dados RGB e infravermelhos não conseguem ser recolhidos ao mesmo tempo que os LiDAR, o drone terá de duplicar esta rota, pelo que o tempo total da inspeção desta linha seria de 17:48:14, sabendo que a rede toda tem um total de, aproximadamente, 267.95 km. Visto que este valor resulta da soma dos tempos de todas as instâncias, sendo algumas soluções não ótimas, uma vez que apresentam gap positivo, o valor obtido constitui uma estimativa conservadora do tempo de inspeção, sendo expectável que uma solução ótima apresente um valor inferior.

Segundo o especialista da EDP Labelec, atualmente um operador, num dia de trabalho (8 horas) consegue fazer a inspeção completa (rota de RGB e infravermelhos e rota de LiDAR) de uma rede com 15 km de comprimento.

Aplicando a proporção simples $\frac{267.95 \text{ km} \times 8 \text{ horas}}{15 \text{ km}}$, obtemos a estimativa de que o mesmo operador apenas conseguiria fazer a inspeção total destes 267.95 km em 142:54:24 (142 horas, 54 minutos e 24 segundos), ou seja, demoraria um pouco menos de 18 dias de trabalho.

Comparando a estimativa em regime BVLOS com a situação operacional atual da EDP Labelec, observa-se uma redução muito significativa, de menos 125:06:10, o que corresponde a, aproximadamente, 16 dias de trabalho e a uma redução percentual de -87.54%, valor este que é semelhante aos valores de redução obtidos na Tabela 6.1.

Contudo, importa referir que esta comparação tem por base estimativas, uma vez que o tempo obtido para o regime BVLOS resulta da soma dos resultados das instâncias que compõem toda a rede e não da resolução direta da mesma. Além disso, algumas dessas instâncias têm valores de gap positivos, pelo que os valores apresentados correspondem às melhores soluções admissíveis encontradas pelo *solver* no tempo limite fixado, e não às soluções ótimas.

Ainda assim, os resultados evidenciam que a utilização de drones VTOL, em regime BVLOS, resulta numa redução muito significativa do tempo total de inspeção. É também importante notar que esta redução não resulta da realização de múltiplas rotas a partir de um mesmo ponto de paragem, pois nas instâncias utiliza-se, no máximo, uma rota por ponto de paragem, à exceção da Instância B9. No entanto, este resultado poderá estar relacionado com as características e a estrutura das redes utilizadas, pelo que, em redes com configurações diferentes, a possibilidade de realizar múltiplas rotas a partir de um mesmo ponto de paragem poderá assumir uma maior relevância.

Capítulo 7 • Conclusão

O presente trabalho teve como principal objetivo o estudo do impacto da utilização de drones, em regime BVLOS, na inspeção de linhas elétricas, através da extensão do modelo PILED proposto por Pereira (2025). Para este efeito, foi desenvolvida uma formulação em PLIM que permite a realização de múltiplas rotas do drone a partir de um mesmo ponto de paragem do veículo de apoio.

A implementação do modelo foi feita recorrendo à linguagem de programação Python, através da qual foi possível resolver instâncias previamente preparadas para três propósitos diferentes: o conjunto de instâncias A foi utilizado para comparar os resultados dos drones multirotor (regime VLOS) com os drones VTOL (regime BVLOS); o conjunto de instâncias B foi utilizado para testar diferentes valores de K_{max} ; e a instância da rede elétrica da zona do Baixo Alentejo interior foi utilizada para poder comparar a estimativa do tempo total de inspeção da rede elétrica recorrendo ao regime BVLOS com a estimativa do tempo total necessário para um operador fazer a inspeção da mesma linha, conforme os procedimentos atuais da EDP Labelec.

Verificou-se que a utilização de drones VTOL em regime BVLOS permite reduções muito significativas do tempo de inspeção, comparada com a operação atual da EDP Labelec, em regime VLOS, obtendo o valor médio da redução de -80.64%.

Por outro lado, constatou-se que o ganho operacional do BVLOS, nestas instâncias, provém sobretudo do aumento do alcance e autonomia do drone, e não da possibilidade de realizar várias rotas a partir de um mesmo ponto de paragem terrestre.

Por fim, estimou-se o tempo total, em regime BVLOS, que seria necessário para realizar a inspeção integral da rede elétrica do Baixo Alentejo interior, bem como o tempo total que um operador, que segue os procedimentos atuais da EDP Labelec, precisaria para realizar a inspeção dessa mesma rede. Através desses dados observou-se uma redução bastante significativa entre o cenário atual e o regime BVLOS.

Com tudo o que foi abordado ao longo deste trabalho, é possível ficar com a ideia geral de que a aplicação do regime BVLOS ao contexto diário da operação de linhas elétricas da EDP Labelec é bastante positiva, pois reduz o número de pontos de paragem necessários e, consequentemente, o número das deslocações terrestres. Adicionalmente, a utilização do BVLOS também resulta numa redução significativa do tempo da inspeção, o que, naturalmente, resulta numa maior produtividade das equipas de inspeção da rede elétrica.

Noutra ótica, foi visualizado que no conjunto A, todas as instâncias em regime BVLOS, independentemente do comprimento e dimensão, apresentaram gap positivo, enquanto no conjunto B, tal só se verificou para B1, B8 e B9. Alguns valores de gap foram bastante elevados, sobretudo em instâncias de maior dimensão. Por isto, apesar da formulação proposta ser capaz de produzir soluções admissíveis para instâncias reais, a resolução exata do problema continua a apresentar dificuldades computacionais significativas à medida que aumenta a dimensão da rede.

Apesar da realização de múltiplas rotas a partir de um mesmo ponto de paragem terrestre apenas ter sido observada numa das instâncias, a formulação desenvolvida permite representar esta possibilidade, constituindo uma extensão do modelo proposto por Pereira (2025), numa ótica de operações em regime BVLOS.

Como trabalho futuro, sugere-se o desenvolvimento de metaheurísticas que permitam resolver instâncias de maior dimensão, com tempos computacionais reduzidos, o que poderá possibilitar a utilização de mais rotas aéreas a partir de um mesmo ponto de paragem, bem como a extensão do modelo para cenários com múltiplos drones. Adicionalmente, pode ser interessante estudar o

impacto da utilização de diferentes tipos e modelos de drones em operações BVLOS. Por fim, a integração da topografia do terreno e da meteorologia na modelação do problema, considerando o seu impacto nas distâncias percorridas, nos tempos de voo e no consumo energético do drone, nomeadamente através da introdução de estocasticidade nos tempos de deslocação, poderá contribuir para uma representação ainda mais realista da operação.

Bibliografia

- Amorosi, L., Puerto, J., & Valverde, C. (2021). Coordinating drones with mothership vehicles: The mothership and drone routing problem with graphs. *Computers and Operations Research*, 136, 105445. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105445>
- Autoridade Nacional da Aviação Civil. (25 de fevereiro de 2026). *Categoria Específica (SPEC)*. Obtido em 17 de junho de 2026, de https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria_especifica/Paginas/CategoriaEspecifica.aspx
- Campbell, J. F., Corberán, Á., Plana, I., Sanchis, J. M., & Segura, P. (2021). Solving the length constrained K-drones rural postman problem. *European Journal of Operational Research*, 292(1), 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.10.035>
- Coelho, A., Santos, R. V., & Martins, R. M. (2025, 16-19 de junho). *Leveraging overhead powerline inspection using drones and digitalization* [Paper presentation]. CIRED 2025 Conference, Genebra. <https://doi.org/10.1049/icp.2025.1741>
- Corberán, T., Plana, I., & Sanchis, J. M. (2025). The min max multi-trip drone location arc routing problem. *Computers and Operations Research*, 174, 106894. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106894>
- Liu, X., Chung, S. H., & Kwon, C. (2025). An adaptive large neighborhood search method for the drone-truck arc routing problem. *Computers and Operations Research*, 176, 106959. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106959>
- Pereira, I. A. (2025). *Modelos Matemáticos para o Problema da Inspeção de Linhas Elétricas* [Tese de Mestrado, Instituto Superior de Economia e Gestão]. Repositório Institucional da Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.5/118085>
- Sacramento, D., Pisinger, D., & Ropke, S. (2019). An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 102, 289-315. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.018>
- Wingtra AG. (2024). *WingtraOne Gen II Technical Specifications*. Obtido de <https://wingtra.com/wp-content/uploads/Wingtra-Technical-Specifications.pdf>